



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

OLLI SOLA  
SÄHKÖAUTO DYNAAMISENA ENERGIAVARASTONA SÄHKÖ-  
MARKKINOILLA

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Tutkijatohtori Antti Rauti-  
ainen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
20. syyskuuta 2017

# TIIVISTELMÄ

**SOLA, OLLI:** Sähköauto dynaamisena energiavarastona sähkömarkkinoilla  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Kandidaatintyö, 19 sivua  
Tammikuu 2018  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Pääaine: Sähkövoimatekniikka  
Tarkastaja: Tutkijatohtori Antti Rautiainen

Avainsanat: sähköauto, sähkömarkkinat, vehicle-to-grid

Sähköautojen yleistyminen nähdään yleensä pelkästään lisäkuormana sähkönjakelu- ja siirtoverkoille. Työssä selvitetään, miten sähköautojen akkuja voidaan käyttää energiavarastoina myös sähköverkon kannalta. Työ on teoreettinen ja keskittyy tulevaisuudessa oleviin vaihtoehtoihin.

Työn on jaettu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa käydään läpi sähköautoihin liittyviä teknisiä ominaisuuksia, selvitetään sähköautojen suosioon vaikuttavia tekijöitä ja arvioidaan sähköautojen suosiota tulevaisuudessa. Toisessa osassa avataan pohjoismaisten sähkömarkkinoiden toimintaa keskittyen työn kannalta olennaisiin osa-alueisiin. Kolmannessa osassa käsitellään älykkäitä sähköverkkoja, sähköautojen akkujen hyödyntämiseksi tehtäviä latausjärjestelmien muutoksia, sähköautoista saatavilla olevaa tehoa ja energiamäärää aggregoinnilla tai ilman sekä käydään läpi eri sähkömarkkinakohteet, joihin sähköautoilla voisi osallistua. Luvussa sivutaan myös muita sovelluskohteita sähköautoille energiavarastoina, jotka eivät liity suoraan sähkömarkkinoihin.

Työssä päästiin siihen tulokseen, että kaikki esitetyt tapaukset ovat toteutettavissa jo nyt tai tulevaisuudessa. Tällä hetkellä mahdolliset kohteet eivät kuitenkaan ole vielä taloudellisesti kannattavia, vaan vaativat sähköautojen ja muun tarvittavan laitteiston hintojen laskua. Tulevaisuudessa sähköautojen yleistyessä sähköautot voivat olla merkittävässä osassa esimerkiksi reservimarkkinoilla, mutta haasteena tälle ovat infrastruktuurin vajavaisuus sekä luotettavan tiedonsiirron toteuttaminen.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	SÄHKÖAUTOT .....	2
2.1	Sähköautotyypit.....	2
2.2	Sähköautojen suosio.....	2
2.3	Sähköautojen akut .....	5
2.3.1	Akkujen ominaisuudet .....	5
2.3.2	Akkutyypit .....	6
2.4	Lataustekniikat .....	6
3.	SÄHKÖMARKKINAT .....	8
3.1	Sähköntuotanto.....	8
3.2	Sähkökauppa .....	9
3.3	Reservimarkkinat .....	10
4.	SÄHKÖAUTO ÄLYKKÄÄSSÄ SÄHKÖVERKOSSA.....	11
4.1	Älykkäät sähköverkot.....	11
4.2	Sähköauto dynaamisena kuormana .....	11
4.3	Vehicle-to-grid .....	12
4.4	Käytettävissä oleva teho ja energia .....	13
4.5	SPOT-markkinoihin osallistuminen.....	13
4.6	Aggregointi.....	14
4.7	Sähköauto reservimarkkinoilla.....	15
4.7.1	Taajuuden vakautusreserveihin osallistuminen .....	15
4.7.2	Taajuuden palautusreserveihin osallistuminen .....	16
4.8	Muita sovelluskohteita .....	17
4.8.1	Kulutushuippujen tasaus .....	17
4.8.2	Sähköauto varavoimalähteenä.....	17
4.9	Vaikutukset akkuun.....	18
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	19
	LÄHTEET.....	20

# 1. JOHDANTO

Sähköautot ovat olleet mukana autojen kehityksessä alkumetreiltä lähtien. Tietävästi ensimmäisen pienen lelun kokoisen sähköauton valmisti unkarilainen Ányos Jedlik jo vuonna 1828. Ensimmäisen tiekäyttöön soveltuvan sähköauton, joka käytti vielä paristoja, kehitti brittiläinen Robert Davidson 1870-luvulla ja jo seuraavalla vuosikymmenellä sähköautoissa siirryttiin akkuihin. Ensimmäinen kaupallisesti menestynyt sähköauto valmistettiin 1893, mistä alkoi kova kilpailu tehdä autoista yhä nopeampia. Sähköautojen silloisen kehityksen huippu saavutettiin 1900-luvun alussa, jolloin Yhdysvaltojen autokannasta 38% oli sähköautoja. Muut autotyypit toimivat höyryllä tai polttomoottorilla. Jokaisella autolla oli hyvät ja huonot puolensa. Sähköautot olivat hiljaisia ja helppokäyttöisiä, mutta kalliita, sekä toimintamatka oli liian lyhyt. Höyryautot olivat tehokkaita ja luotettavia, mutta kärsivät pitkästä käynnistysajasta sekä lyhyestä ajomatkasta veden lisäämisten välillä. Polttomoottoriautot olivat vaikeita käyttää, epäluotettavia, äänekkäitä ja erityisesti vaarallisia käynnistää. Tähän tuli kuitenkin muutos, kun sähkömoottoria keksittiin käyttää polttomoottorin käynnistämiseen. Sen lisäksi polttomoottorien kehittyminen luotettavimmiksi ja uusien öljyesiintymien löytäminen ajoivat polttomoottorin hallitsevaksi ja käytännössä ainoaksi käyttövoimatavaksi vuosikymmeniksi eteenpäin. [1]

Sähköauto palasivat olennaiseksi vaihtoehdoksi, kun autojen ympäristövaikutukset ja ilmastomuutoskeskustelu nousivat suurempaan suosioon. Nykyään sähköautojen suosio kulkee käsikädessä akkuteknologian kehityksen kanssa, mikä on kiihtynyt huomattavasti viime vuosina. Sähköautojen lisääntyminen on herättänyt kysymyksiä sähköntuotannon riittävydestä sekä jakeluverkkojen kestävydestä. Sähköautojen suuri lukumäärä tuo kuitenkin mukanaan myös mahdollisuuksia. Työn tavoitteena on selvittää yhtä mahdollisuutta, miten suurta määrää sähköautoja voidaan käyttää hyödyksi sähkömarkkinoilla.

Luvussa kaksi käsitellään työn kannalta olennaisten sähköautojen perusominaisuuksia, sähköautoissa käytettyjä akkuja ja sähköautojen suosiota. Luvussa kaksi avataan sähkömarkkinoita Suomessa sekä Pohjoismaissa. Luvussa kolme selvitetään sähköauton toimimista osana älykästä sähköverkkoa, mihin kuuluvat osiot sähköauton kytkemisestä osaksi sähköverkkoa sekä sähköauton toimiminen sähkömarkkinoilla. Viimeisenä lukuna on yhteenveto.

## 2. SÄHKÖAUTOT

### 2.1 Sähköautotyypit

Sähköautoiksi luetaan autot, jotka toimivat kokonaan tai osittain yhdellä tai useammalla sähkömoottorilla. Sähkömoottorin käyttöön tarvittava energia saadaan joko autossa olevasta akusta tai tuotetaan polttokennoilla. Näiden ominaisuuksien perusteella sähköautot jaetaan täyssähköautoihin (EV), hybridautoihin (HEV) ja ladattaviin hybridautoihin (PHEV). Tämän työn kannalta olennaiset sähköautotyypit ovat akkuja käyttävät autot, joita ladataan sähköverkosta otettavalla energialla. Edellä mainituista tyypeistä normaalit hybridautot (HEV) jäävät tarkastelun ulkopuolelle, sillä niitä ei voi ladata ulkoisesta energialähteestä.

Täyssähköautoissa ainoana voimanlähteenä toimii sähkömoottori, joita voi olla yksi tai useampi autosta riippuen. Sähkömoottorin tarvitsema energia saadaan kokonaan auton akusta, jota ladataan sähköverkosta saatavalla energialla sekä auton omalla generaattorilla, joka kerää energiaa talteen jarruttaessa. Suomessa akkujen koot ovat autojen hintatason mukaan noin 30–100 kWh, mikä tarkoittaa toimintamatkoina noin 200–500 km [2]. Täyssähköautojen hyviä puolia ovat kevyt verotus, vähäisempi huollon tarve kuin polttomoottoreilla sekä päästöttömyys. Haittapuolet täyssähköautoille ovat kallis hinta, latauspisteiden vähäisyys, pitkä latausaika sekä suhteellisen lyhyt toimintamatka. Suomessa kaksi yleisintä täyssähköautomallia ovat kalliin hintatason Tesla Model S ja keskihintainen Nissan Leaf [3].

