



Open your mind. LUT.  
Lappeenranta University of Technology

# **SÄHKÖAJONEUVOJEN AKKUJEN UUSIOKÄYTTÖ**

## **Reuse of electric vehicle batteries**

Esa Kesäniemi

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

LUT School of Energy Systems  
Sähkötekniikka

Esa Kesäniemi

### **Sähköajoneuvojen akkujen uusiokäyttö**

2015

Kandidaatintyö.  
30 s.

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin sähkö- ja hybridi ajoneuvojen akkujen uusiokäyttöä. Tutkimus toteutettiin kirjallisuustyönä. Tavoitteena oli selvittää voidaanko sähkö- ja hybridi ajoneuvojen akkuja uusiokäyttää, mitä ongelmia mahdollisesti uusiokäyttöön liittyy, minkälaisissa sovelluksissa käytettyjä akkuja voisi käyttää ja uusiokäytetäänkö kyseisenlaisia akkuja jo nykyään. Työssä esiteltiin myös yleisimpiä akkutekniikoita sekä niiden kierrätystä.

Tutkimuksessa havaittiin, että akuissa on runsaasti kapasiteettia jäljellä ajoneuvokäytön jälkeen. Uusiokäytössä akku voi kestää jopa yhtä paljon käyttöä kuin ajoneuvokäytössä. Ongelmat uusiokäytössä liittyvät akkujen vaihtelevaan kuntoon ja kapasiteettiin. Ennen uusiokäyttöä akut tulisi tarkastaa ja jos mahdollista, poistaa huonokuntoiset ja vialliset kennot. Käytettyjen akkujen uusiokäyttöön soveltuvista laitteistoista on tehty muutamia prototyyppisiä, jotka ovat teholtaan ja kapasiteetiltaan hyvin vaihtelevia. Sopivalla valvontajärjestelmällä varustettuna käytettyjä akkuja voitaneen käyttää myös olemassa olevissa, akkuja sisältävissä järjestelmissä. Käytettyjä akkuja voitaneen käyttää muun muassa uusiutuvan energian varastointiin, sähköverkon kulutushuippujen kompensointiin ja sähköajoneuvojen pikalatauksen puskurina. Etenkin litiumioniakkujen uusiokäyttö on järkevää, koska kierrätys ei ole kovin tehokasta ainakaan vielä.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Esa Kesäniemi  
**Reuse of electric vehicle batteries**

2015

Bachelor's Thesis.  
30 p.

Examiner: Associate Professor Lasse Laurila

In this Bachelor's Thesis the reuse of electric and hybrid vehicle batteries was examined. The research was conducted by means of literary analysis. The aim of the research was to find out can these batteries be reused, what kind of problems are included, what kind of implementations can utilize used batteries and are these batteries reused already. The study also introduced some most common battery technologies and battery recycling.

Based on the results of the study there is much capacity left in batteries after using them on vehicles. Used battery may last on reuse implementation as much usage as on vehicle. Problems related to battery reuse are related to varying health and capacity of batteries. Batteries should be inspected and faulty cells removed before implementing battery to second use. There are a couple of prototypes with varying power and capacity for reusing used batteries. Used batteries could be utilized also to existing battery systems when equipped with suitable battery management system. Used batteries could be used to store electricity produced by renewable energy, compensate peak loads in electrical grid and as buffer on electrical vehicle fast charging systems. Especially reuse of lithium-ion batteries is reasonable, because recycling is not effective yet.

## SISÄLLYSLUETTELO

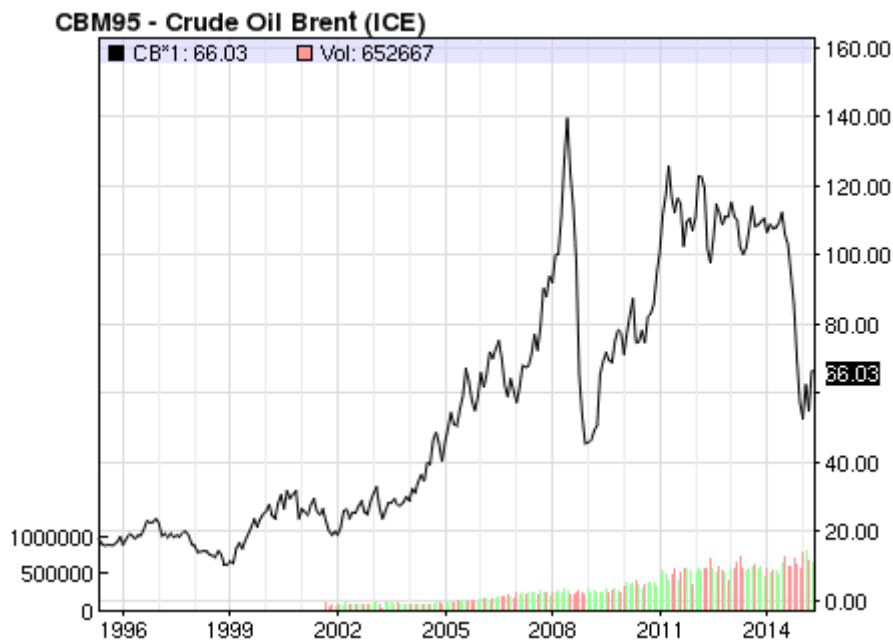
1	JOHDANTO .....	5
2	AKKUTEKNIIKOITA .....	8
2.1	Lyijyakku .....	8
2.2	Nikkelimetallihydridiakku .....	9
2.3	Litiumioniakku .....	10
2.3.1	Litiumioni-polymeeriakku .....	11
2.3.2	Litium-rauta-fosfaattiakku.....	11
2.3.3	Litium-titanaattiakku.....	11
3	AKKUJEN UUSIOKÄYTTÖKOHTTEITA.....	13
3.1	Uusiokäytön ongelmia.....	13
3.2	Uusiutuvan energian varastointi.....	15
3.3	Sähköverkon kulutushuippujen kompensointi .....	19
3.4	Pikalatauksen puskuri .....	21
3.5	Kierrätys.....	22
4	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	26
	LÄHTEET.....	27

**KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET**

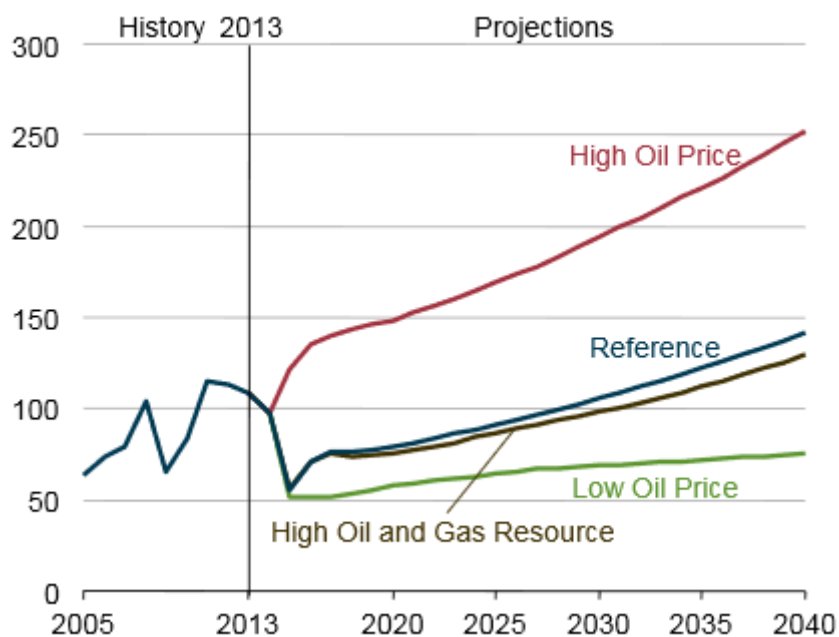
DC	tasavirta
Fe	rauta
ion	ioni
Li	litium
MH	metallihydridi
Ni	nikkeli
PO	fosfaatti
po	polymeeri

## 1 JOHDANTO

Ennusteiden mukaan raakaöljyn ja sen myötä öljypohjaisten polttoaineiden hinta nousee tulevaisuudessa ja liikenteen päästöjä halutaan pienentää mm. ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Kuvassa 1.1 on raakaöljyn hinta viimeisten 20 vuoden ajalta. Vaikka hinnassa on tapahtunut raju lasku vuodenvaihteessa 2014/2015, ennusteen mukaan hinta tulee jatkossa nousemaan, kuva 1.2.



Kuva 1.1. Raakaöljyn hintakehitys viimeisen 20 vuoden ajalta (\$/bbl). (Kualähde Nasdaq 2015)



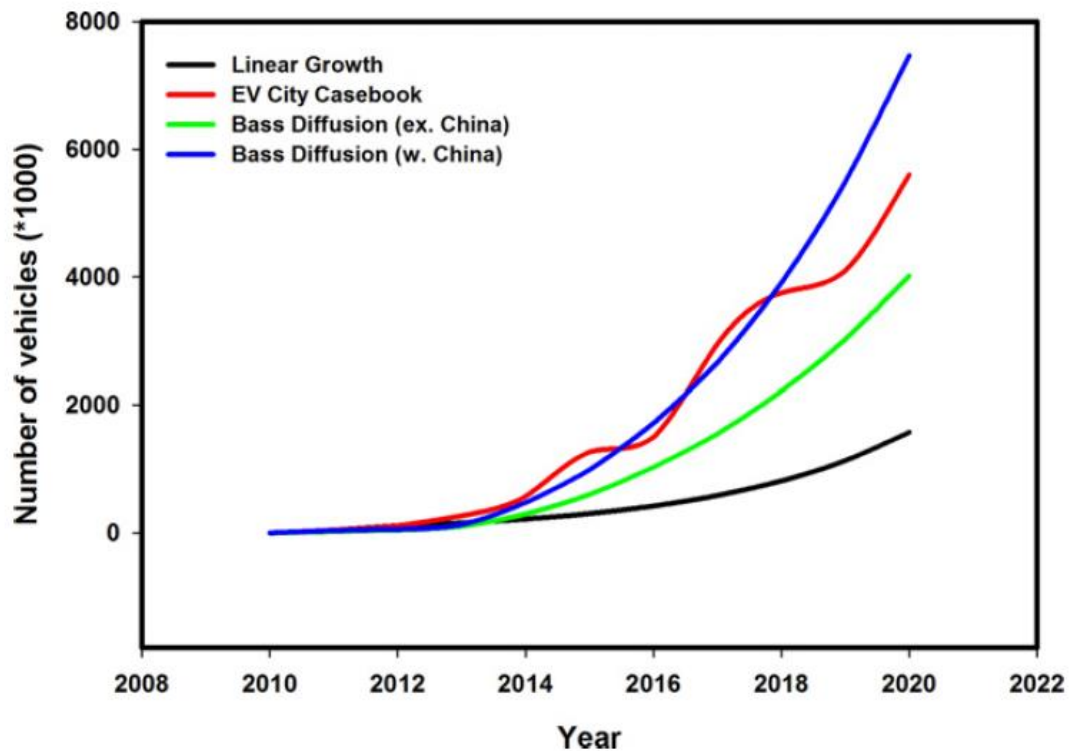
Kuva 1.2. Ennuste raakaöljyn hinnasta (\$/bbl). (Kualähde: U.S. Energy Information Administration 2015)

Polttoaineiden hinnan nousu kannustaa pienentämään kulutusta ja säädöksillä halutaan pienentää liikenteen päästöjä. Raskaiden ajoneuvojen päästörajoitukset ovat kiristyneet huomattavasti viime vuosikymmenen lopusta. Yksi vaihtoehto päästöjen vähentämiseen on hybridisointi. Busseja on jo valmistettu kaupunkiliikenteeseen täysin sähkökäyttöisinä. Kuvassa 1.3 on raskaiden ajoneuvojen eurooppalaiset hiukkas- ja typenoksidipäästörajat.



