



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

TYÖKONEIDEN SÄHKÖISET ENERGIAVARASTOT **Electrical Energy Storages of Off-Road Machines** Janne Turunen

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto (Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT)

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Janne Turunen

Työkoneiden sähköiset energiavarastot

2019

Diplomityö.

81 sivua, 20 kuvaa, 3 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen, Tutkijaopettaja Lasse Laurila

Hakusanat: Akkutekniikat, energiavarasto, litium-ioniakku, akun malli

Keywords: Battery technologies, energy storage, lithium-ion battery, battery model

Diplomityössä tavoitteena oli tarkastella nykyisten sähköisten energiavarastojen ominaisuuksia erityisesti akkuihin keskittyen. Alitavoite oli mitoitaa litium-ioniakku liikkuvaan työkoneeseen yhden työsyklin perusteella. Työ alkaa laajalla kirjallisuuskatsauksella eri akkutyypin ominaisuuksista. Yhteistuloksina pohdittiin eri akkutekniikoiden soveltuvuutta suuriin akkukäyttöihin, muun muassa liikkuviin työkoneisiin ja sähköautoihin. Huomiota kiinnitettiin myös superkondensaattoreihin, koska niiden yhteistoiminta akkujen kanssa saattaa olla oikea ratkaisu sähköisiin liikkuviin ratkaisuihin. Lisäksi sivutaan akkuihin tarvittavien raaka-aineiden riittävydestä ja akun valmistuksen hiilijalanjäljestä.

Lopuksi sovitettiin litium-ioniakku erään työsyklin perusteella liikkuvaan työkoneeseen, sekä simuloitiin tilannetta Matlab Simulinkin avulla käyttäen Matlabin valmista akkumallia. Lopuksi testattiin akun sovitusta askelvasteella ja työsyklillä ja arvioitiin simuloinnin tuloksia. Tässä yhteydessä mietittiin myös akun mitoitusta kyseiseen kohteeseen.

Lopputuloksena saatiin valituksi muutama hyvä vaihtoehto nykyisistä akkutyypeistä liikkuville työkoneille. Lisäksi saatiin työkoneen akun mitoituksen tulos ja päätelmä.

ABSTRACT

LUT-University (Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT)

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Janne Turunen

Electrical Energy Storages of Off-Road Machines

2019

Master's Thesis.

81 pages, 20 figures and 1 appendix

Examiner: Professor Juha Pyrhönen, associate professor Lasse Laurila

Keywords: Battery technologies, energy storage, lithium-ion battery, battery model

Hakusanat: Akkutekniikat, energiavarasto, litium-ioniakku, akun malli

The goal of this Master's thesis was to take a look at the present electric energy storages, with the main focus on batteries. Another goal was to fit the lithium-ion battery into mobile machinery based on one specific work cycle. This was done by studying the properties of different battery types. As joint results, the suitability of different battery technologies for large battery applications, for example mobile machinery and electric cars, was discussed. Supercapacitors were also discussed in one section because they working together with batteries may be the right solution for electrical mobile solutions. The sufficiency of raw materials and carbon footprint were also briefly touched upon.

Finally, a lithium-ion battery was fitted into a specific mobile machine work cycle on the basis of a work cycle, and this was simulated with Matlab Simulink using a Matlab's battery model. Finally, the battery fit was tested with a step response and a work cycle, and the results of the simulation were evaluated. At this point, consideration was given to the fit of the battery for the object in question.

As a result, a few good alternatives for the current battery types for mobile machinery were selected. In addition, the result and conclusion of the fit of the machine battery were obtained.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1	JOHDANTO.....	8
2	SÄHKÖISTEN ENERGIAVARASTOJEN KÄSITTEITÄ	10
2.1	Sovelluskohteet ja niiden asettamat vaatimukset	11
2.1.1	Täyssähköiset sovelluskohteet.....	12
2.1.2	Stationääriset sovelluskohteet.....	13
2.2	Akkujen peruskäsitteet ja termit.....	16
2.2.1	Ominaisenergia, energiatiheys ja ominaisteho	16
2.2.2	Kuormitetun akun napajännite.....	17
2.2.3	Sisäresistanssi	18
2.2.4	Käyttöikä	18
2.2.5	Lataus	20
2.2.6	Itsepurkautuminen	21
2.2.7	Syväpurku.....	22
2.2.8	Peukert-efekti.....	23
2.2.9	Muisti-ilmiö.....	24
2.2.10	Akun osat.....	24
3	SÄHKÖISET ENERGIAVARASTOT	26
3.1	Lyijyakut.....	27
3.1.1	Lyijyhappoakku	29
3.1.2	Suljettu lyijyakku (VRLA-akku).....	29
3.2	Nikkeliakut	30
3.2.1	Nikkeli-kadmiumakku (NiCd).....	30
3.2.2	Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH)	31
3.3	Litium-ioniakut.....	33
3.3.1	Litium-kobolttioksidiakku (LiCoO ₂ /grafiitti).....	35
3.3.2	Litium-polymeeriakku (LiPo) (LiCoO ₂ /grafiitti)	36
3.3.3	Litium-rautafosfaattiakku (LiFePO ₄ /grafiitti)	38
3.3.4	Litium-mangaanioksidiakku (LiMn ₂ O ₄ /grafiitti)	40
3.3.5	Litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidiakku (LiNiCoMnO ₂ /grafiitti).....	41
3.3.6	Litium-titanaattiakku (NMC/Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ tai X/Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)	42
3.3.7	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiakku (LiNiCoAlO ₂ /grafiitti)	44

3.4	Litium-ioniakkujen yhteenveto.....	45
3.1	Eri akkutekniikoiden yhteenveto	46
3.2	Superkondensaattorit	48
3.2.1	Litium-ionikondensaattori	52
3.3	Tulevaisuuden energiavarastot	55
4	RAAKA-AINE JA YMPÄRISTÖ	57
4.1	Kierrätys	58
5	AKUN MALLI JA SIMULOINTI	59
5.1	Dynaamisen mallin selvitys.....	59
5.2	Akun sisäresistanssi.....	60
5.3	Purkukäyrä.....	60
5.4	Akun mallin periaatteellinen lohkokaavio.....	61
5.4.1	Purkuyhtälö.....	63
5.4.2	Latausyhtälö	64
5.5	Parametrien määrittäminen.....	65
5.6	Mallin verifiointi	66
5.7	Akun simulaatio askelvasteella	66
5.8	Akun koon mitoitus käyttökohteen mukaan.....	68
5.9	Akun mitoitus	68
5.10	Simuloinnin tulokset.....	71
6	YHTEENVETO	74
	LÄHTEET	76