Ladattavissa hybridautoissa on sekä sähkömoottori että polttomoottori, joka voi olla tyyppiltään diesel- tai bensiinimoottori. Täyssähköautoihin verrattuna ladattavien hybridautojen akut ovat pienempiä, ja pelkällä sähkömoottorilla ajettaessa toimintamatkat ovat noin 20 – 50 km. Hybridautot jaetaan voimansiirtojärjestelmän mukaan kolmeen luokkaan: sarjahybrideihin, rinnakkaishybrideihin ja rinnakkaissarjahybrideihin. Sarjahybrideissä autoa liikuttaa pelkästään sähkömoottori ja polttomoottorin ainoa tehtävä on toimia generaattorina sähkömoottorille. Rinnakkaishybridissä molemmat sähkö- sekä polttomoottori tuottavat energiaa vetoakselille. Rinnakkaissarjahybridit ovat kahden edellä mainitun yhdistelmä. [4]

### 2.2 Sähköautojen suosio

Vuonna 2009 tehdyssä selvityksessä on ennustettu sähköautojen yleistymistä Suomessa kolmella eri skenaariolla: perusskenaariolla, nopealla skenaariolla ja hitaalla skenaariolla. Ennusteet perustuvat kustannusanalyysiin, joissa vertaillaan koko auton käyttöä kat-

tavia kokonaiskustannuksia eli hankinta- ja polttoainekustannuksia. Lähtötilanteessa sähköautojen määrä oli käytännössä nolla. Yhteenveto eri skenaarioiden mukaisista ennusteista on esitetty taulukossa 1. [4]

*Taulukko 1: Yhteenveto eri skenaarioista [4]*

	Vuosi	Osuus uusista autoista		Kumulatiivinen myyntimäärä (kpl)	
		PHEV	EV	PHEV	EV
<b>Perusskenaario</b>	<b>2020</b>	10 %	3 %	66 000	13 000
	<b>2030</b>	50 %	20 %	480 000	160 000
<b>Nopea skenaario</b>	<b>2020</b>	40 %	6 %	190 000	26 000
	<b>2030</b>	60 %	40 %	960 000	450 000
<b>Hidas skenaario</b>	<b>2020</b>	5 %	2 %	38 000	12 000
	<b>2030</b>	20 %	10 %	207 000	92 000

Taulukossa 2 on esitetty uusien täyssähköautojen ja ladattavien hybridi-autojen osuudet Suomessa vuosina 2015 – 2017. Taulukosta huomataan, että ladattavien hybridi-autojen osuus ensirekisteröidyistä autoista on vähintään kaksinkertaistunut vuosittain. Täyssähköautojen ensirekisteröinnit hieman vähenivät vuonna 2016 vuoteen 2015 verrattuna, mikä johtuu siitä, että kyseisinä vuosina Teslan luksusautomallit olivat ylivoimaisesti suosituimpia täyssähköautoja, eikä halvemman hintatason autot olleet vielä yleistyneet. Vuonna 2017 kohtuullisemman hintaluokan täyssähköautot alkoivat yleistyä, mikä näkyy uusien autojen osuuden kaksinkertaistumisena. Mikäli sama kasvunopeus säilyy, tulee ladattavien hybridi-autojen osuus ensirekisteröidyistä autoista olemaan vuonna 2020 noin 20 % ja täyssähköautojen osuus noin 3 %. Näiden tietojen perusteella voidaan olettaa ainakin perusskenaarioiden toteutuvan vuoteen 2020 mennessä.

Taulukko 2: Uusien sähköautojen osuudet vuosittain Suomessa [5]

Vuosi	Ensirekisteröityjen autojen lukumäärä (kpl)		Osuus ensirekisteröidyistä autoista	
	PHEV	EV	PHEV	EV
2015	414	243	0,3 %	0,2 %
2016	1 207	223	1 %	0,2 %
2017 (30.9. asti)	1 895	391	2,1 %	0,4 %

Sähköautojen kehittämiseen johtaneita asioita on useita. Nykyinen tieliikenne pohjautuu lähes kokonaan öljyn kulutukseen. Tämän hetkiselällä kehityksellä öljyn tarve kasvaa samalla kun öljyvarannot pienenevät, minkä takia olisi kannattavaa siirtyä öljystä riippumattomiin kuljetusmuotoihin. Sähköautot ovat öljystä riippumattomia sillä edellytyksellä, että sähköautoa ei ladata öljyllä tuotetulla energialla. Toinen merkittävä syy on ilmastomuutoksen hidastaminen. Hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin (IPCC) mukaan kasvihuonekaasupäästöjen pitää vähentyä noin puoleen vuosien 2010 ja 2050 välillä ja poistua kokonaan vuoteen 2100 mennessä, jotta keskimääräinen lämpötilan nousu pysyy alle kahdessa prosentissa. Tämän saavuttamiseksi EU on asettanut tavoitteet keskimääräisille päästöille. [6]

Sähköautojen käytön aikaiset päästöt riippuvat suoraan niiden tuotantomuotojen päästöistä, joilla tarvittava sähköenergia tuotetaan. Tämän lisäksi päästöihin pitää huomioida auton valmistuksen tuottamat päästöt, jotka karkeiden analyysien mukaan ovat suuremmat sähköautoilla kuin polttomoottoriautoilla. Mikäli sähköautot ladataan puhtaasti tuotetulla energialla sekä akut valmistetaan käyttämällä puhdasta energiaa, voivat sähköautot vähentää kasvihuonepäästöjä merkittävästi. Kolmantena syynä on päästöjen aiheuttama huono ilmanlaatu, joka on todellinen ongelma erityisesti Kiinassa, joskin autojen päästöt ovat vain pieni osa Kiinan saasteongelmista. [6]

Ympäristövaikutusten lisäksi sähköautojen suosiota yritetään kasvattaa monilla eri tavoilla, kuten verohelpoituksilla, ilmaisella pysäköinnillä ja sallimalla bussikaistojen käyttöä [6]. On kuitenkin odotettavissa, että edellä mainitut kannusteet eivät tule pysymään voimassa, jos sähköautot saavuttavat tarpeeksi suuren suosion.

Merkittävimmät sähköautojen yleistymistä hidastavat tekijät ovat hinta sekä latausverkon puutteet. Sähköautojen ja polttomoottoriautojen hintaeron muodostavat pääosin akut, joita käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa. Latausverkolle on kehittyneissä maissa

olemassa hyvä pohja, erityisesti pohjoismaissa, joissa on mahdollista hyödyntää jo olemassa olevia lämmityspistokkeita auton lataamiseen. EU on myös asettanut tavoitteet latauspaikkojen lisäämiselle. [6]

## 2.3 Sähköautojen akut

### 2.3.1 Akkujen ominaisuudet

Akkuja voidaan vertailla tiettyjen perusominaisuuksien perusteella. Kunkin ominaisuuden tärkeys vaihtelee riippuen akun käyttötarkoituksesta. Sähköautoissa käytetyille akuille tärkeimmät huomioitavat ominaisuudet ovat teho- ja energiatiheys, hinta, elinikä, hyötysuhde, jännitetaso sekä virrananto ja -ottokyky. [7]

Tehotiheys määrittelee, kuinka suurella teholla akkua voidaan purkaa ja energiatiheys määrittelee, kuinka paljon akulla on kapasiteettia, joka yleensä ilmoitetaan wattitunteina. Kummatkin tiheydet voidaan ilmoittaa suhteessa painoon tai tilavuuteen, koska molemmat merkitsevät paljon sähköauton suunnittelussa [8]. Teho- ja energiatiheydet riippuvat akun rakenteesta siten, että toisen kasvattaminen pienentää toisen arvoa, joten akun voi joko teho-optimoida tai energia-optimoida [7]. Optimoinneissa pitää aina huomioida molemmat suureet, koska pelkästään suuri energiakapasiteetti on sähköautoissa hyödytön, jos akusta ei saada riittävää tehoa sähkömoottorille. Hybridiautojen akuissa suositaan suurempaa tehotiheyttä, sillä teho-optimoitu akku on nopeampi ladata ja purkaa, eikä akun varauksen tarvitse riittää satojen kilometrien ajoa. Täyssähköautojen akut ovat taas energia-optimoituja, jotta saavutetaan mahdollisimman pitkä toimintamatkia. Haittapuolena energia-optimoidussa akussa on pitkä latausaika, jonka pienentäminen on haastavaa vaarantamatta akun elinikää. [4]

Akkujen valmistuskustannukset ovat tällä hetkellä yhtenä suurena sähköautojen yleisty- mistä hidastavana tekijänä. Akkujen kysynnän kasvu muuallakin kuin sähköautoteolli- suudessa on lisännyt investointeja akkutekniikan kehittämiseen, joten valmistuskustan- nusten voidaan olettaa laskevan tulevaisuudessa merkittävästi [8].