Kuva 1.3. Raskaiden ajoneuvojen eurooppalaiset päästörajat. (Kuvälähde: Volvo Trucks 2012)

Kulutusta ja päästöjä halutaan vähentää myös henkilöautoissa. Pistokkeesta ladattavia sähköautoja on myyty vuoden 2014 lokakuussa yli 600 000 maailmalaajuisesti (Cobb 2014). Kuvassa 1.4 on erilaisia ennusteita sähköautojen myyntimääristä vuoteen 2020 asti.



Kuva 1.4. Erilaisia ennusteita sähköautojen myyntimääristä. (Kuvälähde: Ambrose et al 2014)

Sähkö- ja hybridiajoneuvoissa yleisin energiavarasto on akku. Autovalmistajien suositusten mukaan nykyisissä hybridi- ja sähköautoissa akuston katsotaan olevan käyttöikänsä päässä kun kapasiteetista on jäljellä 70–80 % (Viswanathan et al 2011). Sähköautojen kohdalla tämä on ymmärrettävää, koska toimintamatka pienenee samassa suhteessa kuin kapasiteetti.

Tämän työn tavoitteena on selvittää, voidaanko ajoneuvojen akkuja käyttää vielä sen jälkeen kun ne on poistettu käytöstä ja jos voidaan, niin minkälaisissa sovelluksissa. Akulla tarkoitetaan tässä työssä hybridi- tai sähköisessä voimansiirrossa käytettävää akkua, ei perinteistä käynnistysakkua. Työ tehdään kirjallisuustutkimuksena hyödyntämällä etenkin tiedeartikkeleja sekä prototyyppilaitteistoista julkaistuja tietoja. Sovelluksien suhteen työssä keskitytään sellaisiin, joista on kehitetty tai kehitteillä prototyyppilaitteisto. Ensimmäisen kaupallisen, käytettyjen akkujen uusiokäyttöön soveltuvan laitteiston arvioidaan tulevan markkinoille vuoden kuluessa. Työn aluksi toisessa luvussa esitellään lyhyesti yleisimmät akkutekniikat. Kolmannessa luvussa esitellään kehitteillä olevia uusiokäyttösovelluksia ja esiteltyjen akkutyypin kierrätystä. Lopussa on yhteenveto akkujen uusiokäyttösovelluksista ja johtopäätökset.



## 2 AKKUTEKNIIKOITA

Nykyään osa henkilöautovalmistajista käyttää hybridi- ja sähköautoissaan nikkelimetallihydridiakkuja ja osa litiumioniakkuja. Näistä kahdesta akkutekniikasta litiumioniakut kehittyvät koko ajan, kun energiatiheyttä yritetään kasvattaa käyttämällä akussa eri materiaaleja. Lyijyakut ovat mukana tässä akkutekniikkakatsauksessa vertailukohtana ja siksi, että niitä käytetään energian varastointiin esimerkiksi veneissä sekä asuntoautoissa ja -vaunuissa.

### 2.1 Lyijyakku

Lyijyakun molemmat elektrodit ovat lyijyä. Elektrolyytinä toimii laimea rikkihappo. Tavanomaisessa rakenteessa happo on vapaana nesteenä lyijylevyjen välissä, mutta nykyisin elektrolyytti voi olla hyytelömäisenä tai imeytettynä lasikuitumattoon. Akkua purettaessa lyijy hapettuu anodilla ja samalla reagoi rikkihapon kanssa muodostaen lyijysulfaattia. Katodilla lyijyoksidi reagoi rikkihapon kanssa muodostaen myös lyijysulfaattia ja vettä. Ladattaessa reaktiot ovat päinvastaiset. Tästä havaitaan, että varauksen laskiessa rikkihappo sitoutuu lyijylevyihin. Elektrolyytin tiheyden perusteella voidaan määrittää akun varaustaso, mutta tulos ei ole tarkka. Lyijyakun ominaisenergia on 20–40 Wh/kg. Yhden kennon nimellisjännite on noin 1,9 V. (Berndt 1997)

Käytössä on huomioitava muutama asia. Varaustason ollessa matala, elektrolyytti voi jäätyä jo kymmenessä pakkasasteessa. Tämän vuoksi lyijyakkuja ei tulisi purkaa kokonaan tyhjäksi kylmissä olosuhteissa. Jäätyminen ei yleensä tuhoa akkua, mutta voi aiheuttaa muodonmuutoksia lyijylevyihin. Ylijännite aiheuttaa kaasumaisen vedyn ja hapen muodostumista, mikä aiheuttaa sopivissa olosuhteissa räjähdysvaaran. Normaalissakin käytössä vetyä muodostuu, mutta pieniä määriä kunhan kennon jännite on alle 2,4 V. Vedyn ja hapen muodostuminen kuluttaa akusta vettä, jota pitää ajoittain lisätä akkuun, mikäli akku ei ole suljettua mallia. (Berndt 1997)

Ainoa lyijyakun vaatima huoltotoimenpide on veden lisäys, jos akku on avointa mallia eli sitä voidaan huoltaa. Jos elektrolyytti on hyytelömäisenä tai imeytettynä lasikuituun, akku on huoltovapaa. Nestemäisellä elektrolyytillä akku voi olla huoltovapaa tai ei. Huoltovapaissa akuissa syntyvät kaasut voidaan hajottaa lisäelektrodilla ja saada näin suljettu akku. Lisäksi jos akkua ei käytetä, ylläpitolataus olisi hyvä suorittaa muutaman kerran vuodessa, riippuen varastointilämpötilasta. (Berndt 1997)

Yleensä käyttökohteessa tarvitaan korkeampaa jännitettä kuin yhden kennon tuottama 2 V. Useampi kenno voidaan sijoittaa samojen kuorien sisälle tai useita yksittäin koteloituja kennoja voidaan kytkeä sarjaan. Lyijyakkuja käytetään käynnistysakkuina ajoneuvoissa ja energian varastointiin muun muassa veneissä ja asuntovaunuissa. Myös sähköautoissa on käytetty lyijyakkuja. (Berndt 1997)

Lyijyakun tyypillisimpiä ikääntymisprosesseja ovat lyijysulfaatin kristallisoituminen eli sulfatoituminen, levyjen mekaanisen rakenteen heikkeneminen, jolloin osa materiaalista irtoaa, levyjen hapettuminen ja syöpyminen ja veden haihtuminen. Lyijysulfaattia syntyy akkua purettaessa ja normaalisti se hajoaa ladattaessa. Mitä tyhjemmäksi akku puretaan, sitä suurempia kristalleja muodostuu, jolloin ne eivät ainakaan kokonaan hajoa ladattaessa. Kristallit pienentävät levyjen reagoivaa pinta-alaa kuten myös materiaalin hajoaminen. Kristallien aiheuttamaa pinta-alan pientymistä voidaan ehkäistä lisäaineilla. Hapettuminen vaikuttaa negatiiviseen elektrodiin samalla tavalla kuin akun purkaminen, vaikka akkua ei purettaisikaan. Tällöin latausjännite nousee ja aiheuttaa kaasujen muodostumista, eli veden määrä vähenee. Avoimissa akuissa tämä ei ole ongelma, koska vettä voidaan lisätä, mutta suljetuissa akuissa ongelma on ilmeinen. Tosin ilman pääseminen suljettuun akkuun edellyttää vikaa paineentasausventtiilissä tai akun kuoressa. Yhden levyn syöpyminen voi johtaa syöpyneen lyijyn kertymiseen toiseen levyyn ja pahimmassa tapauksessa oikosulkuun. Korkea lämpötila ja yllilataus liian suurella jännitteellä aiheuttavat syöpymistä. Veden haihtuminen on ongelma korkeassa lämpötilassa ja ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden ollessa matala. Lyijyakun käyttöikä riippuu merkittävästi purkuvirran suuruudesta, syväpurkusyklien määrästä, akkutyypistä ja käyttötarkoituksesta. Avoin akku voi kestää parhaimmillaan hyvin huollettuna 15 vuotta ja 1500 sykliä käytöstä riippuen. Suljettu akku kestää huonoimmillaan kolme ja parhaimmillaan yli 10 vuotta tai 400–700 sykliä. (Berndt 1997)

Myös lyijyakkutekniikkaa kehitetään. Uutta teknologiaa edustaa lyijyakun ja superkondensaattorin yhdistelmä, jossa molemmat ovat samassa elektrolyytissä. Yhdistelmässä negatiivisen elektrodin lyijylevy on korvattu lyijyn ja hiilen yhdistelmällä. Uusi tekniikka mahdollistaa akun jatkuvan käytön osittain täyteen varattuna, missä perinteinen lyijy Akku vaatii säännöllistä yllilatausta sulfatoitumisen estämiseksi. Lisäksi tavanomaista suurempia lataus- ja purkuvirtoja voidaan käyttää. Käyttöään arvioidaan olevan moninkertainen tavallisiin lyijyakkuihin verrattuna. Uudentyyppinen lyijy Akku soveltuu sekä liikkuvaan käyttöön että paikallisiin energiavarastoihin. (Ecoul 2015)