Liitteet

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	eksponentiaalinen jännite
B	eksponentiaalinen kapasitanssi
C	kapasiteetti
E	energia
E_0	akun vakiojännite
E_{akku}	akun purku- ja latausyhtälöiden lohkon tuottama jännite
E_{eks}	akun eksponentiaalisen alueen lopun jännite
E_{lataus}	akun latausjännite
E_{nor}	akun normaalialueen lopun jännite
E_{purku}	akun purkujännite
$E_{\text{täysi}}$	täyteen ladatun akun jännite
I	virta
i	virta
i^*	matalataajuinen dynaaminen virta
it	akun purettu kapasiteetti
K	polarisaatiovakio
n	pyörimisnopeus
n	Peukert -potenssi
P	teho
P_{keski}	keskiteho
Q	akun suurin varaus
Q_{eks}	akun eksponentiaalisen alueen lopun varaus
Q_{nor}	akun normaalialueen lopun varaus
Q_n	nimellisvaraus
R	resistanssi
R_0	sisäinen ohminen resistanssi
rpm	kierrosnopeus
T	vääntömomentti
T	jakson aika
t	aika
t_{dc}	todellinen akun käyttöaika purkutilanteessa
t_0	nimellinen purkuaika
U	jännite
U_{akku}	akun napajännite

Kreikkalaiset kirjaimet

Ω	kulmanopeus
η_a	aktiivointipolarisaatiosta
η_c	konsentraatiopolarisaatiosta

Lyhenteet

AC	vaihtosähkö
AGM	lyijyakun eräs valmistustekniikka
ATCO	amorfinen tinakomposiittioksidi
C_2H_3N	asetonitriili

DC	tasasähkö
DCR	tasavirtaresistanssi
DOD	purkusyvyys (Depth of Discharge)
EDLC	sähköinen kaksikerroskondensaattori (Electric Double-Layer Capacitor)
LAMO	litium-alumiini-mangaanioksidi
Li-C	litium-ionikondensaattori
LiCoO ₂ (LCO)	litium-kobolttioksidi
LiFePO ₄ (LFP)	litium-rautafosfaatti
Li-ion (Li ⁺)	litium-ioni
LiMn ₂ O ₄ (LMO)	litium-mangaanioksidi
LiNiCoMnO ₂ (NMC)	litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidi
LiNiCoAlO ₂ (NCA)	litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi
LiPF ₆	litium-suolaelektrolyytti
LiPo	litium-polymeeri
LNMO	litium-nikkeli-mangaanioksidi
Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ (LTO)	litium-titanaatti
MO	metallioksidi
NiCd	nikkeli- kadmium
NiMH	nikkeli-metallihydridi
PAN	polyakrylinitriili
PE	polyeteeni
PEM	protoninvaihtokalvo (Proton exchange membrane)
PEO	polyetylenioksidi
PMMA	polymetyylimetakrylaatti
PP	polypropeeni
PVdF	polyvinylideenifluoridi
P2X	sähkön varastointitekniikka kemikaalina (Power to X)
P2X2P	sähkön varastointitekniikka kemikaalina ja palautus sähköksi (Power to X to Power)
SMES	magneettienergiavarasto
SOC	varaustila
SPE	polymeerielektrolyytti
UPS	keskeytymätön tehon syöttö (Uninterruptible Power Supply)
VRLA	suljettu lyijyakku (Valve Regulated Lead Acid) tai SLA, (Sealed Lead Acid)

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos ajaa ihmiskuntaa yhä ahtaammalle. Autojen ja liikkuvien työkoneiden sähköistyksestä toivotaan merkittävää helpotusta niiden aiheuttamien ilmastopäästöjen vähentämisessä. Tuuli- ja aurinkosähkön hinnan dramaattinen lasku maailmassa tasolle 15 €/MWh ja Suomessa alle 30 €/MWh kannustaa voimakkaasti investoimaan uusiutuvaan sähkөөn. Aurinkovyöhykkeen parhailla paikoilla odotetaan aurinkosähkön hinnan painuvan tasolle 6 €/MWh. Samalla näiden tuotantomuotojen ajoittaisuusongelma syvenee, joten tarvitaan yhä enemmän erilaisia keinoja sähköenergian varastointiin. Akut ovat yksi näistä, mutta ns. Power to X (P2X) tekniikka tarjoaa mahdollisuutta varastoida sähköä kemiallisessa muodossa esim. vetynä tai metaanina. Akku toimii hyvin lyhytaikaisena sähkövarastona, metaani vuorostaan pitkäaikaisena varastona. Akun energiahyötysuhde voi olla korkea, jopa 95 %, ja Power to X to Power (P2X2P) tekniikan hyötysuhde vastaavasti vain enintään noin 40 %. Sähkön konversio vedestä valmistettavaksi vetyvarastoksi tarjoaa noin 80 % hyötysuhdetta. Metaania saadaan noin 60 % hyötysuhteella. Jos tarvitaan pitkiä hiilivetyjä, menee hyötysuhde yhä alemmas, noin 50 %:iin. Akkujen yleisiä ongelmia ovat kuitenkin edelleen pieni ominaisenergia, pienet lataus- ja purkutehot, raaka-aineiden, erityisesti koboltiraaka-aineen niukkuus, akkujen lyhyt kalenteri- ja sykli-ikä sekä valmistuksen suuret ilmastopäästöt. /37/

Työkoneet vaativat usein erilaista energiavarastoa kuin sähköautot. Hybridityökoneessa akun tulee suuren energian asemesta kyetä tarjoamaan suurta tehoa, jolloin akun tyyppi usein muuttuu. Esimerkiksi litiumtitanaattiakku (LTO, jossa katodimateriaalina on yleensä LiMn_2O_4 tai vaihtoehtoisesti myös NMC ja anodin grafiitti on korvattu $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ kiteillä) tarjoaa pienemmän ominaisenergian kuin NMC-akku ($\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{O}_2$ katodi/C anodi) tai NCA-akku ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ katodi/C anodi), mutta se kestää suurta tehoa kumpaankin suuntaan. /11/, /12/

Työn tavoitteena oli selvittää eri akkutekniikoita ja etupäässä vartenotettavia vaihtoehtoja suurempia työkoneita silmällä pitäen. Työssä käsitellään myös pintapuolisesti superkondensaattoreita. Toinen tavoite oli mitoittaa akusto erään työsyklin perusteella liikkuvaan hybridityökoneeseen.