Akun elinikään kuuluvat kalenteri-ikä sekä syklikesto. Kalenteri-ikä kertoo, kuinka kauan akku säilyy käyttökelpoisena, riippumatta siitä käytetäänkö akkua vai ei. Syklikesto ker- too, kuinka monta kertaa akku voidaan ladata ja purkaa. Sähköautojen akuille molemmat ovat tärkeitä, sillä akkua ladataan normaalikäytössä päivittäin, eikä akkuja ole kannatta- vaa uusia vuosittain. [7]

Akun hyötysuhteella ilmoitetaan, kuinka suuri osa akun lataamiseen käytetystä energiasta saadaan käyttöön akkua purkaessa. Sisäisen resistanssin takia akku ladataan hieman kor- keammalla jännitteellä kuin se puretaan, mikä vaikuttaa hyötysuhteeseen. Akussa tapah- tuu myös akkutyypistä riippuen enemmän tai vähemmän sivureaktioita, jotka kuluttavat akun varausta. [7]



Jännitetaso ja virranantokyky liittyvät molemmat akun kykyyn antaa tehoa. Tehon yhtälön  $P=UI$  mukaisesti akun tehoa voi nostaa joko kasvattamalla jännitettä tai virtaa. Virran kasvattamisen haittapuolena on kuitenkin tehohäviöiden kasvaminen neliöllisesti virran kasvaessa, jonka takia jännitteen nostaminen on akun kannalta suotuisampaa. Virranotto-kyky kuvaa kuinka suurella teholla akkua voi ladata. [8]

Muita huomioitavia ominaisuuksia ovat turvallisuus, toimintalämpötilan minimi- ja maksimi-arvot sekä ympäristövaikutukset. [7]

### 2.3.2 Akkutyypit

Sähköautoissa käytettyjä akkutyyppejä ovat lyijyakku, nikkelikadmiumakku, nikkelimetallihydridiakku ja eri litiumioniakut. Nykyään sähköautojen akut ovat suurimmaksi osaksi litiumioni-tekniikkaan perustuvia akkuja, joskin hybridautoissa on vielä käytössä nikkeli-metallihydridi akkuja [8].

Litiumioni-akkujen suosio perustuu niiden korkeaan energia- ja tehotiheyteen, hyvään syklikeston, korkeaan hyötysuhteeseen ja hyvään virranotto-kykyyn. Litiumioni-akuissa käytetyt elektrodit vaihtelevat sen mukaan, mitä ominaisuuksia akulta halutaan. [7]

Nikkeli-metallihydridi akut ovat turvallisia ja luotettavia, mutta energiatiheydessä päästään vain noin puoleen litiumioni-akkujen energiatiheydestä. Myös hyötysuhde on heikko, mikä näkyy lämpötilan nousuna akkua purkaessa ja ladattaessa. Muutkaan akkutyypit eivät pääse lähelle litiumioniakkujen energiatiheyttä. [7]

## 2.4 Lataustekniikat

Sähköautoja ladataan useilla eri tekniikoilla. Pääosin lataukseen käytetään erilaisia latausjohtoja, mutta tulevaisuudessa myös induktiivinen lataus voi yleistyä. Latauspisteet voidaan jakaa julkisiin, puolijulkisiin sekä kotilataukseen. Lataustehot vaihtelevat riippuen latauspisteestä. Pienimmillään latausteho on ladattaessa autoa yksivaiheisella verkko-irralla, jolloin akkua ladataan enimmillään noin 3 kW:n teholla. Tällä hetkellä suurin latausteho henkilöautoille saavutetaan Teslan supercharger-aseilla, jotka lataavat maksimissaan noin 120 kW:n teholla. [9]

Lataustekniikat jaetaan myös AC- ja DC-lataukseen. Akku ladataan joka tapauksessa tasavirralla, joten AC- ja DC-latauksen erottaa tarvittavan tehoelektronikan paikka. DC-latauksessa tasasuuntaus tapahtuu latauspisteessä, jolloin auton ja latauspisteen tarvitsee kommunikoida jatkuvasti, jotta akkua ladataan oikealla teholla. DC-latausta käytetään julkisissa latauspisteissä ja suurella teholla ladattaessa. AC-latauksessa tehoelektronikka

sijaitsee auton sisällä. Latauspiste ilmoittaa autolle ainoastaan maksimivirran, jonka jälkeen auto on latauspisteen kannalta kuin mikä tahansa muukin kuorma. AC-latausta käytetään sekä julkisissa että yksityisissä latauspisteissä. [9]

Sähköauton lataustavat noudattavat standardia IEC 61851-1, joka jakaa lataamisen neljään eri tyyppiin. Lataustyyppi 1 on yksi, kaksi tai kolmivaiheinen AC-lataus enimmillään 16 A:n virralla. Tyyppiä 1 käytetään pienten sähköajoneuvojen lataukseen lyhyillä latausajoilla. Tyyppi 2 on sähköautoille tarkoitettu hitain lataustapa, jota on tarkoitus käyttää vain väliaikaisesti silloin kun parempaa lataustyyppiä ei ole käytettävissä. Käytännössä kaikki sähköautot myydään tyyppiin 2 latauskaapelin kanssa ja se käyttää enimmillään 32 A:n vaihtovirtaa. Myös lataustyyppi 3 käyttää vaihtovirtaa ja se on tarkoitettu käytettäväksi jokapäiväiseen sähköauton lataamiseen. Latauksen enimmäisvirta on noin kaksi kertaa suurempi tyyppiin 2 verrattuna. Kolmostyyppiin lataus tuo myös mahdollisuuden hallita verkosta otettavan virran suuruutta. Lataustyyppi 4 käyttää tasavirtaa, ja sillä voi saavuttaa teoreettisesti jopa 170 kW:n lataustehon, mutta käytännössä tehot ovat alhaisempia. Tyyppiin 4 latauspisteet ovat hyödyllisiä, kun auto halutaan ladata nopeasti täyteen. [6]

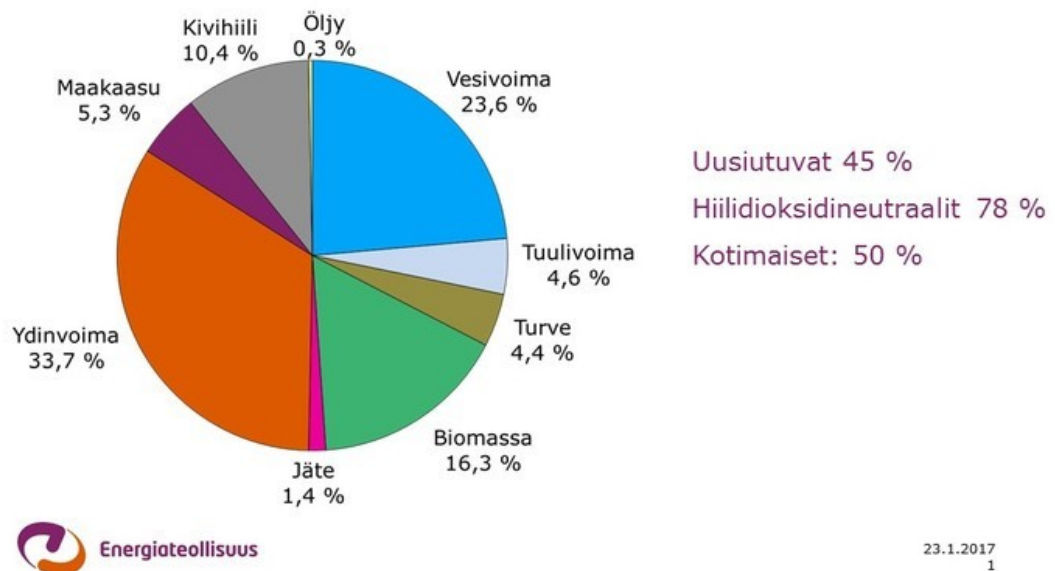
### 3. SÄHKÖMARKKINAT

Sähkömarkkinat koostuvat sähköverkkotoiminnasta sekä sähkön tuotannosta ja sähkökaupasta. Sähköverkkotoiminta jaetaan sähkönsiirtoon, jonka hoitaa Suomessa kantaverkkoyhtiö Fingrid, sekä sähkön jakeluun, josta huolehtii paikalliset hallitussa monopoliasemassa toimivat jakeluyhtiöt. Suomen sähkömarkkinain mukaan sähköverkkotoiminta pitää eriyttää tuotannosta ja kaupasta, millä pyritään varmistamaan terve kilpailu sähkökaupassa. Suomessa sähkömarkkinat avattiin kilpailulle porrastetusti vuodesta 1995 alkaen. [10]

#### 3.1 Sähköntuotanto

Suomessa sähköntuotanto on jakautunut hyvin monipuolisesti. Kuvasta 1 nähdään, että kaksi hallitsevaa tuotantomuotoa ovat ydinvoima sekä vesivoima. Vesivoiman osuus tuotannosta vaihtelee tuntuvasti kulloinkin vallitsevan vesitilanteen mukaan, mikä heijastuu myös fossiilisten polttoaineiden osuuteen koko tuotannosta. Tuulivoiman osuus on vielä tällä hetkellä pieni, mutta kasvaa jatkuvasti tekniikan nopean kehittymisen sekä vuonna 2011 asetetun syöttötariffin ansiosta. [11]

#### Sähköntuotanto energialähteittäin 2016 (66,1 TWh)



Kuva 1: Suomen sähköntuotanto energialähteittäin [11]

Sähkötuotannossa on tärkeää, että kulutus ja tuotanto vastaavat toisiaan, jotta sähköverkon taajuus pysyy sallittujen rajojen sisäpuolella. Kulutuksen vaihteluihin pitää pystyä vastaamaan säätämällä tuotannon määrää. Tämän takia tarvitaan säätövoimaa, joka tuotetaan pääosin vesivoimalla tai hankitaan muista pohjoismaista. Tulevaisuudessa säätötarpeen oletetaan kasvavan, kun säiden mukaan vaihtelevan tuotannon, eli tuuli- ja aurinkovoiman, osuus kasvaa, jonka seurauksena säädettävän tuotannon osuus pienenee. Säädettävän tuotannon määrää vähentää myös fossiilisia polttoaineita käyttävien tuotantomuotojen vähentäminen, eikä tämän hetken suurinta tuotantomuotoa, ydinvoimaa, käytetä säätövoiman tuottamiseen.