## **2.2 Nikkelimetallihydridiakku**

Nikkelimetallihydridiakku (Ni-MH) on kehittyneempi versio nikkelikadmiumakusta. Myrkyllinen kadmium on korvattu katodissa katalyyttisellä metalliyhdisteellä, joka absorboi ladattaessa syntyvän vedyn muodostaen metallihydridiä. Ominaisenergia ajoneuvokäytössä on 50 – 80 Wh/kg, joka on suurempi kuin lyijyakuissa, mutta pienempi kuin litiumakuissa. Yhden kennon nimellisjännite on noin 1,34 V. Kapasiteetti pienenee parhaimmillaan alle 30 % tuhannella syklillä. Haittapuolina on nopea itsepurkautuminen, täyteen lataamisen jälkeen noin 5 % päivässä, eli pitkäaikaiseen energianvarastointiin nikkelimetallihydridiakku ei sovellu. Itsepurkautuminen on

enemmän lämpötilasta riippuva kuin lyijyakulla. Rakenteeltaan akku on täysin suljettu, eli siten huoltovapaa. (Berndt 1997)

Nopeasta itsepurkautumisesta huolimatta akkua voidaan varastoida pitkiäkin aikoja ilman ylläpitolatausta. Nikkelimetallihydridiakku ei menetä kapasiteettiaan, vaikka se olisi täysin tyhjä, toisin kuin lyijyakku. Myöskään käyttöikä ei lyhene varastoinnin seurauksena. Pitkäaikaisen varastoinnin jälkeen voidaan tarvita muutama lataus-purkusykli aktivoimaan elektrodimateriaali. Tyypillisiä ikääntymisprosesseja ovat positiivisen elektrodin kapasiteetin väheneminen, vetyä absorboivan metalliseoksen hapettuminen ja elektrodien välisten erotuslevyjen hajoaminen. Tarvitaan keskimäärin 1000 sykliä että nikkelimetallihydridiakun kapasiteetti laskisi alle 80 %:n. (Berndt 1997)

### 2.3 Litiumioniakku

Litiumioniakuilla (Li-ion) on korkea hyötysuhde, energiatiheys ja ominaisenergia, kuten nikkelimetallihydridiakuilla. Huonoina puolina ovat korkeat valmistuskustannukset ja tarve latauselektronikalle. Sarjaan kytkettyjen kennojen jännitettä on tarkkailtava latauksen aikana, sillä etenkin akun ikääntyessä yksittäisten kennojen kapasiteetti eroaa toisistaan. Ylilataus johtaa katodin rakenteen tuhoutumiseen ja kennon vaurioitumiseen. (Huang et al 2011)

Litiumioniakussa anodi on yleensä grafiittista hiiltä kerrosrakenteisena, katodi litium-metallioksidia ja elektrolyytti on litiumsuolaliuosta. Elektrolyytti voi olla nestemäisenä tai imeytyneenä polymeeriin. Ladattaessa litiumatomit muuttuvat katodilla litiumioneiksi ja kulkeutuvat anodille, missä ne vastaanottavat ylimääräisiä elektroneja ja varastoituvat hiilikerrosten väliin litiumatomeina. Akkua purettaessa prosessi toimii päinvastoin. Markkinoilla olevissa litiumioniakuissa materiaalien kemiallinen koostumus vaihtelee, mutta toimintaperiaate on sama. (Stan et al 2014)

Akun ikääntyessä anodille muodostuu passiivinen kerros, joka lisää akun sisäistä impedanssia, koska kerros vaikeuttaa litiumionien liikkumista. Lisäksi kerros kasvattaa anodin paksuutta ja muodostunut kerros voi halkeilla. Impedanssin kasvun lisäksi akun kapasiteetti laskee, koska litiumioneja kuluu passiivisen kerroksen muodostumiseen. Kyseinen mekanismi ikäännyttää akkua eniten kun akkua varastoidaan täyteen ladattuna. Anodin rakenteessa tapahtuu muutoksia kun käytetään suuria virtoja akun ollessa täynnä. Rakenteen muuttuessa pinta-ala pienenee, jolloin myös kapasiteetti pienenee. Nopeinten akkua heikentävä mekanismi on metallisen litiumin kertyminen anodille. Kertymiseen vaikuttavat elektrolyytti, anodin ja katodin kapasiteettiero, käyttölämpötila ja latausvirta. Anodin matala kapasiteetti, korkea lämpötila ja virta nopeuttavat reaktiota. Kiderakenteiksi kertyvä litium voi vaikuttaa anodin ja katodin väliseen eristeeseen ja jopa

puhkaista sen. Kertymät voivat myös aiheuttaa oikosulun ja lämpökarkaamisen, jossa lämpötilan nousu kiihdyttää reaktiota ja lämpötila nousee yhä nopeammin ja lopulta tuhoaa akun. (Agubra et al 2013)

Uusien ja käytettyjen akkujen kapasiteetin pienentymistä ja sisäisen resistanssin kasvua on tutkittu litiummangaanioksidiaakuilla. Käytettyjä akkuja oli käytetty yli 1000 sykliä. Lämpötila vaikuttaa merkittävästi kapasiteetin laskuun. Huoneenlämmössä uusilla ja vanhoilla akuilla kapasiteetti laski lähes samaa tahtia, eroa oli 0,3 % -yksikköä sataa sykliä kohden. Korkeammassa lämpötilassa, 45 °C:ssa, käytetyn akun kapasiteetti pieneni kaksinkertaisella nopeudella uuteen akkuun verrattuna. Sisäinen resistanssi vaikuttaa akusta saatavaan maksimivirtaan, jonka tarve kuitenkin uusiokäyttökohteessa on useimmiten pienempi kuin ajoneuvoissa. Huoneenlämmössä resistanssi kasvoi likimain samaa tahtia uudessa ja vanhassa akussa. Korkeammassa lämpötilassa käytetyn akun resistanssi kasvoi huomattavasti nopeammin kuin uudessa. Tuloksista voidaan todeta, että lämpötila vaikuttaa merkittävästi siihen, kuinka kauan akku kestää uusiokäytössä. (Burke et al 2013)

### **2.3.1 Litiumioni-polymeeriakku**

Litiumioni-polymeeriakussa (Li-Po) on polymeerimateriaalista valmistettu erotuslevy anodin ja katodin välissä, joka läpäisee vain litiumionit ja johon elektrolyytti on imeytetty. Litiumioni-polymeeriakuille tyypillistä on korkea kapasiteetti suhteessa painoon, eli suuri ominaisenergia (yli 100 Wh/kg) ja laaja käyttölämpötila-alue (-20 - 60 °C). Lisäksi kestoikä on jopa yli 1000 lataussykliä, energiahyötysuhde jopa 95 % ja itsepurkautuminen on alle 5 % kuukaudessa. (Salameh et al 2009)

### **2.3.2 Litium-rauta-fosfaattiakku**

Litium-rauta-fosfaattiakku (LiFePO<sub>4</sub>, LFP) on yksi litiumioniakun alatyyppeistä. Nimensä mukaisesti katodin materiaalina on litiumrauta-fosfaatti. Ominaisenergia on erityyppisiin litiumioniakkuihin verrattuna keskitasoa, mutta litium-rauta-fosfaattiakku on turvallinen, edullinen, stabiili ja pitkäikäinen. Ominaisuuksiensa puolesta se soveltuu sekä paikallis- että ajoneuvokäyttöön. (Stan et al 2014)

### **2.3.3 Litium-titanaattiakku**

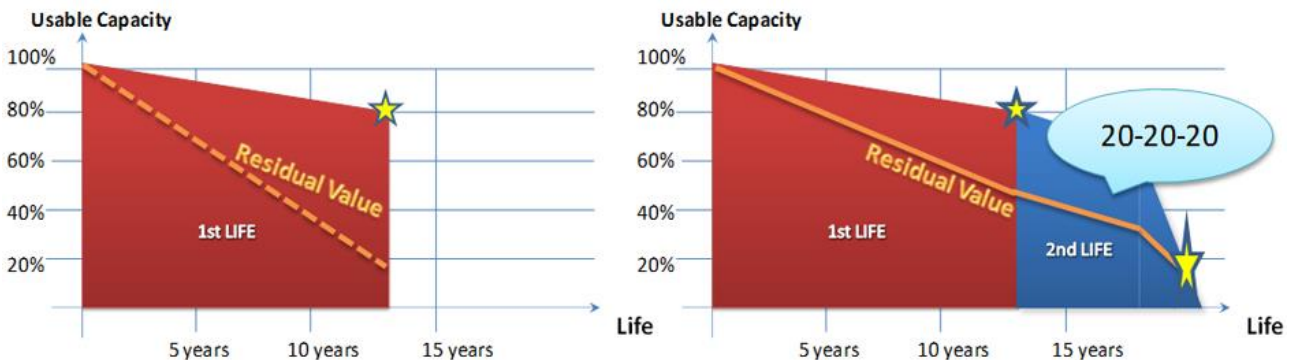
Litium-titanaattiakussa (LTO) litiumioniakun anodi on valmistettu grafiitin sijaan litiumtitanaatista, eli litiumin ja titaanioksidin yhdisteestä. Tästä johtuen akkutyyppeistä tunnetaan myös litium-titaanioksidiaakkuna. Katodi puolestaan on grafiittia. Nanokristallimuodossa olevalla titanaatilla saadaan reagoivaa pinta-alaa 100 m<sup>2</sup>/g, kun grafiitilla vain 3 m<sup>2</sup>/g. Suuri pinta-ala mahdollistaa suurien lataus- ja purkuvirtojen käytön. Jatkuva purkuvirta voi olla maksimissaan 10-kertainen akun kapasiteettiin nähden. Pikalatauksella on mahdollista ladata 90 % kapasiteetista kymmenessä minuutissa. Muihin litiumakkutyyppeihin nähden litium-titanaattiakku toimii paremmin alhaisissa

lämpötiloissa, jopa  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ :ssa. Lisäksi litium-titanaattiakku on turvallinen ja käyttöikä on jopa 25 000 sykliä, eli noin 15 kertaa enemmän kuin perinteisellä litiumioniakulla. Ominaisenergia on pieni, vain noin  $80\text{ Wh/kg}$ , eli sama kuin nikkelimetallihydridiakulla parhaassa tapauksessa. Lisäksi ongelma on muihin litiumakkutyyppeihin nähden korkea hinta. (Battery University 2015, Bright Hub Engineering 2011)

### 3 AKKUJEN UUSIOKÄYTTÖKOHEITEITA

Akkujen uusiokäyttö on vielä uutta, koska sähköautoja ei ole ollut kovinkaan pitkää aikaa sarjatuotannossa ja akkuja ei ole poistunut käytöstä vielä suuria määriä. Myyntimäärien kasvaessa myös autovalmistajat, sähköalan yritysten lisäksi, ovat aloittaneet uusiokäyttösovellusten kehitystyön yhteistyössä sähköalan toimijoiden kanssa. Työssä on keskitytty sellaisiin uusiokäyttökohteisiin, joihin on jo kehitteillä sovelluksia.