Akuista esitellään perusermistöä ja akkujen ominaisuuksia lähinnä kapasiteetin, tehonsyötökyvyn, latauksen ja kestoian näkökulmasta. Työssä esitellään eri akkutekniikoita ja keski-

tytään vartenotettaviin vaihtoehtoihin isoja käyttökohteita ajatellen. Energiavarastoa voidaan hyödyntää useissa sovelluksissa ja sovelluskohteiden määrä kasvaa jatkuvasti. Akkujen ja muidenkin energiavarastojen on pystyttävä vastaamaan sovelluskohteiden vaatimuksiin.

Sähköisten energiavarastojen tarve kasvaa koko ajan. Sähkön tuotantoa tehdään nykyään hajautetusti, ja käyttösovelluskohteet muuttuvat jatkuvasti. Tämä tarkoittaa sitä, että energiavarastojen tarve nousee koko ajan. Pelkästään hybridi- ja täyssähköautojen läpimurto edellyttää räjähdysmäistä kasvua sähköisten energiavarastojen valmistukseen. Tähän liittyy kuitenkin ongelmia. Tärkeimmissä autojen akkutyypeissä sovelletaan yhtenä osana kobolttia, josta esiintyy merkittävää resurssiniukkuutta. Siksi esimerkiksi NMC-akuista on kehitetty kobolttia säästäviä versioita.

2 SÄHKÖISTEN ENERGIAVARASTOJEN KÄSITTEITÄ

Sähköisen energiavaraston valintaan tiettyyn käyttökohteeseen vaikuttaa moni asia. Valinnan voisi tehdä tehontarpeen ja energiantarpeen perusteella. Energian varastoinnille tulee jatkuvasti uusia sovelluskohteita. Nykyään energiaa halutaan käyttää tehokkaasti, taloudellisesti ja ympäristöystävällisesti suorituskyvystä tinkimättä. Sähköä olisi järkevää tuottaa päästöittä esimerkiksi ydinvoimaloissa tai tuulivoimaloissa, mahdollisesti siirtää ja varastoida energiavarastoon. Energiavarastoihin luetaan kaikki laitteet, joihin voidaan varastoida energiaa jossakin muodossa, kuten esimerkiksi kineettistä energiaa vauhtipyörään.

Varhaiset akut ovat olleet käytössä jo ennen 1800-luvun puoliväliä, jolloin Euroopassa ja Yhdysvalloissa kehiteltiin ensimmäiset sähköautot. Akkujen syntymänä pidetään Italianlaisen Alessandro Voltan keksimää Voltan paria, jossa oli suolavedessä kuparilevy ja sinkkilevy pahvilla eristettynä toisistaan. Lyijyaku on ollut markkinoilla hyvin pitkään. Sen esitteli vuonna 1859 Gaston Planté. Michael Faraday loi sähkömoottorin peruseriaatteen ymmärrettyään sähkömagneettisen induktioilmion vuonna 1831, ja vuonna 1832 Pariisissa esiteltiin jo toimiva sähkömoottori. Nämä kehitykset loivat perustan ensimmäisille sähköautoille, jotka kuitenkin jäivät pois käytöstä 1900-luvun vaihtuessa. Suurin syy tähän oli helppokäyttöisen polttomoottorin tulo markkinoille. Tuolloin akuista saatava energiakapasiteetti ei pystynyt millään kilpailemaan polttoaineen energiakapasiteetin kanssa, vaikka autojen polttomoottorit yhä käyttävät energiaa varsin tuhlailevasti. Tavallinen perheauto tarvitsee tyypillisesti noin 15 kWh liikkuakseen maantiellä 100 km. Tällä matkalla käytetään kuitenkin tyypillisesti 60 ... 80 kWh polttoaineen energiaa, joten kokonaishyötysuhde jää selvästi alle 25 %:n.

Sähköautot eivät ole uusi keksintö, vaan niiden historia juontaa yli sadan vuoden takaa. Polttomoottorit syrjäyttivät tuolloiset sähköautot, koska niillä saatiin huomattavasti paremmat käyttöominaisuudet. Nyt meillä on eri kriteerit kuin sata vuotta sitten. Jos sähköautot olisivat pysyneet markkinoilla, voisi akkujen kehitys olla paljon pidemmällä kuin mitä se on nyt. Nykyään akut ovat kehittyneet mm. kannettavan elektroniikan myötä ja vasta aivan viime aikoina sähköautopioneerien kuten Teslan vaikutuksesta. Tesla on jopa valinnut oman akkutyypin autoihinsa. Kun muut autotehtaat soveltavat NMC-akkuja, käyttää Tesla NCA-akkuja.

Ihmiset haluavat kannettavia tietokoneita, puhelimia ja paljon erilaista kannettavaa elektroniikkaa. Tämä on kasvattanut pienten akkujen markkinoita ja siten myös kehitystä. Tämänpäiväisten akkujen kehitystyössä pyritään parantamaan energiatiheyttä. Turvallisuus, hinta ja akun pitkäaikainen kesto ovat myös tärkeitä ominaisuuksia. Viimeisimpien vuosien aikana kehitys on suuntautunut myös suurempien kokoluokkien akkuihin, eikä pelkästään kulutuselektroniikan akkuihin (kuten älypuhelimien).

Ladattaville akuille on ns. akunhallintajärjestelmä, mikä huolehtii akun tilasta ja hyvinvoinnista. Akun lataaminen, purkaminen ja lämpötilan tarkkailu suoritetaan mikroprosessorin avulla, ja näin saadaan akkujen käyttöön tarvittava pitkä kestoikä ja turvallisuus sekä akun mahdollinen akuutti hajoaminen estetyksi.

2.1 Sovelluskohteet ja niiden asettamat vaatimukset

Erilaisia sähköisten energiavarastojen käyttökohteita voidaan jaotella monella tavalla. Pääpiirteisen jaottelun voisi tehdä liikkuvien ja stationääristen sovelluskohteiden välillä. Näillä on hyvin erilaiset kriteerit. Liikkuvissa kohteissa yleisin tai ainakin tunnetuin sovellus on tietenkin sähköauto, kun ei huomioida pienelektroniikkaa. Stationäärisistä sovelluksista mainitaan vaihtoehtoja sekä mietitään energiavarastojen soveltuvuutta niihin. Sähköistetyt liikkuvat työkoneet voidaan jaotella kahteen pääosaan, hybridi- ja täyssähköiset työkoneet. Liikkuvilla työkoneilla tarkoitetaan raskaita sovelluskohteita, kuten esimerkiksi metsäkoneita, kaivoslastaajia ja satamatyökoneita.