### 3.2 Sähkökauppa

Sähkökauppa muodostuu Suomessa tukkumarkkinoista ja vähittäismarkkinoista. Vähittäismarkkinat ovat sähkökauppaa vähittäismyyjien ja asiakkaiden välillä. Asiakkaat voivat vapaasti kilpailuttaa vähittäismyyjän tai ostaa sähkönsä kyseisen jakeluverkon osan markkinoita hallitsevalta vähittäismyyjältä. Hallitsevalla vähittäismyyjällä on toimitusvelvollisuus, mikä tarkoittaa, että asiakkaan halutessa hallitsevan vähittäismyyjän on toimitettava sähköä asiakkaalle ennalta määrättyyn kohtuulliseen hintaan. Pohjoismaissa vähittäismarkkinat ovat vielä kansallisia, mutta tavoitteena on siirtyä Pohjoismaat kattaviin yhtenäisiin vähittäismarkkinoihin. [10]

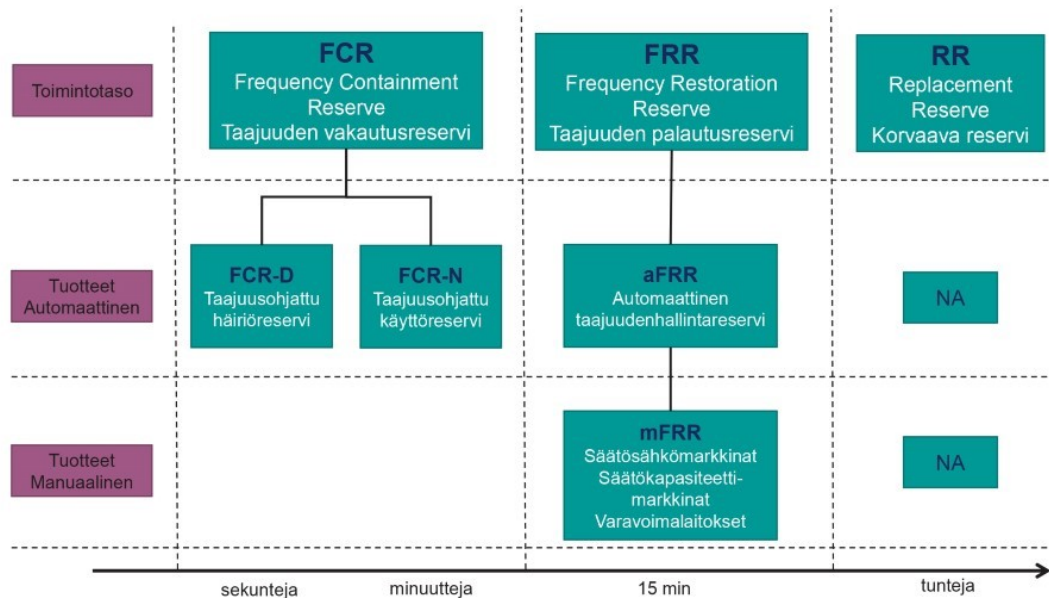
Vähittäismyyjät tuottavat sähköä itse tai hankkivat sen tukkumarkkinoilta. Tukkuurkinat ovat suurten toimijoiden välistä sähkökauppaa. Tukkuurmarkkinoilla kaupataan fyysisiä tuotteita, jotka voidaan ostaa Nord Poolin Spot-markkinoilta tai kahdenvälisellä kaupalla, sekä johdannaistuotteita, jotka eivät johda sähkön fyysiseen toimitukseen. Johdannaistuotteiden kaupanteko tapahtuu Nasdaq Commodities –finanssimarkkinoilla. [10]

Spot-markkinat ovat kaikille toimijoille tasavertaiset, sillä kaupanteko tapahtuu aina anonyymisti sekä markkinahinta muodostuu puhtaasti kysynnän ja tarjonnan mukaan. Spot-markkinat koostuvat elspot- ja elbas-markkinoista. Elspot-markkinoilla toimijat jättävät seuraavan päivän haluamilleen tunneille myynti- tai ostomäärän sekä hinnan, tietämättä muiden tarjouksista. Tarjouksien perusteella muodostetaan yhteinen markkinahinta jokaiselle tunnille. Tätä hintaa kutsutaan systeemihinnaksi. Systeemihinta on kaikille osapuolille sama, mutta siirtokapasiteettirajat voivat tulla vastaan, jolloin muodostuu erihintaisia hinta-alueita. Systeemihinnan muodostumisen jälkeen kauppaa voidaan käydä vielä tuntikohtaisesti elbas-markkinoilla, jotka toimivat elspot-markkinoiden jälkimarkkinana. [10]

Kahdenväliset kaupat eli OTC-markkinat ovat sähköpörssin ulkopuolista kaupankäyntiä joko suoran kahden kesken tai meklarin välityksellä. OTC-markkinat ja sähköpörssi täydentävät toisiaan, mikä takaa toimivan markkinamekanismin tukkumarkkinoille. [10]

### 3.3 Reservimarkkinat

Sähkötalouden mukana olevat sähköä toimittavat osapuolet pyrkivät suunnittelemaan sähkön hankinnan ja oman tuotannon vastaamaan kulutusta. Ennusteet eivät kuitenkaan ole täysin tarkkoja, joten sähkön toimittajalla pitää olla avoin toimittaja, joka huolehtii tasapainosta. Ylin avoin toimittaja Suomessa on Fingrid, joka hankkii säätöön tarvittavan sähkön ylläpitämiltään reservimarkkinoilta. Reserveilla on kolme toimintatasoa, jotka on esitelty kuvassa 2: taajuuden vakautusreservi, taajuuden palautusreservi ja korvaava reservi. Korvaava reservi ei ole käytössä Pohjoismaissa. [10]



Kuva 2: Eri reservityypit Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla [12]

Taajuuden vakautusreserviä käytetään taajuuden jatkuvaan hallintaan. Se koostuu taajuusohjatusta häiriöreservistä ja taajuusohjatusta käyttöreservistä. Käyttöreservin tehtävänä on pitää taajuus normaalialueella, joka on 49,9 – 50,1 Hz. Häiriöreservin tehtävänä on pitää taajuus vähintään 49,5 Hz:ssä, kun taajuus laskee normaalin taajuusalueen alapuolelle. Molemmat reservit toimivat automaattisesti. [12]

Taajuuden palautusreservin tehtävänä on palauttaa taajuus takaisin normaalialueelle, jotta vakautusreservit ovat käytettävissä jatkuva-aikaiseen säätöön. Palautusreservillä on automaattinen sekä manuaalinen osa. Automaattinen taajuudenhallintareservi otettiin Pohjoismaissa käyttöön vuonna 2013 ja sen tehtävänä on palauttaa taajuus nimellisarvoonsa. Palautusreservin manuaaliset tuotteet ovat säätösähkömarkkinat ja nopea häiriöreservi. Nopea häiriöreservi hoidetaan säätökapasiteettimarkkinoilla sekä varavoimailoilla, joita ei käytetä muuhun sähköntuotantoon. Nopeaa häiriöreserviä käytetään vain ylössäätöön, kun taas säätösähkömarkkinoille voi jättää ylös- sekä allassäätötarjouksia. [12]

## 4. SÄHKÖAUTO ÄLYKKÄÄSSÄ SÄHKÖVERKOSSA

### 4.1 Älykkäät sähköverkot

Älykkäillä sähköverkoilla viitataan tulevaisuuden sähköverkkoihin, joissa painottuvat muun muassa ympäristöystävällisyys, tuotannon ja kulutuksen joustavuus sekä tehokkuus. Älykkäät sähköverkot ovat määritelty eri tavoilla, eikä niissä oteta tarkasti kantaa, millä tavalla tavoitteisiin päästään. Eri määrittämisille yhteinen asia on tiedonhallintajärjestelmä, joka on investointikustannusten ohella suurin haaste älykkäisiin sähköverkkoihin siirtymisessä. Muu teknologia ja komponentit ovat jo pääosin olemassa.

Nykyinen sähkönjakeluverkon malli on hyvin suoraviivainen. Sähköä tuotetaan sen hetken kulutuksen mukaan ja sähköenergian kulkusuunta on aina asiakkaalle päin. Tulevaisuudessa merkittävien tuotantomuotojen, tuuli- ja aurinkovoiman, sovittaminen suoraviivaiseen malliin on kuitenkin haastavaa, eikä niiden täyttä potentiaalia voida hyödyntää. Tämän takia tulevaisuuden sähköverkon pitää olla joustava tuotannon suhteen. Joustavaan tuotantoon päästään kulutuksen jouston ohella hyödyntämällä energiavarastoja.