Uusiokäytöllä voi olla myös kuluttajan kannalta positiivisia vaikutuksia sähköautojen hintaan. Kun akut uusiokäytetään, akun kaikkia kustannuksia ei tarvitse sisällyttää sähköauton hintaan, tai akkua vaihtaessa voi saada hyvitystä vanhasta. Lihin (2012) mukaan myös malli, jossa sähköauto myytäisiin ilman akkua ja akku vuokrattaisiin, alentaisi sähköautojen hintoja. Hinnan alenemisen lisäksi auton käyttäjän ei tarvitse olla huolissaan kustannuksista, jos akku tarvitsee vaihtaa ennenaikaisesti. Kuvassa 3.1 on havainnollistettu, kuinka akun jäännösarvo on ajoneuvokäytön jälkeen korkeampi, jos akku voidaan uusiokäyttää verrattuna akun romuttamiseen heti ajoneuvokäytön jälkeen.



Kuva 3.1. Akun kapasiteetti ja rahallinen jäännösarvo pelkässä ajoneuvokäytössä ja ajoneuvokäytön lisäksi uusiokäytössä. (Kuvälähde: Batteries 2020 2014)

#### 3.1 Uusiokäytön ongelmia

Oli akkutyypin mikä tahansa, yhden kennon jännite on niin matala, että käytännössä kennoja pitää kytkeä sarjaan, jotta jännite saadaan tarvittavalle tasolle. Uusiokäytössä tämä on otettava huomioon, koska sarjaan kytkettynä yhden kennon kunnan heikkeneminen vaikuttaa koko sarjaan kytkettyyn kokonaisuuteen ja alentaa kapasiteettia huomattavasti. Kun akku siirretään uusiokäyttökohteeseen, tulisi yksittäisten kennojen kunto mahdollisesti tarkastaa ja tarvittaessa koota akkupaketti uudelleen, mikäli akun rakenteen puolesta tämä on mahdollista. (Lih et al 2012)

Jos litiumioniakussa on alkuperäisestä kapasiteetista jäljellä 80 % kun se poistetaan ajoneuvokäytöstä, sen voidaan odottaa kestävänsä vielä 1600 purku-lataussykliä (Lacey et al 2013). Uusi akku kestää ajoneuvossa keskimäärin 1600 sykliä ennen kuin kapasiteetti on 80 % alkuperäisestä (Marra et al 2010). Toisin sanoen litiumioniakku kestää ajoneuvokäytön jälkeen vielä yhtä paljon vastaavalla kuormituksella kuin ajoneuvossa. Ajoneuvosta poistetun akun odotettavissa oleva käyttöikä on noin viisi vuotta jos purku-lataussyklin odotetaan tapahtuvan päivittäin (Lacey et al 2013).

Sarjaan kytketyissä kennoissa ongelmana on se, että sarjaan kytkettyjen kennojen kapasiteetti on yhtä suuri kuin heikoimman kennon kapasiteetti. Ongelma voidaan korjata aktiivisella tai passiivisella tasapainotusjärjestelmällä, mutta tavanomainen järjestelmä ei välttämättä riitä, jos kapasiteettierot ovat suuria. Yksi mahdollinen ratkaisu on kytkeä jokaisen kennon rinnalle DC/DC-muunnin, jolloin jokaisesta kennosta voidaan hyödyntää koko kapasiteetti. Ideaalitapauksessa systeemi toimii kuin yksittäinen kenno, mutta suuremmalla jännitteellä. Tasapainotusjärjestelmästä saadaan sitä parempi hyöty, mitä suurempi on kennojen kapasiteettiero, koska muuntimissa syntyy häviöitä. Järjestelmän optimaalinen käyttö edellyttää myös kennojen kapasiteetin ja virran tarkkaa arviointia. (Einhorn et al 2011)

Tasapainotukselle vaihtoehto on monitasoinen hakkurijärjestelmä. Jokainen akku on kytketty omaan jännitettä nostavaan hakkuriin, jotka taas ovat kytketty monitasoiseen jännitettä laskevaan hakkuriin. Tosin jokaista moduulia voidaan ohjata jännitettä nostavana tai laskevana ja vikatilanteessa yksittäinen moduuli voidaan ohittaa. Järjestelmä mahdollistaa erityyppisten, -kapasiteettisten ja -jännitteisten akkujen käytön. Tässäkin tapauksessa akkujen kapasiteetti pitää olla tiedossa, jotta koko kapasiteetti saadaan käyttöön. (Mukherjee et al 2015)

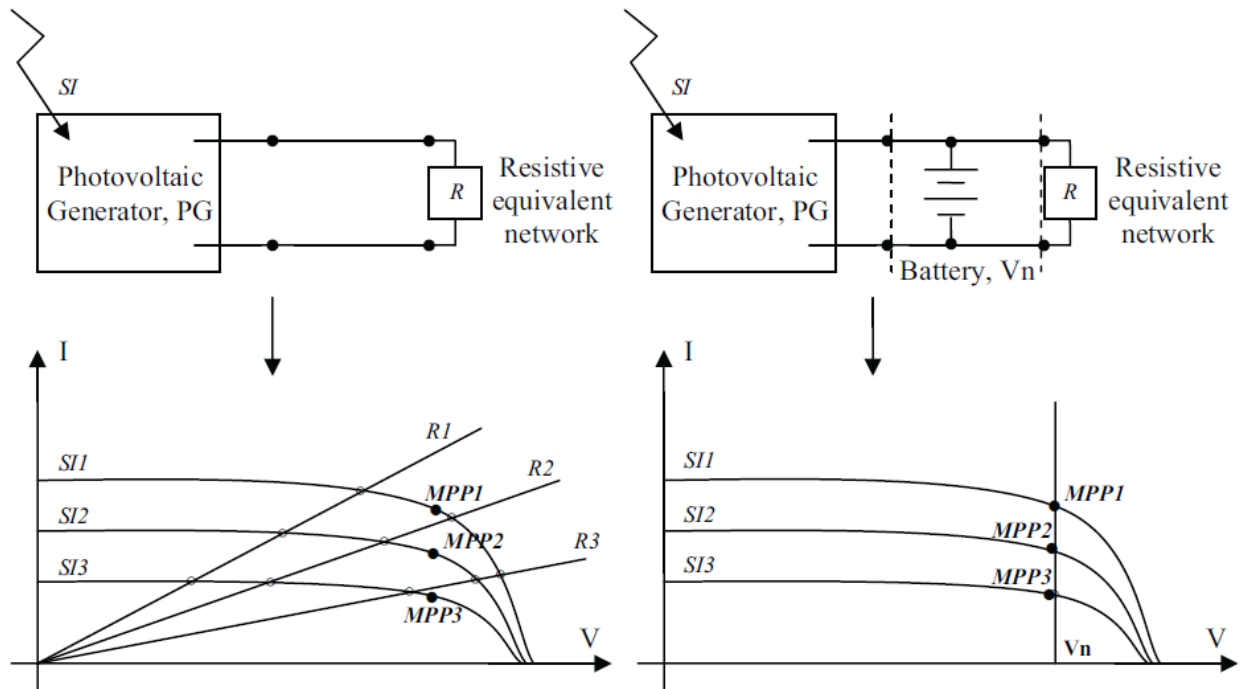
Muunninjärjestelmän valintaan vaikuttaa myös akkujen luotettavuus, joka on käytettyjen akkujen kohdalla oletettavasti huonompi kuin uusilla akuilla. Järjestelmän toimivuuden kannalta on hyvä, jos vikaantunut akku voidaan kytkeä järjestelmästä irti ja ohittaa, jolloin koko järjestelmää ei tarvitse sammuttaa yksittäisen akun vikaantuessa. Yleensä tehoelektronikka, eli DC-DC -muuntimet ja invertterit vikaantuvat harvemmin kuin käytetyt akut. Akkujen vikaantumistiheyden ollessa esimerkiksi  $60 \times 10^{-6}$  vikaa tunnissa, eli noin 17 000 tuntia, elektroniikkaa tarvitaan takaamaan koko järjestelmän luotettavuus niin paljon, että järjestelmä ei ole käytännössä kannattava. Pienemmällä vikatiheydellä kokonaisuudessaan edullisin järjestelmä sisältää yhden verkkoinvertterin ja useita sarjaan kytkettyjä DC-DC -muuntimia, joihin akut on kytketty. Akkujen luotettavuus uusiokäytössä riippuu kuinka paljon akku rasitetaan uusiokäyttökohteessa, mutta myös millaiselle rasitukselle akku on joutunut ajoneuvossa. (Mukherjee et al 2014)

### 3.2 Uusiutuvan energian varastointi

Aurinko- ja tuulienergian tuotanto on riippuvainen sääolosuhteista. Tuotannon määrän vaihtelu lisää sähköverkon jännitteen ja taajuuden vaihteluita. Yleensä aurinkopaneeleista halutaan suurin mahdollinen teho ja tällöin osan paneeleista joutuminen varjoon laskee tuotettavaa tehoa huomattavasti, koska useimmiten paneeleita on kytketty sarjaan ja samasta paneelimäärästä koostuvia sarjoja rinnakkain. Yhden sarjan tehoa heikentää varjojen lisäksi valmistustoleranssien aiheuttamat erot ja eri lailla toisiinsa nähden ikääntyvät moduulit. Sähköverkkoon kytkemättömissä aurinkosähköjärjestelmissä energiavarasto on kiinteä osa järjestelmää. Verkkoon kytketyssä järjestelmässä energiaa varastoimalla saadaan tasoitettua verkkoon syötettävää tehoa sekä lisäksi energiavarastoa voidaan hyödyntää verkon kuormituspiikkien kompensointiin. (Carbone 2009)

Verkkoon sähköä tuottava invertteri voidaan kuvata resistiivisenä kuormana paneeleille. Tämän kuorman pitää sopeutua paneelien tuottamaan tehoon, koska aurinkopaneelin tuottaman jännitteen ja kuormitusvirran suhde on epälineaarinen, kun taas resistiivisellä kuormalla se on lineaarinen. Invertteri, joka pyrkii pitämään kuormitusvirran maksimitehon pisteessä (engl. Maximum power point, MPP), on sisäiseltä toteutukseltaan tavallista invertteriä monimutkaisempi, mutta tällöin voimalan hyötysuhde on parempi. Huolella nimellisjännitteen ja kapasiteetin suhteen suunniteltu akusto pystyy pitämään paneelien tuoton lähellä maksimitehoa riippumatta tuotetusta tehosta tai invertterin aiheuttamasta kuormituksesta. Akkuja ei tarvitse sijoittaa yhdeksi akustoksi, vaan ne voidaan hajauttaa sopivan paneelimäärän rinnalle. Akuista huolimatta invertteri voidaan pitää samantyyppisenä kuin ilman akkuja. Akkujen hyötyä on tutkittu pienen mittakaavan kokeissa, missä paneelien nimellinen kokonaisteho oli noin 20 W. Jos kaikkiin sarjaan kytkettyihin paneeleihin kohdistuva säteily on lähes sama, akuista saatava hyöty on pieni, mutta tapauksessa, jossa edes yksi paneeli on varjossa, akuilla varustettu järjestelmä tuotti noin kaksinkertaisen tehon akuttomaan verrattuna. (Carbone 2009) Kuvassa 3.2 on periaatekuva voimalasta ja aurinkopaneelille tyypilliset jännite-virta -kuvaajat erilaisilla säteilyvoimakkuuksilla.