Hybridikäyttöiset liikkuvat sovelluskohteet ovat energiavarastojen tärkeimpiä käyttökohteita, joista yleisin on hybridauto. Hybridillä tarkoitetaan tässä yhteydessä kahdella eri moottorilla toteutettua yhdistelmää, esimerkiksi sähkömoottorin ja bensiinimoottorin yhdistelmää. Hybridin tarkoituksena on pienentää polttoaineen kulutusta ja päästöjä sekä pienentää tarvittavan polttomoottorin kokoa. Kuitenkaan hybridi ei vaikuta oleellisesti ajokokemukseen käyttäjän näkökulmasta verrattuna normaaliin polttomoottorikäyttöiseen kulkuneuvoon. Täyssähköinen kulkuneuvo eroaa kuitenkin polttomoottorikäyttöisestä. Hybridikulkuneuvossa sähkömoottorin tarkoitus on toimia kulutushuippujen, tyhjäkäyntitilanteiden, pienien nopeuksien ja energian takaisin keräämisen alueilla. Tämä kuitenkin vaihtelee sovelluskohteen mukaan. Ns. lataushybrideissä käytetään sen verran suurta akkukapasiteettia, että autolla pystyy ajamaan tyypillisesti muutaman kymmenen kilometriä pelkästään akku-

käyttöisenä. Näissä autoissa akun koko on tyypillisesti luokkaa 10 kWh, kun sen täyssähköautossa pitää olla 30 ... 100 kWh, jotta autolle saadaan jollain lailla hyväksyttävä toimintamatka.

2.1.1 Täyssähköiset sovelluskohteet

Täyssähköisiä liikkuvia sovelluskohteita ovat tyypillisesti sähköautot, trukit ja erilaiset liikkuvat sähköiset työkonet esimerkiksi tehtaissa. Täyssähköiset koneet ovat riippuvaisia latauspisteistä, sillä ne on aina käyttötauon aikana järkevää ladata. Näissäkin pyritään ottamaan talteen potentiaalienergia ja kineettinen energia. Täyssähköiset kohteet ovat taloudellisia käyttää, lähes äänettäviä eivätkä tuota paikallisia pakokaasupäästöjä. /2/

Sähköautot eivät tuota lähipäästöjä ja auttavat siten parantamaan suurkaupunkien huonoa ilman laatua varsinkin, jos sähkö tuotetaan ilmastoneutraalisti. Öljyn tuotanto hiipuu jossakin vaiheessa ja polttomoottorien fossiiliset hiilipäästöt ovat osasyynä maapallon ilmaston lämpenemiseen. Nämä asiat ovat saaneet sähköautojen kehitykseen vauhtia, mutta suurimpana ongelmana on edelleen sähköinen energiavarasto. Sähköisen energiavaraston pieni kapasiteetti rajoittaa monesti käyttöä, jolloin polttomoottoriauton pitkää toimintamatkaa tai vastaavaa tehoa ei saada, vaikka sähkömoottorin hyötysuhde on huomattavasti parempi kuin polttomoottorin. /2/

Polttomoottorissa kuluu lämmöksi suurin osa energiasta (60 – 95 %), jota vastoin sähkömoottorin häviöt ovat autonmoottorien teholuokissa tyypillisesti välillä 5 – 20 %. Toisaalta sähkön perinteisessä voimalaitostuotannossa tulee hukkalämpöä ja kokonaispäästöjä arvioitaessa on otettava huomioon, miten sähkö on tuotettu. Jos sähkö on tuotettu hiililauhteella, ei sähköauton käyttäminen vähennä ilmastopäästöjä, vaan voi jopa kasvattaa niitä. Toki polttomoottorien tarvitseman polttoaineen tuotannon päästöt pitäisi ottaa laskuihin mukaan. Suomessa sähkö tuotetaan nykyisin keskimäärin 165 g/kWh hiilidioksidipäästöin. Hiililauhteen tapauksessa päästö voi olla luokkaa 800 g/kWh tai jopa 1 kg/kWh. Hiililauhtesähköä ei tule käyttää sähköautoiluun. Jos sähkö sen sijaan on tuotettu ilmastoneutraalisti ydin-, vesi-, aurinko-, tuuli- tai aaltovoimalla, jäävät sähköautoa rasittamaan auton valmistuksen aiheuttamat päästöt. Tällä hetkellä tyypillinen hiilidioksidipäästö on jopa 150 kg CO₂ akun yhtä kWh:a kohti. Näin bensa-autolla saa ajaa pitkään, ennen kuin sen päästöt ylittävät ilmastoneutraalisti tuotetulla sähköllä liikkuvan sähköauton. /2/

Liikuteltava energiavarastojärjestelmä voidaan sijoittaa esimerkiksi rekan perävaunuun tai konttiin. Tällaiseen ratkaisuun mahtuu suuri energiavarasto, josta saadaan suuri teho. Konttia voidaan käyttää tilapäisenä UPS-järjestelmänä (Uninterruptible Power Supply), vaikkapa rakennustyömailla, missä ei ole sähköä saatavilla. Helpon ja nopean toiminnan kannalta ratkaisusta on tehtävä toimintavalmis. /2/

Kontin sisällä on kaikki tarpeellinen ja rajapintana toimii vain johtojen liitos. Yleensä kontista on saatavissa 400 V verkkoon sopiva jännite. Huipputehon suuruusluokka on megawatteja ja energiakapasiteettia on satoja kilowattitunteja. Kontin sisällä on superkondensaattoreita, akkuja, tehoelektroniikkaa ja muut tarvittavat laitteet. Superkondensaattoreista saadaan huipputeho vähäksi aikaa, akustosta saadaan pitempi kestoinen jatkuva teho ja tehoelektroniikka huolehtii muun muassa oikeanlaisesta lähtöjännitteestä. /2/

Kontti on rakennettava energiavarastoa ja muuta laitteistoa ajatellen. Ulkoisilta rasituksilta, kuten kosteudelta, liialta, pölyltä, liian kylmältä tai kuumalta ilmalta, on suojauduttava. Oikea lämpötila saadaan tuulettimilla ja lämmityksellä. Väärä lämpötila heikentää akuston ja kondensaattoreiden toimivuutta sekä elinikää. Kontin on myös oltava turvallinen ympäristöön nähden niin sähköisesti kuin päästöiltään. Vikatilanteissa kontin tulee osata automaattisesti kytkeytyä pois syöttämästään verkosta, ja konttia olisi hyvä voida hallita myös etäkäyttönä. /2/