### 4.2 Sähköauto dynaamisena kuormana

Normaalissa lataustilanteessa sähköauton lataaminen alkaa heti kun auto kytketään verkkoon, ja lataus loppuu akun saavuttaessa täyden varaustilan. Tätä kutsutaan passiiviseksi lataukseksi. Passiivisen latauksen lisäksi sähköautoja voidaan käyttää myös hallittavina eli dynaamisina kuormina pelkästään yhdensuuntaista latausta hyödyntäen. Jos sähköautolla osallistutaan reservimarkkinoille, passiiviseen lataukseen verrattuna dynaaminen lataus vaatii autokohtaisen energiamittauksen, taajuuden mittaamiseen tarvittavan laitteiston sekä kommunikaatiorajapinnan tarvittavien signaalien lähettämiseen. Sähköautoa voidaan ladata dynaamisesti myös ilman autokohtaista energian mittausta ja taajuuden mittausta, jolloin autoa ladataan esimerkiksi sähkön hinnan perusteella. [13]

Dynaamisena kuormana olemisen voi toteuttaa joko kytkemällä latausta päälle ja pois päältä tai säätämällä lataustehoa. Latausta hallitessa pitää ottaa huomioon, että laturi ei välttämättä palaudu äkillisistä jännitekatkoista, mikä on mahdollista joissakin tyyppin 2 latureissa. [14] Olemalla dynaamisena kuormana, sähköauto voi tarjota alassäätöä lisäämällä lataustehoa ja ylössäätöä vähentämällä lataustehoa. Tämä antaa mahdollisuuden osallistua reservimarkkinoille osittain samoilla edellytyksillä kuin kahdensuuntaista latausta käyttävä auto. Erona on, että ylössäätöä voi tarjota vain silloin, kun auto on ylössäätötarpeen hetkellä lataustilassa. Reservimarkkinoiden lisäksi dynaamisella latauksella

voi tasata kulutushuippuja. Molemmista edellä mainituista sovelluskohteista kerrotaan lisää myöhemmissä luvuissa.

### 4.3 Vehicle-to-grid

Vehicle-to-Gridillä (V2G) tarkoitetaan kontrolloitua kahdensuuntaista tehonsiirtoa ladattavan sähköauton ja sähköverkon välillä, missä sähköautoa ladattaessa energia kulkee sähköverkosta autoon ja tarvittaessa sähköautoon ladattu energia voidaan purkaa takaisin verkkoon. Muita samankaltaisia sovelluskohteita on siirtää energiaa sähköautosta kotiin (V2H), rakennukseen (V2B) tai muuhun infrastruktuuriin (V2X) [15]. V2G:llä nähdään olevan suuri potentiaali, sillä eri tutkimusten mukaan autot ovat käyttämättöminä 70–95 % päivästä. Tämä osoittaa, että V2G:stä on mahdollista saada suurta hyötyä vaarantamatta autojen ensisijaista käyttötarkoitusta, liikkumista.

Jotta V2G on mahdollinen, tarvitsee nykyistä latausinfrastruktuuria muuttaa sekä fyysisestä että tiedonsiirron näkökulmasta. Luvussa 4.2 esiteltyjen muutosten lisäksi yksi fyysinen muutos on laturin muuttaminen kahdensuuntaiseksi. Luvussa 2 mainitun tasasuuntaajan lisäksi autossa tai latauspisteessä sijaitsevan laturin pitää pystyä myös vaihtosuuntaamaan akusta saatava virta. Tätä toteuttaessa pitää ottaa huomioon tarvittavat suojaukset. Ylivirta sekä yli- ja alijännitesuojauksien lisäksi uutena suojauksena on loss-of-mains-suojaus (LOM). LOM-suojauksella tarkoitetaan suojausta sille, ettei sähköauto syötä sähköverkkoa verkon vika- tai huoltotilanteissa, jolloin verkon pitäisi olla jännitteetön. [13]

Sähköautot eivät voi syöttää sähköä vapaasti sähköverkkoon, vaan ne tarvitsevat hallinta- ja kommunikaatiojärjestelmän. Hallintajärjestelmä voi olla joko auto- tai latauspistekohmainen, tai yksi toimija voi hallita montaa autoa. Auto tai latauspiste tarvitsee kahdensuuntaisen energiamittauksen laskutusta varten. Sen lisäksi tarvitaan laitteisto taajuuden mittaamiseen. Latausta ja purkamista hallitsevan tahon pitää myös olla tietoinen hetkittäisestä sähkön hinnasta, akun varaustilasta ja mahdollisesti kaikkien käytettävissä olevien autojen kokonaisenergiasta. Suomessa käytettävät AMR-mittarit eivät sovellu nopeaan ohjaukseen sellaisenaan, vaan vaativat vähintäänkin ohjelmistopäivityksiä. [18]

#### 4.4 Käytettävissä oleva teho ja energia

Kaikkia V2G-sovelluksia varten on tiedettävä, kuinka paljon yksittäisellä sähköautolla on energiaa V2G:n käyttöön. Käytettävissä oleva energia saadaan arvioitua akun hetkittäisen varaustilan (SoC, state of charge) ja minimivaraustilan erotuksella. Tutkimuksen mukaan optimaalisin ratkaisu käyttäjän ja V2G:n kannalta on laskea jokaiselle autolle oma minimivaraustila, perustuen auton päivittäiseen käyttöön [16]. Tällöin jokaisesta autosta saadaan käyttöön mahdollisimman paljon energiaa niin, että auto on toimintavalmiudessa silloin kun sitä tarvitaan.

Autosta riippuen sähköautojen akkujen koot vaihtelevat, jolloin myös auton energiakapasiteetti vaihtelee. Akusta saatavaa tehoa rajoittaa akun maksimitehon lisäksi johtimien maksimivirrat sekä tehoelektroniikan maksimitehot [17]. Yksittäisissä latauspaikoissa rajoittava teho on yleensä tehoelektroniikan maksimiteho, mutta jos latauspistokkeita on useampia, saattaa myös liittymän sulakekoko rajoittaa tehoa. 16 A:n sulakkeella yksivaiheinen latausteho on enimmillään noin 3,5 kW ja kolmivaiheinen lataus teho noin 10 kW. Luvussa 2 esitettyjen ennustusten mukaan ladattavat hybridiautot tulevat olemaan suosituimpia sähköautoja, joiden lukumäärä Suomessa vuonna 2030 olisi perusskenaarion mukaan noin 500 000 kpl. Jos yhdestä autosta olisi käytössä keskimäärin 7 kWh energiaa 3,5 kW:n teholla ja puolet autoista olisi kiinni verkossa, käytössä olisi 1,75 GWh energiaa 875 MW:n teholla. Jos yhdestä saadaan käyttöön 10 kW tehoa, jo 10 000 autoa riittäisi tuottamaan 100 MW:n tehon.

#### 4.5 SPOT-markkinoihin osallistuminen

Spot-markkinoille osallistuminen on helpoin tapa osallistua sähkömarkkinoille sähköauton kanssa. Suomessa jo käytössä olevat AMR-mittarit mahdollistavat osallistumisen elspot-markkinoille. Sähköauton latausta voisi ohjata joko AMR-mittarin omalla kuormanohjausreleellä tai erillisellä automaattisesti kuormaa ohjaavalla laitteella.

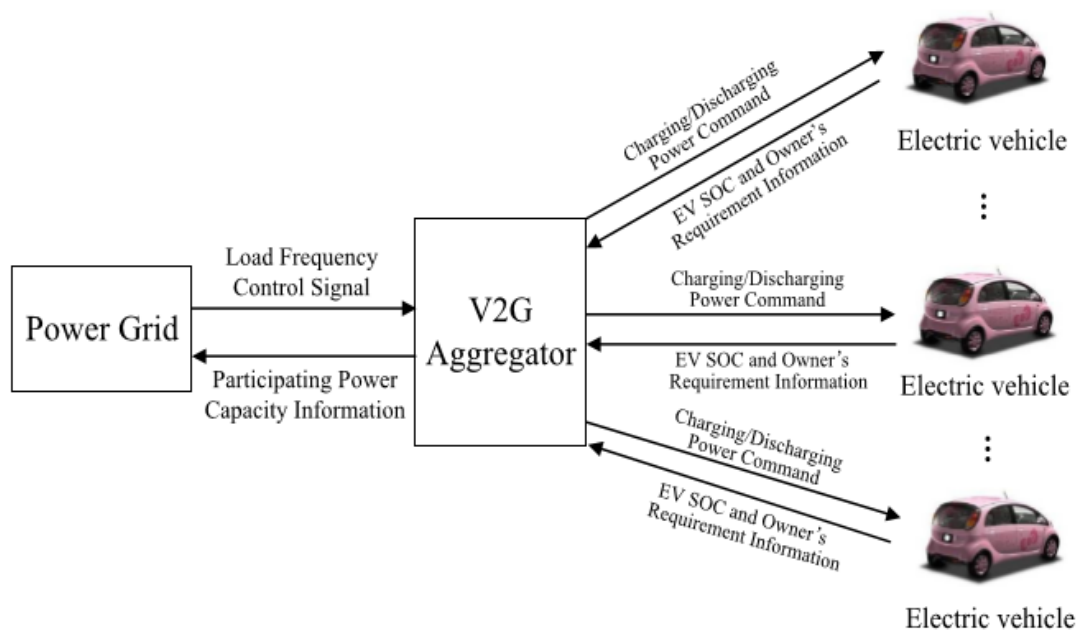
Käytännössä spot-markkinoille osallistuminen tarkoittaa sitä, että autoa ladataan sähkön hinnan ollessa alhaalla, ja autosta myydään sähköä hinnan ollessa korkealla. Molempia ei kuitenkaan tarvitse tehdä, vaan jo pelkkä sähkön hintaan perustuva lataaminenkin riittää, josta mainittiin luvussa 4.2. Eri tutkimusten mukaan tuotto, joka saadaan sähkön myynnistä spot-markkinoille, on kuitenkin niin pientä, että pelkästään spot-markkinoille osallistumisen takia ei ole tällä hetkellä kannattavaa siirtyä V2G-teknologiaan. Tulevaisuudessa akkujen hintojen ja sitä kautta sähköautojen hintojen laskeminen tekee osallistumisesta kannattavampaa. Toisaalta pitää huomioida, että usean auton osallistuessa spot-markkinoille, on todennäköistä, että myös sähkön hinnan vaihtelu vuorokauden sisällä



pienenee, jolloin mahdollinen tuotto pienenee. Tämä vaatisi kuitenkin huomattavan paljon spot-markkinoille osallistuvia autoja. [17, 19]