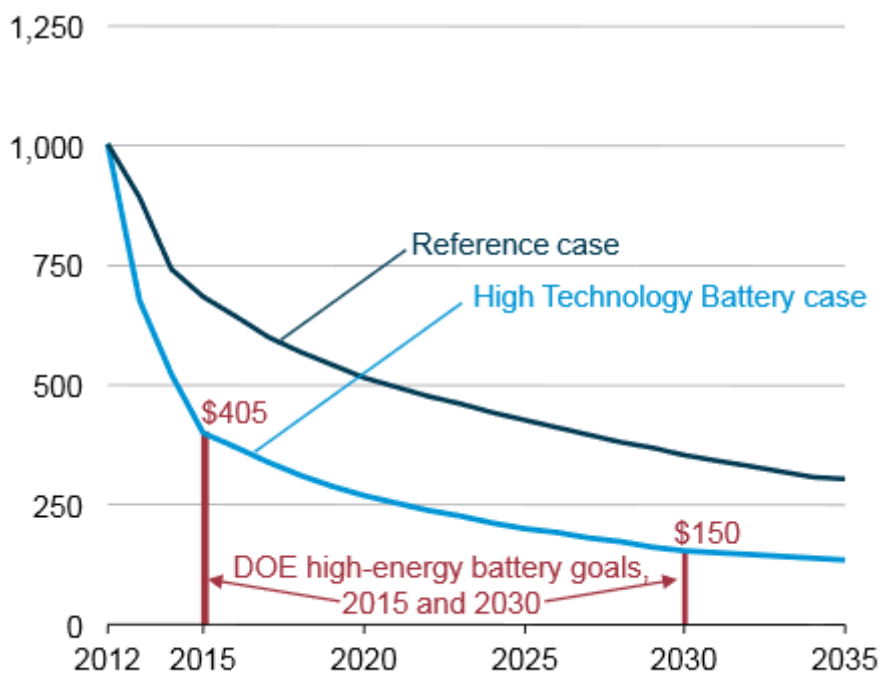


Kuva 3.2. Resistiivisen kuorman ja aurinkopaneelin jännite-virta -kuvaajat ja paneelin maksimitehonpisteet. Paneelin ja kuorman väliin kytketty akku mahdollistaa jännitteen pysymisen maksimitehonpistettä vastaavana. (Kuvälähde: Carbone 2009)

Aurinkoenergian pientuotanto on kasvanut huimasti viime vuosina ja monissa maissa on otettu käyttöön syöttötariffeja lisäämään tuotannon kannattavuutta. Ilman syöttötariffia tuotettu sähkö pitäisi pystyä käyttämään tuotantokohteessa mahdollisimman hyvin, jotta aurinkosähkön rakentaminen olisi kannattavaa. Kotitalouksien osalta tuotannon ja kulutuksen sovittaminen on vaikeaa, koska tuotanto on suurimmillaan päivällä ja kulutus puolestaan aamulla ja illalla. Ylimääräisen aurinkosähkön varastointia akkuihin on tutkittu erilaisten kotitalouksien tapauksissa. Riittävän suureksi mitoitettulla energiavarastolla ja riittävällä tuotannolla voidaan päivittäinen energiantarve kattaa jopa kokonaan aurinkosähköllä, kun ilman varastointia omassa käytössä voitaisiin hyödyntää vain alle puolet tai jopa vain kolmannes tuotetusta. Vaikka energian varastointi vähentää ostosähkön tarvetta, akut lisäävät voimalan hankintakustannuksia ja täten nykyisellä hintatasolla uudet akut eivät ole kannattava vaihtoehto. Sen sijaan ajoneuvojen akkujen uusiokäyttö voisi olla vaihtoehto, vaikkakin akkujen jäännösarvoa ajoneuvokäytön jälkeen ei tiedetä. Tutkimuksessa tarkasteltiin tuotantoa ja kulutusta yhden päivän osalta. Tarkastelu koko vuoden ajalta antaisi tarkempaa tietoa energian varastoinnin taloudellisista hyödyistä. (Knowles et al 2014)

Syrjäisillä seuduilla, jonne sähköverkon rakentamista ei ole odotettavissa tai se on hyvin kallista esimerkiksi maaston vuoksi, sähkö on tuotettu paikallisesti, yleensä fossiililla polttoaineilla. Aurinkopaneelit ja pienet tuulivoimalat ovat yleistyneet edellä mainitun kaltaisissa

pienoissähköverkoissa (engl. microgrid), joissa energiavarastona on lyijyakut. Lyijyakujen ongelma on kuitenkin lyhyt käyttöikä, vain kolmesta viiteen vuotta. (Ambrose et al 2014). Sykleissä mitattuna lyijyakun käyttöikä tällaisessa käytössä on 500–800 sykliä, sitä vähemmän mitä tyhjemmäksi akku puretaan (Di et al 2013). Kun järjestelmän käyttöikä on yli 20 vuotta, lyijyakujen lyhyt käyttöikä aiheuttaa huomattavia lisäkustannuksia, koska akut pitää vaihtaa monta kertaa. Lisäksi korkeassa lämpötilassa ja huoltamatta lyijyakun käyttöikä voi olla huonoimmillaan vain vuoden. Ajoneuvokäytöstä poistetun litiumakun arvioidaan kestävän kuudesta kahdeksaan vuotta. Lisäksi ne ovat huoltovapaita ja sietävät korkeita lämpötiloja lyijyakkuja paremmin. Vanhojen litiumakkujen arvioidaan olevan hinnaltaan kilpailukykyisiä uusien lyijyakujen kanssa, jolloin pidemmän käyttöiän johdosta järjestelmien kokonaiskustannukset laskevat. Litiumakkujen energiatiheys on huomattavasti lyijyakkuja korkeampi, jolloin kuljetuksesta tulee myös halvempaa, koska sama varastointikapasiteetti vie vähemmän tilaa. (Ambrose et al 2014) Kuvassa 3.3 on ennuste sähköautojen akkujen hinnasta vuoteen 2035 asti.



Kuva 3.3. Ennuste sähköauton akun hinnasta (\$/kWh). (Kuvälähde U.S. 2012)

Prototyypilaitteistoja on esitelty muutamia. Kotitalouskokoluokkaan on Chevrolet Voltin akkuja käyttävä järjestelmä, jonka ovat kehittäneet ABB ja General Motors. Prototyypin akkukapasiteetti on 50 kWh ja teho 25 kW, kuva 3.4. Järjestelmää voidaan käyttää varastoimaan aurinko- tai tuulienergiaa ja varavoimana viidelle kotitaloudelle. (Streng 2012)



Kuva 3.4. ABB:n ja General Motorsin kehittämä uusiutuvan energian varastointiin Chevrolet Voltin akkuja käyttävä prototyyppi. (Kuvälähde: General Motors 2012)

Japanilainen Sumitomo perusti vuonna 2010 yhteisyrityksen 4R Energy Corporation yhdessä Nissanin kanssa kehittämään akkujen uusiokäyttöä. Helmikuussa 2014 Sumitomo julkisti suuren mittakaavan prototyypin, joka käyttää 16:ta akkuja. Prototyypin teho on 600 kW ja energiavaraston koko 400 kWh, kuva 3.5. Sitä käytetään 10 MW:n aurinkovoimalan tuotannon vaihteluiden tasoittamiseen. Järjestelmän koekäyttö tulee kestämään kolme vuotta ja sinä aikana varmistetaan akkujärjestelmän soveltuvuus tasoittamaan tuotannonvaihteluja ja käytettyjen sähköauton akkujen soveltuvuus suuren mittakaavan energiavarastoksi. (Colthorpe 2014)



Kuva 3.5. 4R Energy Corporationin kehittämä aurinkovoimalan tuotannon tasoittamiseen tarkoitettu prototyyppi ja Nissan Leaf, jonka akkuja järjestelmässä käytetään. (Kuvallähde: Sumitomo Corporation 2014)

Saksalainen energiayhtiö WEMAG on kehittänyt sähköpolkupyörien käytettyjä akkuja hyödyntävän järjestelmän varastoimaan aurinkoenergiaa. Aiemmin energiavarastojen ongelma on ollut korkea hinta ja huoli akun vikaantumisesta. WEMAGin järjestelmässä hintaa laskee se, että akut ovat käytettyjä. Vikaantumisongelma on kierretty vuokraamalla järjestelmä, jolloin akun vikaantuessa käyttäjälle ei tule lisäkustannuksia. Arvioidulla vuokralla 20 vuoden käyttö vastaa kaupallisen järjestelmän ostohintaa. Järjestelmässä käytetään 16:ta sähköpolkupyörän akkua, jolloin yhteenlaskettu kapasiteetti on 5 kWh. Jokaisella akulla on oma valvontajärjestelmä ja lisäksi kokonaisuutta valvotaan. Tällä toteutuksella yksittäisen akun vikaantuminen ei vaikuta toimintaan ja akkuja voidaan irrottaa järjestelmästä häiritsemättä sen toimintaa. Käytettyjen akkujen arvioitu käyttöikä on noin 5 vuotta. Käyttäjä voi itse vaihtaa akut ja tulevaisuudessa järjestelmä voi tilata vaihtoakut automaattisesti kun käytössä olevien akkujen kapasiteetti laskee liikaa. Järjestelmää voidaan myös käyttää syöttämään energiaa taloon sähköverkon vikatilanteissa. (Kuhrau 2014)

### 3.3 Sähköverkon kulutushuippujen kompensointi

Uusiutuvan energian tuotannon, myös pien tuotannon, lisääntyessä sähkön tuotantoon tulee yhä suurempia vaihteluja, jolloin säätövoimaa tarvitaan enemmän pitämään kulutus ja tuotanto tasapainossa. Energiavarastojen puuttumisen takia sähköverkot joudutaan mitoittamaan kulutuspiikkien mukaan, jotka voivat olla moninkertaisia normaalitilanteeseen nähden, mutta

kestävät hyvinkin lyhyen aikaa kerrallaan. Energian varastoinnilla voidaan pienentää siirtoverkon tarvittavaa maksimikapasiteettia, parantaa sähkönlaatua ja puskuroida pientuotantoa. Akkuihin perustuvan energiavaraston reagointiaika tehontarpeen muutoksiin on kymmenien millisekuntien luokkaa ja varastoitavan energian määrää rajoittaa vain akuston koko. Kulutushuippujen tasoittamisen lisäksi akkuihin perustuvia energiavarastoja voidaan käyttää loistehon kompensointiin nykyaikaisen tehoelektronikan ansioista aina, riippumatta ladataanko vai puretaanko akkuja. (Lacey et al 2013)