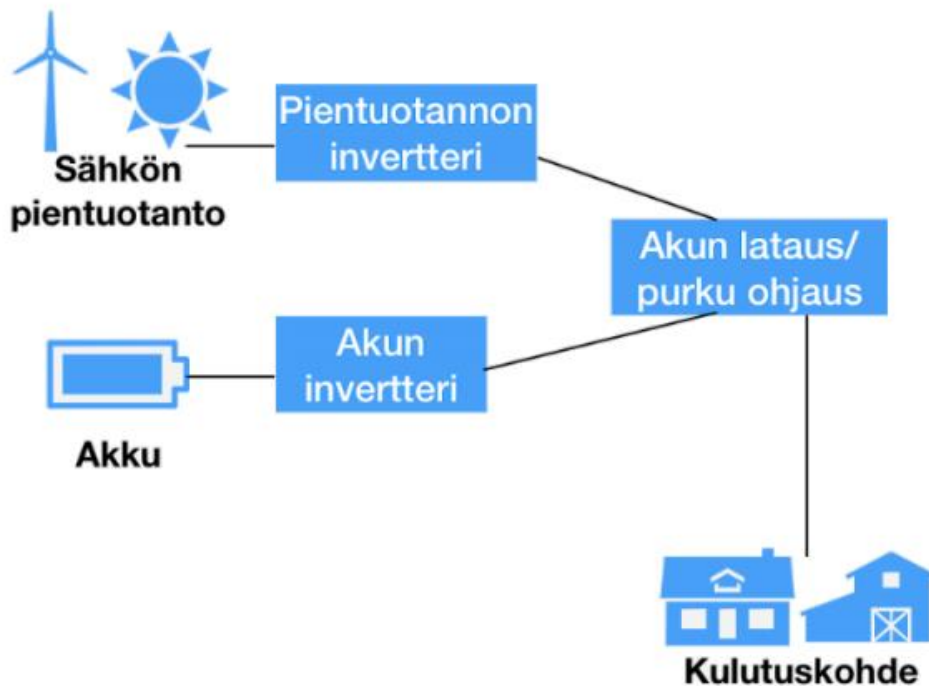
2.1.2 Stationääriset sovelluskohteet

Stationäärisiä sovelluskohteita energiavarastoille ovat muun muassa saarekekäytön apuna oleva energiavarasto, UPS, satamanosturi, tuuli-, aurinko- ja aaltovoimaloitten yhteydessä toimiva energiavarasto sekä kulutusyksiköissä toimiva energiavarasto. Stationääristen sovelluskohteiden energiavaraston vaatimukset poikkeavat liikkuvista kohteista. Energiavaraston koko ja paino eivät ole enää niin keskeisessä asemassa. Kokonaiskustannukset täytyy ottaa huomioon tarkkaan energiavarastoa valittaessa. Tähän vaikuttavat energiavaraston valmistuskustannukset, elinikä, huoltokustannukset, hyötysuhde ja ympäristöolosuhteiden vaatimukset. /3/, /4/

Hajautetun sähköntuotannon ja uusiutuvien energianlähteiden käytön myötä saarekekäytöt kasvattavat asemaansa. Tämä voi aiheuttaa ongelmia sähkönjakelussa. Luonnonolosuhteet

muuttuvat ja vaikuttavat sähkön tuotantoon, esimerkiksi tuulivoimalat ovat täysin riippuvaisia sopivista tuulen voimakkuuksista ja ne saattavat sijaita kaukana vahvasta runkoverkosta. Energiavarastolla voidaan parantaa tuulivoimaloitten käyttöä, esimerkiksi tasoittamaan verkon tehopiikkejä. /3/, /4/

Akuston lisäksi vauhtipyörä on potentiaalinen vaihtoehto tasoittamaan tuotannon vaihteita. Myös pumpattu vesivarasto ja paineilmaparastointi ovat vaihtoehtoisia järjestelmiä. Saarekekäytössä käytetään monesti tuulivoimalaa, jonka tuottama AC-jännite tasasuunnataan energiavarastona toimiville akuille sopivaksi. Tässä voidaan käyttää myös aurinkopaneeleita lataamaan akkuja. DC-jännite vaihtosuunnataan AC-jännitteeksi, jolla syötetään kuormaa. Saarekekäytön viimeisenä varajärjestelmänä voi olla dieselgeneraattori, joka takaa sähköntuotannon katkeamattomuuden. Seuraavassa kuvassa 1 on periaatekuva saarekekäytöstä. Kuvassa voisi olla myös dieselgeneraattori varajärjestelmänä. /3/, /4/



Kuva 1. Tyypillinen saarekekäyttö. Tuuli- ja aurinkovoimala tuottavat sähköä. Voimalan ylimääräinen tuotto varastoidaan akustoon. Käyttökohteena on erillinen kulutusyksikkö. /31/

Energiavarastoja voidaan sijoittaa kriittisille alueille verkkoa, minkä avulla saavutetaan sähkön laadun paraneminen. Esimerkiksi haja-asutusalueilla energiavarastoilla voidaan taata varmempi sähkönjakelu. Tehon tarpeet vaihtelevat paljon ja näin ollen energiavarastoilla

voidaan tasoittaa tehon tarvetta, mikä parantaa sähkön laatua etenkin haja-asutusalueella. Tämä kuitenkin vaatii suurta tehokapasiteettia energiavarastolta. /3/, /4/

Verkon stabiiliuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa kuluttajien suurten kuormien lisäys verkkoon, generaattorien kytkentätilanteet ja muut muutostilanteet. Verkon stabiiliuteen vaikuttaakseen energiavaraston olisi pystyttävä tuottamaan merkittäviä (suuruusluokka 1 MVA) pätö- ja loistehoja. Kapasiteettia on oltava minuuteista tunteihin kestävään toimintaan. Suurempiin kokonaisuuksiin, kuten verkon stabilointiin, käytetään monen energiavarastotekniikan yhdistelmiä. /3/, /4/

Stationäärisissä kulutusyksiköissä voidaan käyttää energiavarastoja sähköntuotannon vaihtelun ja kulutushuippujen tasaamiseksi. Esimerkkeinä voidaan sanoa omakotitalot, kerrostalot, taloryhmät, kauppakeskukset ja tehtaat. Esimerkiksi omakotitalossa sähkönjakelun häiriötilanteiden aikana voidaan energiavarastosta syöttää taloon sähköä. Lisäksi saadaan tasoitettua kuormitushuippuja. Verkon kulutuksen ollessa korkealla sähkön hintakin on korkea. On järkevää varastoida energiaa energiavarastoon hinnan ollessa alhaalla. /2/, /5/