## 4.6 Aggregointi

Kuten aiemmin todettiin, yhdestä autosta saatava teho on enimmillään joitakin kymmeniä kilowatteja, eivätkä energiamääräkään ole suuria. Esimerkiksi reservimarkkinoille osallistuminen vaatii vähintään 100 kW:n tehon, joten yksittäisiä sähköautoja on yhdistettävä suuremmaksi kokonaisuudeksi vaadittujen teho- ja energiamäärien saavuttamiseksi. Järjestelmävastaava ei luultavasti halua tehdä sopimuksia satojen tai tuhansien autojen kanssa, joten todennäköisempää on, että autojen yhdistäminen sähköverkkoon hoidetaan aggregaattorin kautta. Aggregaattori toimii hallintakeskuksena, joka hoitaa jokaisen hallinnan alla olevan sähköauton lataamista ja purkamista, sekä osallistuu sähkömarkkinoille tai muihin V2G-sovelluskohteisiin [16]. Kuvassa 2 on esitetty aggregoinnin rakenne.



Kuva 3: Rakenne aggregaattorin osallistumisesta reservimarkkinoille [16]

Aggregoinnille on olemassa erilaisia toimintamalleja, joista yksi on esitetty seuraavaksi. Jokainen sähköauto lähettää aggregaattorille tiedon akun varaustilasta sekä käyttäjän vaatimuksista. Käyttäjän vaatimukset ovat tietoa siitä, milloin auton pitää olla käyttövalmiina, mikä arvioidaan auton päivittäisen käytön perusteella. Auton käyttäjä voi myös valita, haluaako hän osallistua aggregointiin kyseisellä latauskerralla. Edellä mainittujen tietojen perusteella aggregaattori selvittää, mitkä autot ovat käytettävissä kullakin ajanhetkellä, ja laskee saatavilla olevan tehon sekä energian. [16]

Tarvittavien tehomäärien saavuttamisen lisäksi aggregointi yksinkertaistaa sähköautojen osallistumista sähkömarkkinoille. Järjestelmävastaavan näkökulmasta aggregoinnin takana olevat sähköautot näyttäytyvät kuin mikä tahansa muukin tuotantomuoto, joten aggregaattori voi osallistua tukipalvelumarkkinoille samoilla sopimuksilla.

Riskinä aggregoinnissa on luotettavuus. Vaikka tiedonsiirto- ja sähköntoimitusyhteydet oletettaisiin täysin luotettaviksi, ei aggregaattori voi estää yksittäistä käyttäjää irrottamasta autoa kesken sähköntoimituksen. Riskiä voi kuitenkin pienentää lisäämällä aggregointiin osallistuvien autojen määrää, tai pienentää järjestelmävastaavalle tarjottua tehoa. Tällöin mahdollinen kapasiteetti on suurempi kuin sovittu kapasiteetti, joten yksittäisten autojen irrottaminen ei vaikuta sähkön toimittamiseen. [16]

## 4.7 Sähköauto reservimarkkinoilla

Sähköautoista saatavan tehon vahvuudet ovat nopea käyttöönottoaika ja valmiustilassa pitämisen halpa hinta. Näiden ominaisuuksien takia sähköautot olisivat sopivia eri reservimarkkinoille. Suomessa reservimarkkinoille voi osallistua tekemällä sopimuksen Fingridin kanssa. Reservimarkkinoille voi tarjota kohteesta riippuen ylössäätöä, alassäätöä tai molempia yhtä aikaa. Alassäätö tarkoittaa käytännössä pelkästään auton lataamista. Ylössäätöä auto voi tehdä purkamalla energiaa verkkoon, tai jos auto on sillä hetkellä latauksessa, voi pelkästään latauksen keskeyttäminen olla riittävä ylössäätöön. [20]

### 4.7.1 Taajuuden vakautusreserveihin osallistuminen

Taajuuden vakautusreservit ovat luvussa 3 esiteltyt taajuusohjattu käyttöreservi sekä häiriöreservi. Taajuusohjattuun käyttöreserviin voi osallistua vähintään 0,1 MW:n tarjouksella. Kohteen tulee reagoida 0,1 Hz:n taajuusmuutokseen kolmessa minuutissa sekä kohteen on kyettävä suorittamaan jatkuva-aikaista ylös- sekä alassäätöä, jonka takia osallistuvan auton akun varaustila ei saa olla missään vaiheessa täynnä, vaan aina pitää olla mahdollisuus purkaa ja ladata akkua.

Taajuusohjatussa häiriöreserville vähimmäistarjous on 1 MW. Voimalaitosten tarjoamasta tehosta pitää aktivoitua puolet 5 sekunnissa ja koko teho on käytettävissä puolessa minuutissa. Relekytketyt resurssit voivat tarjota säätöä samalla toiminta-ajalla kuin voimalaitokset, tai vaihtoehtoisesti koko kohde irroitetaan verkosta välittömästi, kun taajuus on 5 sekunnin ajan pienempi tai yhtä suuri kuin 49,7 Hz, 3 sekunnin ajan pienempi tai yhtä suuri kuin 49,6 Hz tai sekunnin ajan pienempi tai yhtä suuri kuin 49,5 Hz. Taajuusohjattuun häiriöreserviin osallistuvalla autolla vaaditaan vain ylössäätöä, joten akku voi olla koko ajan täynnä. Auton pitää kyetä syöttämään tehoa verkkoon muutamassa sekunnissa, mutta säätöpyyntöjä tulee paljon harvemmin kuin käyttöreservissä.

Kummastakin edellä mainitusta reservituotteesta saa Fingridin markkinoilla korvausta pelkästä ylläpidetystä kapasiteetista, ja käyttöreservi maksaa korvausta myös nettoenergiasta [21]. Taajuuden vakautukseen osallistumisen kannattavuudesta on tehty useita arvioita. Kannattavuus riippuu pääosin markkinahinnasta, akun kulumisesta sekä tarjotusta teho- ja energiamäärästä. Kempton & Tomicin mukaan vuosittainen tuotto olisi noin 1700 \$, kun latausteho on 10 kW [17]. Toisen arvion mukaan vuosittainen tuotto 10 kW:n teholla olisi noin 2400–4000 \$ [22]. Nämä arviot riippuvat merkittävästi toteutusmaan sähkömarkkinoista ja käytetyistä sähköautoista, joten kannattavuus voi poiketa paljon edellä mainituista arvoista.

Suomessa velvoite taajuusohjatuille käyttöreserville on noin 140 MW ja taajuusohjatuille häiriöreserville 220–265 MW [12]. 10 kW:n latausteholla käyttöreservin velvoite voitaisiin täyttää kokonaisuudessaan jo 14 000 autolla ja häiriöreservi 26 500 autolla. Samoilla lataustehoilla minimitarjous täyttyy käyttöreserville jo kymmenellä autolla ja häiriöreserville sadalla autolla.

#### 4.7.2 Taajuuden palautusreserveihin osallistuminen

Säätösähkömarkkinoille voi osallistua kuka tahansa vaatimukset täyttävän kapasiteetin haltija. Osallistuminen tapahtuu jättämällä Fingridille viimeistä 45 minuuttia ennen käyttötunnin alkua tarjouksen, josta selviää tarjottavan tehon hinta ja määrä, minimimäärän ollessa 5 MW. Fingridillä pitää olla mahdollisuus tarjotun kohteen reaaliaikaiseen tehonmittaukseen, tarjottua tehoa pitää pystyä toimittamaan koko käyttötunnin ajan sekä kohteen on kyettävä toimittamaan sähköä 15 minuutin kuluessa Fingridin pyynnöstä. Tarjouksia voi jättää erikseen sekä ylössäätöön että alassäätöön. [12]

Säätösähkömarkkinat ovat saman kaltaisia spot-markkinoiden kanssa, kuitenkin sillä erotuksella, että säätösähkömarkkinoilla toinen osapuoli on aina järjestelmävastaava. Säätösähkömarkkinoilla myös hintataso on aina parempi kuin spot-hinta. Säätösähkömarkkinoilla korvausta maksetaan vain tapahtuneista toimituksista eli hyväksytyistä tarjouksista, eikä kapasiteetin ylläpitämisestä. Tämän takia vakautusreserveihin osallistuminen nähdään kannattavampana vaihtoehtona. [21]

Säätösähkömarkkinoiden rinnalla on nopea häiriöreservi. Nopeaa häiriöreserviä pitää olla noin 1000 MW, jonka fingrid hoitaa varavoimalaitoksilla sekä vuonna 2016 käyttöön otetuilla säätökapasiteettimarkkinoilla [12]. Sähköautoille olisi otollista osallistua juuri nopeaan häiriöreserviin, sillä korvausta maksetaan toimitetun energian lisäksi pelkästä kapasiteetista ja nopeaa häiriöreserviä aktivoidaan vain harvoin, joten vaikutukset akkuun ovat minimaaliset.