Mahdollisuus käyttää akustoja energiavarastoina ei rajoitu tiettyyn jännitetasoon sähköverkossa. Matalajännitteisessä jakeluverkossa on suurempi kuormitusvaihtelu kuin korkeajännitteisessä siirtoverkossa, jolloin jakeluverkossa akustosta olisi suurempi hyöty ja matalan kuormituksen aikana akusto saataisiin paremmin ladattua. Lisäksi kuormituksen tasoittaminen matalajänniteverkossa tasoittaa myös keski- ja korkeajänniteverkon kuormitusta. Matalajänniteverkossa käyttöä puoltaa myös se, että pientuotannosta verkkoon päin siirtyvä ylimääräinen energia voidaan ottaa talteen pienemmillä häviöillä ja tavallaan ”väärään suuntaan” siirtyvän energian mahdollisesti aiheuttamat ongelmat vähenevät. (Lacey et al 2013)

Sähköverkkoon kuuluvilla syrjäisillä alueilla verkon ikääntyminen ja kuormituksen kasvu aiheuttavat yhä enemmän tilanteita, joissa jännite laskee liikaa. Sähköverkon kunnostamiselle vaihtoehtona on akkuihin perustuvan energiavaraston asentaminen, johon on liitettyä uusiutuvan energian tuotantoa. Järjestelmää voidaan käyttää monella tavalla. Ensisijaisesti voidaan käyttää joko sähköverkkoa tai uusiutuvan energian tuotantoa. Akuista voidaan tuottaa kaikki tarvittava energia sähkökatkon tai verkon kuormitushuipun aikana, kuormitushuipun aikana voidaan myös syöttää tehoa verkkoon päin. Akut voidaan myös ladata verkosta matalan verkonkuormituksen aikana, jolloin uusiutuvaa energiaa ei tarvita akkujen lataukseen, vaan ylimääräinen voidaan myydä. (Wolfs et al 2011)

Akkujen käyttöiän kannalta akuston mitoitus ja hallinta ovat olennaisia. Käyttöiän kannalta olennaista on että akkua ei varata kokonaan täyteen eikä pureta täysin tyhjäksi. Lisäksi lataus- ja purkuvirtojen tulisi olla kohtuullisella tasolla. Näissä rajoissa tarvittava akkukapasiteetti voidaan määrittää sen perusteella kuinka suuri on maksimikulutus ja paljonko piikkiä halutaan pienentää. Sähkökulutuksen osalta taloudelliset säästöt ovat sitä suuremmat, mitä enemmän kulutushuippuja pienennetään. Tällöin toki tarvitaan suurempi akkukapasiteetti ja suuremmalle maksimiteholle soveltuva laitteisto. Kokonaisuuden kannattavuus riippuu siitä, kasvavatko säästöt vai investointikustannukset enemmän kun järjestelmän koko kasvaa ja sen myötä kulutushuiput pienenevät. (Keeli et al 2012)

Yhdysvaltalainen Indy Power Systems esitteli vuonna 2012 erityyppisiä akkuja käyttävän järjestelmän, kuva 3.6. Asennetun järjestelmän akkukapasiteetti on 15 kWh ja teho 50 kW. Käyttökohteessaan se vähentää verkon kuormitusta keskimäärin 15 kW tunniksi jokaisena arkipäivänä. Järjestelmä on patentoitu ja jokaisen akun jännitettä ja virtaa voidaan säätää erikseen, jotta akkujen jäljellä oleva energia tulee optimoitua. Akkuja voidaan jälkepäin asentaa lisää tai poistaa. (Indy Power Systems 2012, Tolen 2012)



Kuva 3.6. Indy Power Systemsin sähköverkon kulutushuippuja tasoittava järjestelmä. (Kuvälähde: Tolen 2012)

Kirjoitushetkellä uusin julkistettu prototyyppi on BMW:n, Boschin ja Vattenfallin yhteishanke. Laitteisto käyttää BMW:n sähköautojen akkuja, yhteiskapasiteetiltaan 2 MWh. Maksimiteho on 2 MW ja ensisijainen käyttötarkoitus on verkon kuormituksen tasoittaminen, mutta myös uusiutuvan energian tuotannon tasoittaminen. Boschilla on kokemusta jo kahdesta suuren mittakaavan energiavarastosta ja on kehittänyt akuston hallinta-algoritmin, jolla varmistetaan jokaiselle kennolla mahdollisimman pitkä käyttöikä. Energiavarastoa on myös mahdollista käyttää varavoimana sähkökatkon aikana. Vattenfall tulee käyttämään laitteistoa 10 vuotta osana jo olemassa olevaa virtuaalista voimalaitosta. Laitteiston käyttöönotto on arviolta vuoden 2015 lopulla. (Colthorpe 2015, Engerati 2015)

### 3.4 Pikalatauksen puskuri

Uusimmilla akkutekniikoilla sähköajoneuvojen akkujen latauksessa pullonkaulana on sähköverkko. Nopea lataus tarvitsee sähköverkosta tehoa henkilöautojen kohdallakin kymmeniä kilowatteja ja raskailla ajoneuvoilla satoja kilowatteja. Pikalatausjärjestelmällä voidaan päästä tavallisen tankkauksen mittaiseen latausaikaan, kun noin viidessä minuutissa on mahdollista ladata akku 80-prosenttisesti täyteen. Yhdistämällä latausasemaan akusto, voidaan sähköverkon kuormitusta

pienentää huomattavasti. Mitoittamalla puskuriakusto riittävän suureksi, verkon kuormitus voidaan pitää ajoneuvoa ladattaessa samalla tasolla kuin puskuriakkuja ladattaessa. Lisäksi latausaseman tasasuuntauselektronikan kapasiteetti voi olla pienempi, koska verkosta tarvitaan pienempi teho. (Ciccarelli et al 2013)

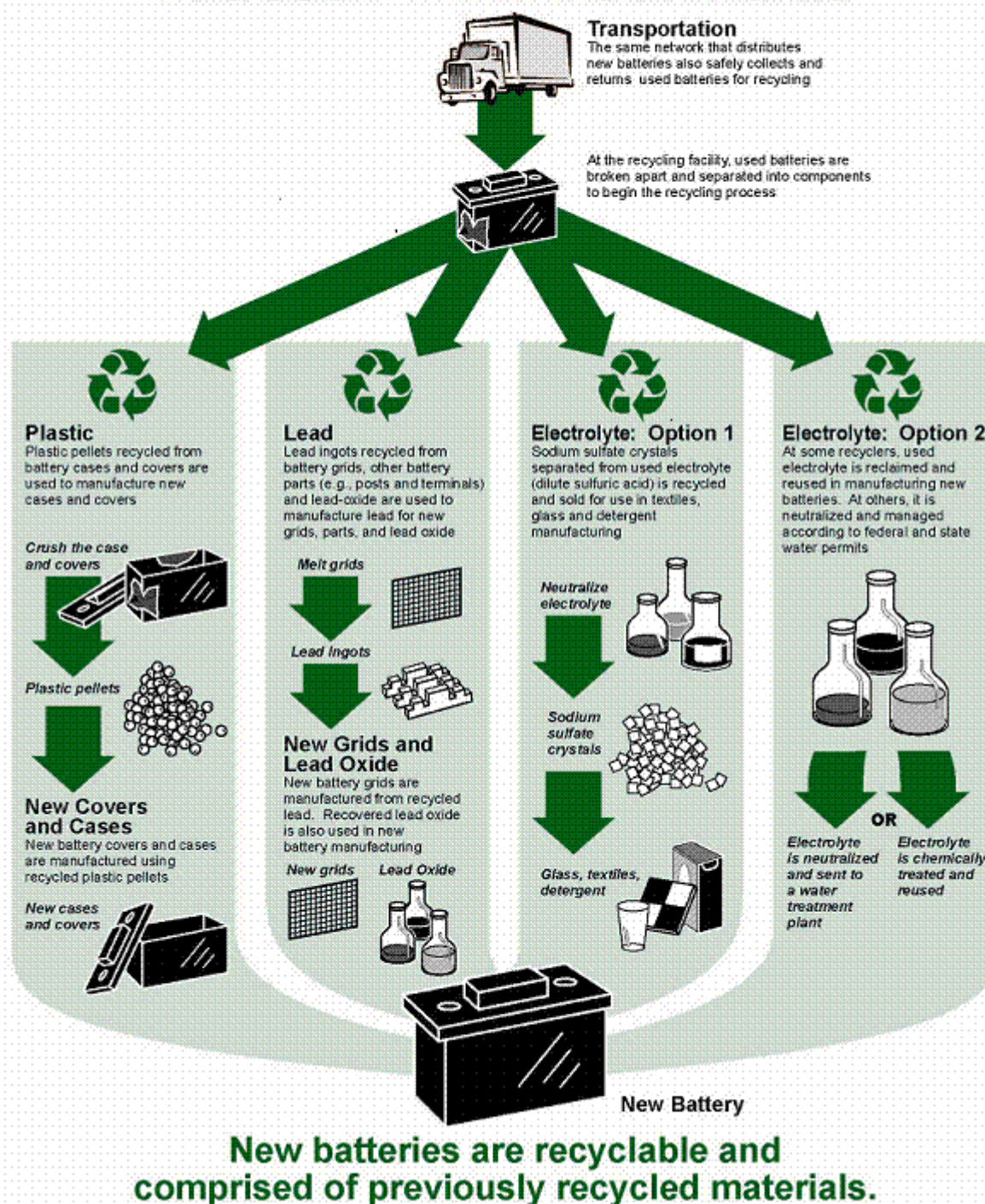
Ranskassa muun muassa Bouygues, Renault, Alstom ja Nexans ovat kehittäneet vanhoja akkuja puskurina hyödyntävän latauspisteen. Latauspisteen akut ladataan yöllä ja autoja voi ladata päivällä. Projektin budjetti on 13 miljoonaa euroa ja sitä on kokeiltu testikohteissa. Järjestelmän arvioidaan ehtivän myyntiin vuoden kuluessa. (De Clercq 2014)