UPS-järjestelmä on tarkoitettu syöttämään kuormia katkottomasti sähkönjakelun häiriötilanteiden aikana. UPS-järjestelmää käytetään erityisesti kriittisiin kohteisiin, kuten sairaaloihin ja vastaaviin kohteisiin, missä sähkön jakelu ei saa katketa laisinkaan. Energiavarastona käytetään yleensä akkuja, mutta myös vauhtipyöriä ja suprajohdavia magneettienergiavarastoja (SMES) on käytössä. Suuremmissa varavoimajärjestelmissä on esimerkiksi dieselgeneraattori ja sen rinnalla akusto, joka turvaa katkeamattoman sähköntuotannon, koska dieselgeneraattorin käynnistyminen kestää liian kauan häiriöttömän jakelun kannalta. Sähkön toimitus siirtyy verkolta sähkövarastolle millisekunnissa. Pysäytetyn dieselgeneraattorin käynnistäminen ja kuormaottokyky saavutetaan kymmenissä sekunneissa tai minuuteissa. Tänä aikana akun on voitava pitää yllä verkkoa. /2/, /5/

Usein akuston kanssa käytetään DC/DC-muuttajaa nostamaan jännite sopivaksi vaihtosuuntaajan välipiirille. Muuttaja tutkii myös verkon tilaa ja pystyy reagoimaan sekunnin murto-osissa sähkökatkoksiin. Sisätiloissa suljetut lyijyakut ovat toistaiseksi järkevin vaihtoehto paikallaan oleviin UPS-järjestelmiin, joissa akun paino tai koko ei ole yleensä tärkeä kriteeri. Suljetut lyijyakut ovat suhteellisen edullisia, niillä on pitkä elinikä ja vähäinen huollon tarve. Ulkotiloissa voidaan käyttää nikkeli-kadmiumakkuja (NiCd) niiden suuremman käyttölämpöalueen takia. Litium-ioniakkujen (Li-ion) hinta rajoittaa niiden käyttöä stationäärisissä

kohteissa. Litium-ioniakkujen valmistuksessa usein käytettävän koboltin niukkuuden takia käyttökohteet kannattaa valita harkiten. Maailmantaloudellisesti tarkastellen ei litium-ioniakkuja kannata käyttää stationäärisissä kohteissa. /2/, /5/

2.2 Akkujen peruskäsitteet ja termit

2.2.1 Ominaisenergia, energiatiheys ja ominaisteho

Ominaisenergia tarkoittaa akun energiamäärää massayksikköä kohden, jolloin yksikkönä on [Wh/kg] tai [J/kg]. Kun vastaavasti **energiatiheydellä** tarkoitetaan energian määrää tilavuusyksikköä kohden eli yksikkönä [Wh/dm³]. Ominaisenergiasta saadaan tietoa siitä, kuinka paljon akut painavat tarvittavaan energiamäärään nähden, kun taas energiatiheys kertoo kuinka paljon akut vievät tilaa vastaavaan energiamäärään nähden. /41/

Akun toimintakykyä kuvattaessa nämä edellä mainitut suureet ovat oleellisia. Akun materiaali vaikuttaa eniten kyseisiin suureisiin. Hyvässä akussa kummatkin arvot ovat mahdollisimman korkeat. Näiden ominaisuuksien kannalta vaativimpia sovelluskohteita ovat kaikki liikkuvat kohteet, joissa halutaan akkujen painon sekä tilavuuden olevan suhteellisen vähäiset. /41/

Ominaisteho on akusta saatava maksimiteho massaa kohti. Yksikkö on watteja kilogrammaa kohden [kW/kg]. Vastaavaa asiaa tarkoitetaan usein akun ns. C-arvolla, joka kertoo akun energiaan tai varaukseen verrannollisesta tehon tai virran suuruudesta. Esim. jos akku saa kuormittaa 3 C virralla ja sen kapasiteetti on vaikkapa 100 Ah, on akun maksimivirta 300 A. Tällöin 3 C vakiovirralla kuormitettuna 100 Ah akun teoreettinen purkuaika on 1/3 h. Vastaavasti, jos akun energia on 10 kWh ja sitä saa kuormittaa 3 C teholla, on akun maksimiteho 30 kW. Käytännössä kuitenkin akuilla on tiettyjä rajoitteita esimerkiksi maksimaalinen kuormitus C arvo ajan funktiona. Tehotiheyden yksikkö on [W/l]. /41/

Akun ominaisteho määräytyy pitkälti sisäresistanssin myötä. Pienellä sisäresistanssilla saadaan maksimivirta suuremmaksi, mikä lisää suoraan verrannollisesti myös tehon saantia. Myös akun lämpeneminen on vähäisempää pienemmällä sisäresistanssilla. Monissa sovelluskohteissa tarvitaan suurta ominaistehoa. Tällaisia ovat esimerkiksi kaikki liikkeellelähtötilanteet ja kuorman nostaminen tai liikkeen muutostilanteet. Varsinkin työkoneille ominaista ovat suuret huipputehot ja usein varsin kohtuulliset keskitehot. Mikäli työkoneissa

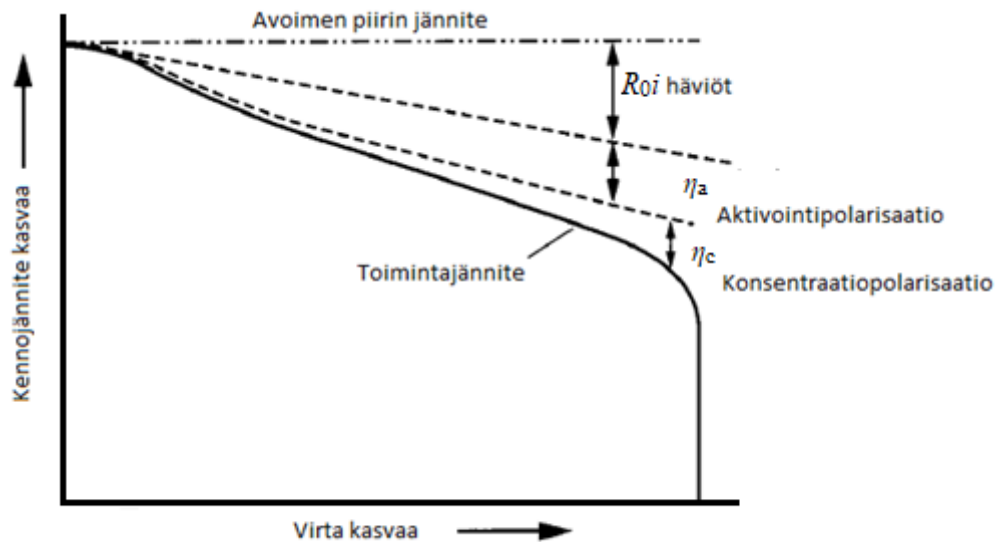
turvaudutaan pelkkään akkuun, pitää sen sietää suuria tehoja, jolloin suuri tehotehoisuus on edullinen. Esimerkiksi 30 kWh:n akulla voidaan kattaa kohtalaisen suurenkin työkonene energianvirtauksen tasaaminen, mutta akusta tarvittaisiin samalla esim. 300 kW:n huipputehoja säännöllisesti. Tämä vastaisi 10 C:n virtaa. /41/