## 4.8 Muita sovelluskohteita

### 4.8.1 Kulutushuippujen tasaus

Kulutushuippujen tasaus on osittain sama asia kuin spot-markkinoille osallistuminen. Sähköauto ladataan muun kulutuksen ollessa vähäistä ja mahdollisesti puretaan takaisin verkkoon tai vähennetään lataamista kulutuksen ollessa suurta. Ero spot-markkinoihin on siinä, että spot-hinta ei aina vaihtele pelkän kulutuksen mukaan, vaan esimerkiksi poikkeama tuotannossa saattaa nostaa hintaa, vaikka valtakunnallinen kulutus ei olisi huippussa. Kuten aikaisemmin todettiin, mahdollinen tuotto on arvioitu niin pieneksi, ettei V2G-tekniikkaan kannata ainakaan vielä siirtyä pelkästään huipputehon tuotannon takia.

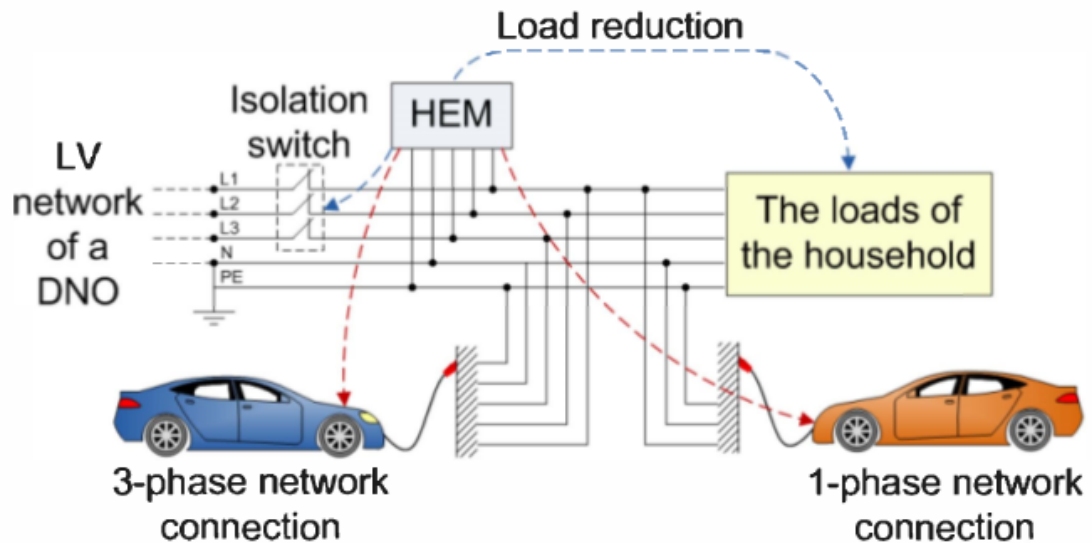
Valtakunnallisen huipputehon lisäksi on erikseen jakeluverkkoyhtiöitä koskevat alueelliset kulutushuiput. Sähkönsiirtoverkko on mitoitettu huipputehon mukaan, joten kulutushuippujen tasaamisella voidaan lykätä verkon vahvistusinvestointeja.

Kuluttaja voi kuitenkin osallistua huipputehon tasaukseen älykkäällä latauksella, ilman investointia V2G-laitteistoon. Suomessa on jo nyt yleistä alentaa huipputehoa esimerkiksi pitämällä sähkökiuasta ja lämminvesivaraajaa päällä eri aikoihin automaattisesti. Sama systeemi olisi helposti laajennettavissa sähköauton lataukseen. [14]

### 4.8.2 Sähköauto varavoimalähteenä

Yksi tapa hyödyntää V2G-tekniikkaa on sähköauton käyttäminen varavoimalähteenä. Suomessa sähkökatkot ovat vielä maaseudulla myrskyjen ja suurten lumikuormien takia yleisiä, ja pitkiäkin keskeytyksiä on koettu. Sähköautosta saisi sähköä esimerkiksi yhdelle kotitaloudelle sähkökatkon aikana. Akkujen koot ovat hyvin rajalliset, joten normaalikäytöllä sähköä ei riitä kovinkaan pitkäksi aikaa. Mutta jos sähkölaitteiden käyttö rajoitetaan esimerkiksi valaistukseen ja muuhun kevyeen kuorman, riittäisi akun kapasiteetti hyvin pitkäksi aikaa. [6]

Konsepti toteutukselle on esitetty kuvassa 4. Käytännön toteutus vaatii katkaisijan, jolla talon irroitetaan sähköverkosta, ettei sähköauto syötä virtaa verkkoon päin vikatilanteissa. Sen lisäksi talo tarvitsee hallintajärjestelmän, joka kontrolloi katkaisijaa sekä talon suuria kuormia siltä varalta, että autosta saatava teho ei riitä kattamaan koko kuormitusta. Auton voi kytkeä talon sähköverkkoon joko yksivaiheisesti tai kolmivaiheisesti. Auto tarvitsee myös samankaltaiset suojaukset kuin normaalilla sähkönsyötöllä on. Riippumatta siitä kytetäänkö varavoima päälle manuaalisesti vai automaattisesti, varsinkin pitkien sähkökatkojen aikana esitetty sovellus on hyödyllinen. [14]



Kuva 4: Sähköauto varavoimalähteenä yhdelle talolle [14]

## 4.9 Vaikutukset akkuun

Jokaisella akulla on luvussa 2 esitelty sykli-ikä. Kun sähköautoa käytetään ajamisen lisäksi sähkövarastona, tulee akulle ylimääräisiä lataus- ja purkaukset, jolloin sykli-ikä saavutetaan nopeammin. Sykli-ikä riippuu akkutyypistä. Muiden kuin litiumioniteknologiaan perustuvien akkujen sykli-ikä on niin matalia, ettei niitä ole kannattavaa käyttää V2G-sovelluksissa [23]. Sykli-ikään vaikuttaa myös se, kuinka paljon akkua puretaan kerralla (DoD, Depth of Discharge). Tutkimuksen mukaan akun sykli-ikä on ollut 3000 kun DoD on ollut 100 % ja 1 000 000 kun DoD on ollut 3 % [24]. Uudemman tutkimuksen mukaan taas DoD:n vaikutus sykli-ikään on paljon pienempi kuin aikaisemmin on tutkittu [25]. Näihin arvoihin vaikuttavat muun muassa akun suunnitteluratkaisut sekä akkukemiat.

Lisäsykli-ikä vaikutuksesta auton kokonaiskustannuksiin on tehty erilaisia arvioita, joiden tulos riippuu pääosin oletuksista, joita tilannetta tarkastellessa on tehty. Rautiainen esittää, että jos akun sykli-ikä on 3000 sykliä, tällöin suomalaisten keskivertoajamisella akun sykli-ikä tulisi täyteen noin 25 vuodessa. Nykypäivän litiumioniakkujen kalenteri-ikä on kuitenkin paljon alle 25 vuotta, joten sähköautojen akuissa on paljon käyttämätöntä kapasiteettia, jonka voisi hyödyntää V2G-käyttökohteisiin ilman lisäkustannuksia. [6] Bishopin et. al mukaan parhaimmassakin tapauksessa täyssähköauton akku joudutaan uusimaan kolmen vuoden välein auton osallistuessa reservimarkkinoille, ja vaihtoväli pienenee vuoteen, kun DoD ylittää 40 % [26].

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Kun sähköntuotannossa siirrytään suurella mittakaavalla ympäristöystävällisempien uusiutuvien tuotantomuotojen käyttöön, sähköverkosta pitää saada joustavampi. Joustavuutta saavutetaan jo pelkällä kysyntäjoustolla, jossa kulutusta säädetään vastaamaan tuotantoa, mutta täyteen potentiaaliin päästään sen lisäksi energiavarastoja hyödyntämällä. Energian eri varastointimahdollisuuksista sähköautojen yleistyminen tuo mukanaan yhden mahdollisuuden kuin itsestään.

Sähkömarkkinoilla energiavarastoina toimivat sähköautot soveltuvat hyvin reservimarkkinoille nopean valmiusajan sekä halpojen ylläpitokustannusten takia. Myös spot-markkinoille osallistuminen on mahdollista, mutta ei niin kannattavaa, koska suurimmat tuotot kuluttajalle tulevat tarjotusta kapasiteetista eikä niinkään sähkön toimituksesta. Sähköautoille on myös muita hyviä kohteita kuin suoraan sähkömarkkinoille osallistuminen, kuten mahdollisuus olla yhden tai useamman talon varavoimalähteenä.