### 3.5 Kierrätys

Jokainen akku tulee ennemmin tai myöhemmin lopullisesti käyttöikänsä päähän. Kierrätyksen hyödyt riippuvat akkutyypistä, mutta uusia raaka-aineita tarvitaan vähemmän, jos niitä voidaan ottaa talteen vanhoista akuista. Kierrätyksen ympäristövaikutukset ovat muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta pienemmät kuin alkutuotannossa. Lisäksi tietyt akkutyypit ovat vaarallista jätettä, jolloin hävityskustannuksia voidaan pienentää kierrättämällä materiaaleja. Nykyisen kierrätysjärjestelmän ongelma on erityyppisten akkujen sekoittuminen, litiumakut aiheuttavat ongelmia lyijyakkujen kierrätysprosessissa ja toisinpäin. Laitokset ovat yleensä suuria, jolloin kymmenien tuhansien akkujen päiväkapasiteetilla on lähes mahdotonta valvoa, ettei seassa ole ”vääryntyyppisiä” akkuja. (Gaines 2014)

Uudessa lyijyakussa voi olla jopa 80 % kierrätettyä lyijyä ja muovia. Lyijyakkujen lyijystä kierrätetään Yhdysvalloissa yli 98 %. (Battery Council International 2012) Vastaava luku Suomessa on 73 % (Akkukierrätys Pb Oy 2014). Kierrätysprosessissa akku murskataan ja eri materiaalit erotellaan. Muovi puhdistetaan ja kierrätetään uudeksi muoviksi, josta voidaan tehdä vaikkapa uusia akkujen kuoria. Lyijy sulatetaan, epäpuhtaudet poistetaan ja lyijystä tehdään uusia levyjä uusiin akkuihin. Lyijyakkujen elektrolyytti, rikkihappo, voidaan kierrättää kahdella tavalla. Happo voidaan neutraloida ja käsitellä jätevedeksi tai happo voidaan käsitellä ja käyttää uusissa akuissa. Toinen vaihtoehto on valmistaa haposta natriumsulfaattia, kiteyttää se ja käyttää lasi-, tekstiili- ja puhdistusaineteollisuudessa. (Battery Council International 2012) Lyijyakkujen kierrätys on tehokasta, koska se on taloudellisesti kannattavaa. Kaikki akkuvalmistajat käyttävät samoja materiaaleja ja akun rakenne on aina samankaltainen, joten prosessi voidaan automatisoida. (Gaines 2014) Kuvassa 3.7 on kaavio lyijyakkujen kierrätysprosessista.

# Recycling For A Better Environment



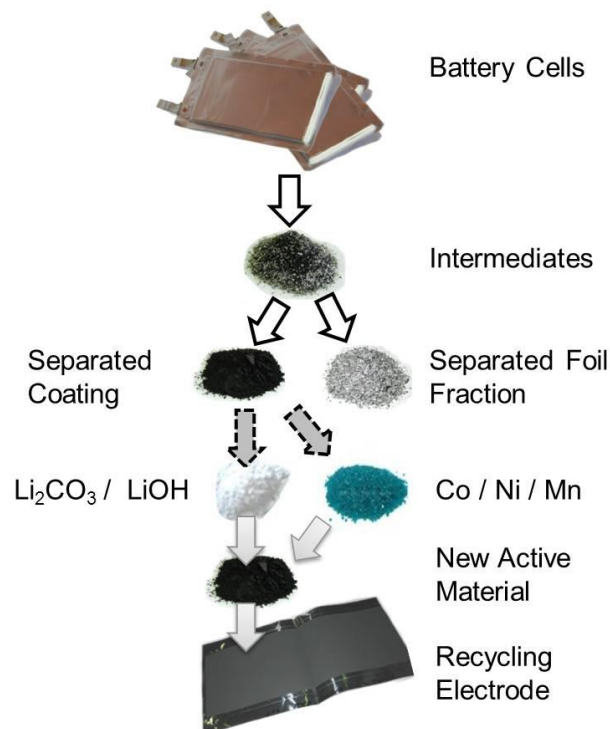
Kuva 3.7. Lyijyakkujen kierrätysprosessi. (Kvalälähe Battery Council International 2012)

Nikkelimetallihydridiakuista otetaan talteen nikkeli ja rauta ferronikkelinä, jota käytetään ruostumattoman teräksen valmistuksessa. Rautaa ja nikkeliä ei ole tarpeen erottaa toisistaan,



koska arvokkaalle yhdisteelle on suuret markkinat. Tässä prosessissa on kuitenkin hävitetty metallihydridin sisältämiä harvinaisia maametalleja. Maametallien kysynnän kasvu on johtanut prosessin kehittämiseen niiden talteen ottamiseksi. (Gaines 2014) Autovalmistaja Toyota on aloittanut yhteistyön loppuvuodesta 2010 nikkelin kierrättämiseksi uusien akkujen raaka-aineeksi (Toyota 2010).

Litiumioniakkujen kierrätys on monimutkaisempaa lyijy- tai nikkelimetallihydridiakkuihin verrattuna, koska yhdessä akussa on monia eri materiaaleja. Lyijyakussa on akun kokoon suhteutettuna isokokoisia lyijylevyjä pieni lukumäärä, kun taas litiumioniakussa on jopa satoja kennoja. Kennot on taas yhdistetty moduuleiksi ja koottu paketeiksi. Esimerkiksi Nissan Leafin akussa on 48 moduulia ja yhteensä 192 kennoa (Nissan 2014). Litiumioniakuissa on lisäksi elektroniikkaa sisäänrakennettuna. Etenkin katodin materiaali vaihtelee valmistajasta ja akun käyttötarkoituksesta riippuen. Litiumioniakkujen kehityksen myötä vaihtuvat materiaalit ja rakenteet vaikeuttavat kierrätysprosesseja. Menetelmiä on käytössä muutamia erilaisia, mutta ne ovat taloudellisesti kannattavia vain jos akku sisältää kobolttia ja nikkeliä. Akun sisältämä muovi ja elektrolyytti voidaan erottaa tai polttaa metallien sulatuksen energiaksi. Sulatusprosessissa alumiinin ja litiumin kierrätys ei ole taloudellisesti kannattavaa eikä energiatehokasta. Akut voidaan myös murskata, jolloin litium ja metallit voidaan ottaa talteen ja kierrättää. (Gaines 2014) Kuvassa 3.8 on kaavio eräästä litiumioniakkujen kierrätysprosessista, jossa otetaan talteen myös litium.



Kuva 3.8. Erään litiumioniakkujen kierrätysprosessin kaavio. (Kuvälähde: iPAT Institut für Partikeltechnik 2015)

Sähköajoneuvojen litiumioniakkujen kokonaiskustannuksista litiumin osuus on keskimäärin alle 3 %. Litium on mahdollista kierrättää täysin, mutta nykyisin kierrätetty litium käytetään muualla teollisuudessa kuin uusissa akuissa. Koska muidenkin kuin ajoneuvojen litiumioniakkujen kierrätys on vasta aluillaan, ei ole vielä yhtään pelkästään ajoneuvojen akkuihin erikoistunutta laitosta. Tulevaisuudessa kierrätyksen odotetaan olevan yksi suurimmista litiumin lähteistä. Samalla voitaisiin ehkäistä litiumin hinnanvaihtelua. Todennäköisesti akkuja tullaan kierrättämään ympäristö- ja lainsäädännöllisistä syistä, koska uudet mangaaniin ja fosfaattiin pohjautuvat akut sisältävät hyvin vähän tai eivät ollenkaan arvokkaita materiaaleja. (Kumar 2011)

#### 4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tavoitteena oli selvittää sähköajoneuvojen akkujen uusiokäyttömahdollisuuksia. Sähkö- ja hybridikäyttöisten ajoneuvojen akuissa on runsaasti uusiokäyttöpotentiaalia, koska akku poistetaan käytöstä kun kapasiteetista on jäljellä vielä 70 - 80 %. Polttomoottorien käynnistysakkuina käytettäviä lyijyakkuja ei voi uusiokäyttää suuria virtoja vaativissa sovelluksissa, koska yleensä ne poistetaan käytöstä juurikin siksi, että sisäinen resistanssi kasvaa liian suureksi, eli maksimivirta pienenee. Toisekseen lyijyakkujen kierrätys toimii hyvin ja akun materiaalit pystytään kierrättämään uusien akkujen valmistukseen.

Nikkelimetallihydridi- ja litiumakkuja voidaan uusiokäyttää muun muassa uusiutuvan energian varastointiin, sähköverkon kulutushuippujen tasoitukseen ja sähköautojen pikalatauksen energiavarastoina. Litiumakkujen odotetaan kestävän uusiokäyttökohteessa yhtä kauan kuin ajoneuvossa kun kestoikä mitataan purku-lataussykleinä. Uusiokäyttö voi myös pienentää akuston osuutta sähköajoneuvon hinnasta, koska akustolla on arvoa ajoneuvokäytön jälkeen.

Muutamia käytettyjä akkuja käyttäviä laitteistoja on jo esitelty ja laitteistojen kehityksessä on mukana myös autovalmistajia. Prototyypilaitteistojen kokoluokka vaihtelee kymmenistä kilowateista kahteen megawattiin. Uusia prototyyppisiä esitellään ja ensimmäisten kaupallisten laitteistojen arvioidaan tulevan markkinoille vuoden kuluessa.

Tulevaisuudessa sähköautojen määrä tulee kasvamaan ja sähköinen voimantuotto tulee raskaisiin ajoneuvoihin ja liikkuviin työkoneisiin, jolloin käytettyjä akkuja vaihdetaan uusiin nykyistä enemmän. Käytöstä poistetuissa akuissa tulee olemaan kapasiteettia jäljellä, koska esimerkiksi sähköauton toimintamatka lyhenee samassa suhteessa kuin akun kapasiteetti pienenee. Lisäksi latausaikoja halutaan lyhentää, jolloin hetkellinen verkosta otettava teho on nykyistä suurempi ja akkujen tulee kestää suurempia latausvirtoja. Myös kasvussa oleva energian pientuotanto asettaa haasteita sähköverkolle. Tuntuu kaikin puolin luontevalta hyödyntää käytettyjä akkuja vähentämään edellä mainittuja ongelmia, sillä mitä ilmeisimmin akkuja voidaan tällaisissa sovelluksissa uusiokäyttää. Lisäksi uusiokäyttöä puoltaa se, että nikkelimetallihydridi- ja litiumioniakkujen kierrätys ei ole ainakaan vielä kovin tehokasta.

Jatkotutkimusaiheita on runsaasti, koska aihe on vielä melko uusi ja akkujen uusiokäyttöön soveltuvat laitteistot ovat vielä prototyyppisiä ja ovat olleet käytössä vasta vähän aikaa. Tärkeimpiä asioita ovat ainakin käytettyjen akkujen kesto todellisuudessa, onko uusiokäyttö taloudellisesti kannattavaa, kun huomioidaan laitteiston hinta ja mitä muita uusiokäyttökohteita voisi olla jo esiteltyjen lisäksi.