2.2.2 Kuormitetun akun napajännite

Akun napajännite on todellinen jännite, mikä saadaan akusta ulos. Tämä jännite on kuormituksessa aina pienempi kuin akun avoimien piirin jännite tai sähkömotorinen lähdejännite E_{akku} . Napajännitteelle voidaan kirjoittaa seuraava yhtälö. /1/

$$U = E_{\text{akku}} - \eta_a - \eta_c - R_0 i = E_{\text{akku}} - Ri \quad (1)$$

Tässä η_a on aktivointipolarisaatiosta aiheutuva ylijännite anodilla ja katodilla, η_c on konsentraatiopolarisaatiosta aiheutuva ylijännite anodilla ja katodilla ja R_0 on akun sisäinen ohminen resistanssi. R kuvaa nyt akun sisäresistanssia. R_0 käyttäytyy ohmin lain mukaan lineaarisesti. Yhtälön (1) mukaan akun häviötermit (η_a , η_c , $R_0 i$) pienentävät akun napajännitettä kuormitettaessa. Akkua ladattaessa virran suunta muuttuu, jolloin kaikki häviötermit muuttuvat positiiviseksi. Seuraava kuva selkeyttää, kuinka virran voimakkuus lisää häviötermien vaikutusta. /1/, /41/



Kuva 2. Akun toimintajännite virran muutoksena tummalla viivalla. Kuvasta nähdään kuinka häviötermit laskevat jännitettä. /1/

2.2.3 Sisäresistanssi

Akun tai kennon sisäinen vastus aiheutuu kaikesta materiaalista, jonka kautta sähkövirta kulkee. Näitä ovat huokoisten elektrodien resistanssi, elektrolyytin eli kennon aktiivisen massan sähköinen resistanssi, elektrodit, aktiivisen massan ja elektrodien välinen resistanssi. Lisäksi ionien resistanssi vaikuttaa sisäresistanssiin. Nämä muodostavat kennon sisäresistanssin. Kuvan 2 ja yhtälön (1) mukaisesti sisäresistanssiin kuuluvat polarisaatiosta aiheutuvat häviöt, jotka riippuvat epälineaarisesti virrasta. Tällöin sisäresistanssi ei ole vakio vaan kasvaa virran mukaan. Sisäresistanssille voidaan kirjoittaa riippuvuus virrasta derivaatan perusteella

$$R = \frac{dU}{dI}. \quad (2)$$

Lähteen [33] mukaan sisäresistanssi kasvaa akun varaustilan pienentyessä. Tämä tieto voi olla hyödyllinen varaustilan määrittämistä varten. [1], [33]

2.2.4 Käyttöikä

Akun käyttöikään vaikuttavat sekä yleinen vanheneminen (kalenteri-ikä), että lataus-purkusyklien määrä. Nämä vanhenemiset tapahtuvat yhtäaikaaisesti, jos akku on käytössä. Akku alkaa vanhentua heti valmistuttuaan ja vanhenee vaikei sitä käytettäisi ollenkaan. [6]

Kalenteri-ikä vaihtelee akkutyypin mukaan. Akkujen käyttökohteet ja varastointitavat vaikuttavat akun käyttöikään. Vähäinen ilmankosteus ja oikea lämpötila vähentävät akun ikään-tymistä. Näitä seikkoja voidaan etenkin varastoinnissa huomioida ja ottaa tarvittaessa huomioon. Akun kotelon suunnitteluvaiheessa otetaan huomioon ulkoisten rasitusten vaikutus, esimerkiksi litium-ioniakuille on tärkeää mahdollisimman tiivis kotelointi ilmankosteuden haittavaikutusten estämiseksi. [6]

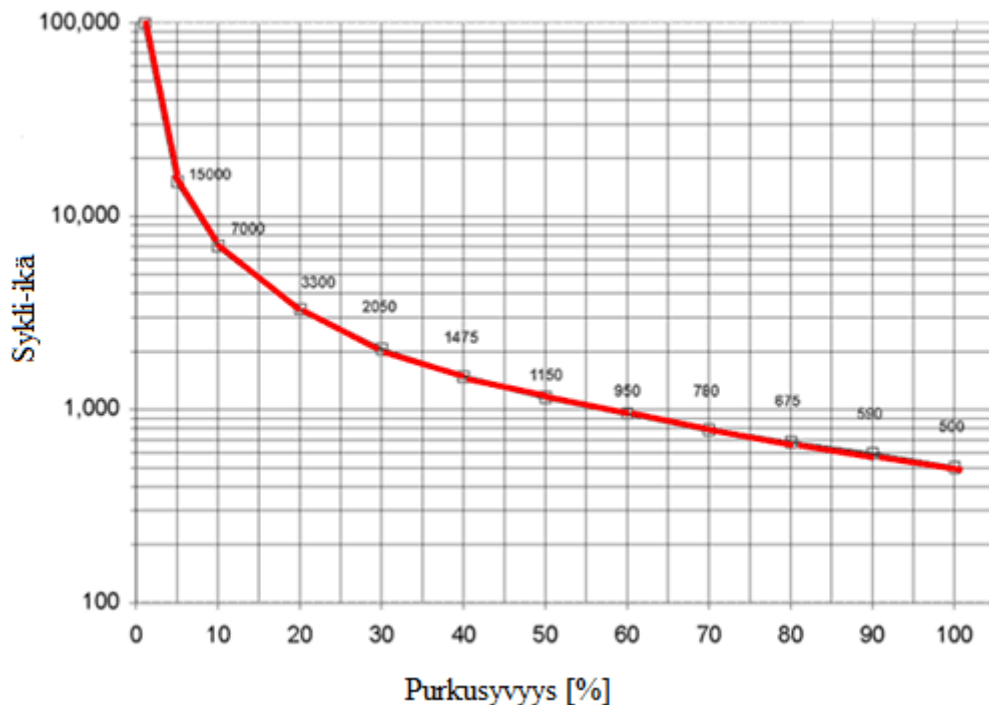
Akusta riippuen sitä on säilytettävä oikeassa varaustilassa, esimerkiksi lyijyakkua on hyvä säilyttää täyteen ladattuna, kun taas nikkeliakkua täysin tyhjänä. Akun käyttö vaikuttaa oleellisesti sen vanhenemiseen, esimerkiksi ylilataukset ja suuret virrat kuluttavat akkua suhteellisen paljon. Nämä seikat otetaan huomioon monesti sykli-ässä. [6]