Haasteena siirtymiselle on infrastruktuurin vajaavaisuus. Kaksisuuntaista latausta varten pitää sekä investoida laitteistoon, että kehittää tiedonsiirtostandardi, jotta autoja voi hallita luotettavasti. Tämä on hidasteena jokaisen osapuolen kannalta.

Viimekädessä kuitenkin sähköautojen omistajat päättävät sen, kuinka pitkälle sähköautojen akkujen hyödyntämisessä mennään. Älykäs lataus ja vehicle-to-grid -teknologia täytyy toteuttaa siten, että siitä on auton omistajalle tarpeeksi paljon hyötyä. Tämä tarkoittaa riittävää taloudellista hyötyä sen lisäksi, että auto on käyttövalmiina silloin kun sitä tarvitaan. Tällä hetkellä taloudellinen kannustin ei ole kovinkaan suuri, mutta akkujen hintojen laskiessa odotetaan jokaisen sovelluskohteen tuoton myös kasvavan. Myös eri sovellusten yhdistäminen yhdeksi kokonaisuudeksi kannustaa siirtymään sähköauton käyttöön energiavarastona. Esimerkiksi omakotitalon aurinkopaneelin tuottamaa sähköä voisi varastoida sähköautoon ja myydä verkkoon vasta silloin kun sähkön hinta on korkealla, ja tämän lisäksi sähköauto toimisi varavoimalähteenä sähkökatkojen varalta. Sähkön hinnoittelu on myös menossa yhä enemmän reaaliaikaiseen suuntaan, joten joustamaton sähkönkäyttäjät joutuneet maksamaan sähköstään enemmän, mikä kannustaa työssä esiteltyihin sovelluksiin siirtymistä.

## LÄHTEET

- [1] M. Guarnieri, Looking back to electric cars, 2012 Third IEEE HISToRY of ELeCtro-technology CONference (HISTELCON), IEEE, pp. 1–6. Saatavissa (viitattu 16.11.2017): <http://ieeexplore.ieee.org.libproxy.tut.fi/document/6487583/>
- [2] Vihreäkaista, Suomessa myytävät sähköautot ja ladattavat hybridit vuonna 2017, 2017, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.10.2017): <https://vihreakaista.fi/fi-fi/article/sahko/suomessa-myytavat-sahkoautot-2017/676/>
- [3] Trafi, Liikennekäytössä olevat sähköautot, 2017, verkkosivu, Saatavissa: (viitattu 24.10.2017) [https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan\\_kayttovoimatilastot/sahkokayttoiset\\_autot](https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot/sahkokayttoiset_autot)
- [4] Biomeri Oy, Sähköajoneuvot Suomessa -selvitys, Motiva, 2009. Saatavissa (viitattu 6.11.2017): [https://www.motiva.fi/files/2263/Sahkoajoneuvot\\_Suomessa\\_-\\_selvitys.pdf](https://www.motiva.fi/files/2263/Sahkoajoneuvot_Suomessa_-_selvitys.pdf)
- [5] Trafi, Ensirekisteröinnit käyttövoimatilastoittain, 2017, verkkosivu, Saatavissa: (viitattu 24.10.2017) [https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ensirekisteroinnit/ensirekisteroinnit\\_kayttovoimittain](https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ensirekisteroinnit/ensirekisteroinnit_kayttovoimittain).
- [6] A. Rautiainen, Aspects of Electric Vehicles and Demand Response in Electricity Grids, Tampere University of Technology, Vol. 1327, 2015. Saatavissa (viitattu 24.10.2017): [https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/aspects-of-electric-vehicles-and-demand-response-in-electricity-grids\(7e191756-3eb3-466b-956920219b6cf348\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/aspects-of-electric-vehicles-and-demand-response-in-electricity-grids(7e191756-3eb3-466b-956920219b6cf348).html)
- [7] K. Vuorilehto, Overview of Battery Technology, Tampere University of Technology, 2017, videoluento. Ei saatavissa (viitattu 19.11.2017)
- [8] J.J. Markkula, Sähköautojen latauspalvelut ja latausliiketoiminta, 2013, Diplomityö, Saatavissa (viitattu 6.11.2017): <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/21389>.
- [9] J. Markkula, EV Vharging Infrastructure and Services, Tampere University of Technology, 2017, videoluento. Ei saatavissa (viitattu 11.12.2017)
- [10] Jarmo Partanen et al., Sähkömarkkinat – opetusmoniste, 2016, Saatavissa (viitattu 6.11.2017): [http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/kurssit/Materiaalisivut/DEE\\_23030/S%C3%A4hk%C3%B6markkinat-opetusmoniste%202016.pdf](http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/kurssit/Materiaalisivut/DEE_23030/S%C3%A4hk%C3%B6markkinat-opetusmoniste%202016.pdf)
- [11] Energia.fi, Sähköntuotanto Suomessa, 2017, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 6.11.2017): [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto)

- [12] FINGRID, Reservit ja säätösähkö, 2017, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 13.12.2017): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservivelvoitteet-ja-hankintakanavat>
- [13] A. Rautiainen, C. Evens, S. Repo, P. Jarventausta, Requirements for an interface between a plug-in vehicle and an energy system, 2011 IEEE Trondheim PowerTech, pp. 1—8, Saatavissa (viitattu 12.12.2017): <http://ieeexplore.ieee.org.libproxy.tut.fi/stamp/stamp.jsp?arnumber=6019461>
- [14] A. Rautiainen, J. Markkula, S. Repo, A. Kulmala, P. Järventausta and K. Vuorilehto, "Plug-in vehicle ancillary services for a distribution network," 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, 2013, pp. 1—8, Saatavissa (viitattu 6.12.2012): <http://ieeexplore.ieee.org.libproxy.tut.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6521524&isnumber=6521505>
- [15] Shepard, Scott ja Gartner, John, Executive Summary: Vehicle to Grid Technologies V2G Applications for Demand Response, Frequency Regulation, Microgrids, Virtual Power Plants, and Renewable Energy Integration, 2013, Navigant Research, tutkimusraportti, Saatavissa (viitattu 30.11.2017): <http://www.navigantresearch.com/wp-content/uploads/2013/10/V2G-13-Executive-Summary.pdf>
- [16] C. Peng, J. Zou, L. Lian, L. Li, An optimal dispatching strategy for V2G aggregator participating in supplementary frequency regulation considering EV driving demand and aggregator's benefits, Applied Energy, Vol. 190, 2017, pp. 591—599, Saatavissa (viitattu 5.12.2017): <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tut.fi/science/article/pii/S030626191631830X>
- [17] W. Kempton, J. Tomić, Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue, Journal of Power Sources, Vol. 144, Iss. 1, 2005, pp. 268—279, Saatavissa (viitattu 24.10.2017): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305000352>.
- [18] Järventausta, Pertti et al. 2015. Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli), Tampereen teknillinen yliopisto, 2015, Saatavissa (viitattu 5.12.2017): [https://tutcris.tut.fi/portal/files/4777045/kysynnän\\_jousto\\_loppuraportin\\_tiiivistelma.pdf](https://tutcris.tut.fi/portal/files/4777045/kysynnän_jousto_loppuraportin_tiiivistelma.pdf)
- [19] Q. Cui, X. Bai, S. Zhu, B. Huang, Cost-benefit calculation and analysis of V2G system, 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), IEEE, pp. 1—5, Saatavissa (viitattu 13.12.2017): <http://ieeexplore.ieee.org.libproxy.tut.fi/document/7576284/>



- [20] M. Yilmaz, P.T. Krein, Review of the Impact of Vehicle-to-Grid Technologies on Distribution Systems and Utility Interfaces, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, Iss. 12, 2013, Saatavissa (viitattu 30.11.2017): 5673-5689. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6353961>.
- [21] Fingrid, Reservituotteet ja markkinapaikat, 2017, Saatavissa (viitattu 7.12.2017): <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet.pdf>.
- [22] C.D. White, K.M. Zhang, Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, Iss. 8, 2011, pp. 3972—3980. Saatavissa (viitattu 4.10.2017): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775310019142>.
- [23] Chengke Zhou, Kejun Qian, M. Allan, Wenjun Zhou, Modeling of the Cost of EV Battery Wear Due to V2G Application in Power Systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 26, Iss. 4, 2011, pp. 1041—1050. Saatavissa (viitattu 15.12.2017): <http://ieeexplore.ieee.org/document/5958591>.
- [24] J. Tomić, W. Kempton, Using fleets of electric-drive vehicles for grid support, *Journal of Power Sources*, Vol. 168, Iss. 2, 2007, pp. 459—468. Saatavissa (viitattu 15.12.2017): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775307005575>.
- [25] S.B. Peterson, J. Apt, J.F. Whitacre, Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, Iss. 8, 2010, pp. 2385—2392. Saatavissa (viitattu 16.12.2017): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775309017443>.
- [26] J.D.K. Bishop, C.J. Axon, D. Bonilla, M. Tran, D. Banister, M.D. McCulloch, Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV, *Applied Energy*, Vol. 111, 2013, pp. 206.. 1—6. Saatavissa (viitattu 16.12.2017): <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tut.fi/science/article/pii/S0306261913004121>