## LÄHTEET

- Agubra, V., Fergus, J. 2013. Lithium ion battery anode aging mechanisms. *Materials* Vol. 6 Issue 4. S. 1310-1325.
- Akkukierrätys Pb Oy. 2014. [Viitattu 9.1.2015, saatavilla: <http://www.akkukierratyspb.fi/content/lyijyakut-kiertavat-hyvin>].
- Ambrose, H., Gershenson, D., Gershenson, A., Kammen, D. 2014. Driving rural energy acces: a second-life application for electric-vehicle batteries. *Environmental Research Letters*. Vol. 9, Num. 9. IOPscience.
- Batteries 2020. 2014. Higher residual value through second life application understanding. [Viitattu 28.4.2015, saatavilla: [http://www.batteries2020.eu/ovvw\\_phase3.html](http://www.batteries2020.eu/ovvw_phase3.html) ].
- Battery Council International. 2012. Battery Recycling. [Viitattu 13.5.2015, saatavilla: [http://batteryCouncil.org/?page=Battery\\_Recycling](http://batteryCouncil.org/?page=Battery_Recycling)].
- Battery University. 2015. Types of Lithium-ion. [Viitattu 27.4.2015, saatavilla: [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion) ].
- Berndt, D. 1997. Maintenance-free batteries 496 s. Research Studies Press, Taunton.
- Bright Hub Engineering. 2011. Lithium Titanate Batteries Explained. [Viitattu 27.4.2015, saatavilla: <http://www.brighthubengineering.com/power-generation-distribution/104498-lithium-titanate-batteries-explained/> ].
- Burke, A. & Miller, M. 2013. Life cycle Testing of Lithium Batteries for Fast charging and Second-use Applications. Conf. Pub. IEEE EVS27. Barcelona, Spain. Nov. 17 - 20. S. 1 - 10.
- Carbone, R. 2009. Grid-connected photovoltaic systems with energy storage. Conf. Pub. IEEE ICCEP. June 9 - 11. S. 760 - 767.
- Ciccarelli, F., Del Pizzo, A., Iannuzzi, D. 2013. An ultra-fast charging architecture based on modular multilevel converters integrated with energy storage buffers. Conf. Pub. IEEE EVER, Monte Carlo, Monaco. March 27 - 30. S. 1 - 6.
- Cobb, J. 2014. Global Plug-in Car Sales Now Over 600,000. HybridCars.com. [Viitattu 21.1.2015, saatavilla: <http://www.hybridcars.com/global-plug-in-car-sales-now-over-600000/>].
- Colthorpe, A. 2015. Bosch, BMW, Vattenfall resurrect EV batteries for "second life" as large-scale energy storage. PV-Tech. [Viitattu 18.2.2015, saatavilla: <http://storage.pv-tech.org/news/bosch-bmw-vattenfall-resurrect-more-ev-batteries-for-second-life-as-large-s>].
- Colthorpe, A. 2014. Storage system powered by used Nissan batteries installed at Japanese solar farm. PV-Tech. [Viitattu 27.11.2014, saatavilla: [http://www.pv-tech.org/news/battery\\_storage\\_powered\\_by\\_used\\_nissan\\_leaf\\_batteries\\_installed\\_at\\_japanese](http://www.pv-tech.org/news/battery_storage_powered_by_used_nissan_leaf_batteries_installed_at_japanese)].

- De Clercq, G. 2014. French group develops mass electric charging stations. Reuters. [Viitattu 1.12.2014, saatavilla: <http://www.reuters.com/article/2014/09/18/electricity-autos-batteries-france-idUSL6N0RJ3H620140918>]
- Di Zhu, Yanzhi Wang, Younghyun Kim, Naehyuck Chang, Pedram, M. 2013. Designing a residential hybrid electrical energy storage system based on the energy buffering strategy. Conf. Pub. IEEE CODES+ISSS, Montreal, Canada. Sept. 29 - Oct. 4. S. 1 - 9.
- Ecoult. 2015. UltraBattery. [Viitattu 24.3.2015, saatavilla: <http://www.ecoult.com/technology/ultrabattery/>].
- Einhorn, M., Permann, R., Kral, C., Conte, F., V., Guertlschmid, W., Blochberger, T., Kumpusch, R., Fleig, J. 2011. Current equalization of serially connected battery cells for a possible second use application. Conf. Pub. IEEE VPPC, Chicago. Sept. 6 - 9. S. 1 - 5.
- Engerati. 2015. Grid storage brings second life to electric vehicle batteries. [Viitattu 18.2.2015, saatavilla: <http://www.engerati.com/article/grid-storage-brings-second-life-electric-vehicle-batteries>].
- Gaines, L. 2014. The future of automotive lithium battery recycling: Charting a sustainable course. Sustainable Materials and Technologies Vol. 1 - 2. S. 2 - 7.
- General Motors. 2012. GM, ABB Demonstrate Chevrolet Volt Battery Reuse Unit. [Viitattu 4.2.2015, saatavilla: [http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2012/Nov/electrification/1114\\_reuse.html](http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2012/Nov/electrification/1114_reuse.html)]
- Huang, X. & Jiang, B. 2011. Research on Lithium battery energy storage system in wind power. Conf. Pub. IEEE ICECE, Yichang, China. Sept. 16 - 18. S. 1200 - 1203.
- Indy Power Systems. 2012. Battery storage systems. [Viitattu 27.11.2014, saatavilla: [http://www.indypowersystems.com/?post\\_type=portfolio&p=39&gallery=portfolio](http://www.indypowersystems.com/?post_type=portfolio&p=39&gallery=portfolio)].
- iPat Institut für Partikeltechnik. 2015. Recycling of Lithium-Ion Batteries. Technische Universität Braunschweig. [Viitattu 13.5.2015, saatavilla: <http://www.ipat.tu-bs.de/en/forschung/arbeitsgruppen/elektrochemische-speichertechnik/recyclingrecycling>].
- Keeli, A. & Sharma, R. K. 2012. Optimal use of second life battery for peak load management and improving the life of the battery. Conf. Pub. IEEE IEVC. Greenville, USA. March 4 - 8. S. 1 - 6.
- Knowles, M. J. & Morris, A. 2014. Impact of Second Life Electric Vehicle Batteries on the Viability of Renewable Energy Sources. British Journal of Applied Science & Technology 4 (1). S. 152-167.
- Kuhrau, D. 2014. Reusing e-bike batteries for powering homes. WEMAG. [Viitattu 27.11.2014, saatavilla: <http://ees-magazine.com/reusing-e-bike-batteries-for-powering-homes/>].
- Kumar, A. 2011. The lithium battery recycling challenge. Waste Management World. Vol. 12, Issue 4.

- Lacey, G., Putrus, G., Salim, A. 2013. The use of second life electric vehicle batteries for grid support. Conf. Pub. IEEE EUROCON, Zagreb, Croatia. July 1 - 4. S. 1255 - 1261
- Lih Wen-Chen, Jieh-Hwang Yen, Fa-Hwa Shieh, Yu-Min Liao. 2012 Second use of retired battery packs from electric vehicles: Technoligial challenges, cost analysis and optimal business model. Conf. Pub. IEEE IS3C, Taichung, Taiwan. June 4 - 6. S. 381 - 384.
- Marra, F., Traholt, C., Larsen, E., Qiuwei Wu. 2010. Average behavior of battery-electric vehicles for distributed energy studies. Conf. Pub. IEEE PES ISGT Europe, Gothenburg, Sweden. Oct. 11 - 13. S. 1 - 7.
- Mukherjee, N & Strickland, D. 2014. Second life battery energy storage systems: Converter topology and radundancy selection. Conf. Pub. IET PEMD, Manchester, UK. April 8 - 10. S. 1 - 6.
- Mukherjee, N & Strickland, D. 2015. Control of Second-Life Hybrid Battery Energy Storage System Based on Modular Boost-Multilevel Buck Converter. IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 62, Issue 2. S. 1034 - 1046.
- Nasdaq. 2015. Crude Oil Brent. [Viitattu 23.4.2015, saatavilla: <http://www.nasdaq.com/markets/crude-oil-brent.aspx?timeframe=20y> ].
- Nissan. 2014. Nissan Leaf technical specifications. [Viitattu 21.5.2015, saatavilla: [http://www.nissan.co.uk/dam/services/gb/brochure/Nissan\\_Leaf\\_technical\\_specs.pdf](http://www.nissan.co.uk/dam/services/gb/brochure/Nissan_Leaf_technical_specs.pdf) ].
- Salameh Z. M. & Kim, B. G. 2009. Advanced lithium polymer batteries. Conf. Pub. IEEE PES'09, Calgary.
- Stan, A. I., Swierczynski, M., Stroe, D. I., Teodorescu, R., Andreasen, S. J. 2014. Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications — An overview. Conf. Pub. IEEE OPTIM, Bran, Romania. May. 22 - 24. S. 713 - 720.
- Streng, H. 2012. Old electric car batteries can be reused on the poer grid. ABB. [Viitattu 24.11.2014, saatavilla: <http://www.abb-conversations.com/2012/11/old-electric-car-batteries-can-be-reused-on-the-power-grid> ].
- Sumitomo Corporation. 2014. World's First Large-Scale Power Storage System Made From Reused EV Batteries Completed in Japan. [Viitattu 4.2.2015. saatavilla: <http://www.sumitomocorp.co.jp/english/news/detail/id=27673>].
- Tolen, S. 2012. Energy Router™ integrates recycled batteries for grid storage. Indy Power Systems. [Viitattu 27.11.2014, saatavilla: <http://www.indypowersystems.com/?p=395>].
- Toyota. 2010. TMC, 3 Companies Start Joint Battery-to-battery Recycling. [Viitattu 9.1.2015, saatavilla: <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/327361/>].
- U.S. Energy Information Administration. 2015. Annual Energy Outlook 2015.
- Viswanathan, V. V. & Kinter-Meyer, M. 2011. Second Use of Transportation Batteries: Maximizing the Value of Batteries for Transportation and Grid Services. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 60, Issue 7. S. 2963 - 2970.

- Volvo Trucks. 2012. Volvo is ready for Euro 6. [Viitattu 12.5.2014, saatavilla: <http://www.volvotrucks.com/trucks/global/en-gb/trucks/environment/Pages/Euro6.aspx> ].
- Wolfs, P., Gunathilake, C., Martino, P., Khanna, I. 2011. Distributed renewables and battery storage for the support of the edge of the rural grid. IEEE AUPEC, Brisbane, Australia. Sept. 25 - 28. S. 1 - 6.