Vanhenemisen seurauksena on suorituskyvyn pieneneminen. Käytännössä akun kapasiteetti laskee. Yleisesti käytetään rajaa, jolloin akun kapasiteetti on laskenut 80 %:iin alkuperäisestä

kapasiteetista. Tämä tarkoittaa akun olevan kulunut tai ikääntynyt uuteen verrattuna. Vaikka vastaavan uuden akun alkuperäisestä kapasiteetistä on käytettävissä enää 80 %, on akku vielä toimintakunnossa. Tämä 80 %:n raja on vain vertailurajana akkujen välillä, eikä merkitse akun pakollista uusimista. Akku voi kestää vielä vuosia, mutta sen kapasiteetti on alentunut uuteen akkuun verrattuna. /6/

Yleisen vanhenemisen lisäksi akku kuluu käytössä. Akun sykli-ikää mitataan yleisesti syväpurkukertoina, eli kuinka monta kertaa akku voidaan purkaa lähes kokonaan ja ladata taas täyteen. Toistuva syväpurku pienentää akun suorituskykyä. Akut kestävät suhteellisesti paljon enemmän pienempiä syklejä kuin syväpurkauksia, minkä takia akusto kannattaa mitoittaa riittävän kokoiseksi. /6/

Kaikki akut purkautuvat itsestään, riippuen akkutyypistä ja olosuhteista, jolloin etenkin säilytyksen aikana akkua on ladattava silloin tällöin. Tämä aiheuttaa myös akun ikääntymistä. Seuraavassa kuvassa 3 on havainnollistettu kuinka akun toistuva purkusyvyys vaikuttaa sykli-ikään. /6/



Kuva 3. Periaatekuva akun syklien määrästä purkusyvyyden funktiona. Syväpurkauksella on hyvin merkittävä vaikutus akun ikääntymiseen. /35/

Kuvan 3 mukaan esimerkiksi 60 %:n päivittäisellä purkauksella akun sykli-ikä olisi n. 1000 päivää. Tällöin akun kapasiteetista on pysyvästi kadonnut noin 20 %, mikä ei tarkoita vielä

akun pakollista uusimista. Purkusyvyyden lisäksi sykli-ikäntymiseen vaikuttaa moni muu-kin asia, kuten esimerkiksi käytettävä lataus/purkuvirta. Yleensä akun elinkaarta testataan 0.5 C virralla. /41/

Akun latausmenetelmällä on suuri merkitys akun ikääntymiseen. Mitä nopeammin eli mitä isommalla virralla akkua ladataan, sitä enemmän kyseinen lataaminen alentaa akun ikää. Akku kuumenee suurilla virroilla, mikä myös pienentää akun ikää. Myös monet muut asiat vaikuttavat akun ikääntymiseen, kuten ylilataus ja itsepurkautuminen. Ylilataus saattaa rikkoa akun kokonaan. /6/

2.2.5 Lataus

Latausaika on yksi tärkeimpiä ominaisuuksia akussa, sillä moniin sovelluksiin vaaditaan lyhyttä latausaikaa. Joissain sovelluskohteissa, kuten UPS-järjestelmissä, latausajan kesto ei ole tärkeää. Sähköautoissa latausajan kesto on oleellinen kriteeri. Lataustapa voidaan jakaa kahteen osaan, normaali- tai pikalataus. /12/

Normaalilatauksella tarkoitetaan sähköverkosta otettavaa 230 V ja 10 A tai 16 A sulakkeen läpi tulevaa yksivaiheista virtaa. Periaatteessa saatavat tehot ovat 2,3 kW ja 3,7 kW. Tällöin latausaika kasvaa akkutyypistä ja akuston koosta riippuen useisiin tunteihin. Esimerkiksi yöllä (12 h: 27,6 kWh tai 44,4 kWh) tai työpaikan paikoitusalueella (8 h: 18,4 kWh tai 29,6 kWh) sähköauton lataus onnistuu normaalilatauksella. Liikkuvissa työkoneissa on hyvin erilaisia työsyklejä, mutta monesti niilläkin tulee seisonta-aikaa riittäväälle lataukselle. /12/

Pikalataus voidaan suorittaa vain tietyissä latauspisteissä, missä on saatavilla riittävä teho. Sähköautoille näitä latauspisteitä on huoltoasemilla, kauppakeskuksissa jne. Tehdasalueilla sähköisille liikkuville työkoneille on valmiina riittävä verkko. Pikalatauksen aika vaihtelee akkutyypistä ja koosta riippuen minuuteista tuntiin. Esimerkiksi nykyinen litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiakku (NCA) kykenee oikein jäähdytettynä 2 C latausvirtaan ja 3 C purkaukseen. Auton akun lataamiseen 20 %:sta 80 %:iin tarvitaan siis vähintään 20 minuuttia. Tällä latauksella pääsee akun koosta riippuen maksimissaan noin 250 km (Tesla Model S, 100 kWh). Vastaavan dieselauton tankkaaminen vie kaksi minuuttia ja autolla pääsee siten yli 1000 km. Tämä ei suoraan tarkoita, että pikalatauspisteitä tarvittaisiin 40-kertainen määrä polttoainejakelupisteisiin nähden. Latausta tapahtuu myös muualla kuin pikalataus-

pisteissä toisin kuin polttomoottoriautoissa. Yleisin auton päivittäinen ajosykli on työmatkoista ja kauppareissuista koostuva, jolloin akun kapasiteettia ei käytetä läheskään kokonaan. Näissä tilanteissa akusto ladataan öisin ja mahdollisesti työpaikalla. Tämä vähentää huomattavasti huoltoasemilla tapahtuvia pikalatauksia. Mm. kauppareissujen yhteydessä autojen lataus on mahdollista jo monissa suuremmissa kaupoissa. Lisäksi esimerkiksi K-latausverkostolla on käytössä mobiilisovellus, mistä näkee lähimmät asemat ja reaaliajassa käyttöasteen. Näin on helpompi löytää vapaana oleva latauspiste. Latauspisteitä on kaupungeissa saatavilla hyvin, mutta omassa kodissa ei välttämättä ole mahdollisuutta yön yli lataukseen, sillä jokaisella ei välttämättä ole omaa lämmityspaikallista autopaikkaa asumismuodosta johtuen. Maaseudulla tai lähiöissä pikalatauspisteitä on taas vähemmän, mutta omat latauspisteet ovat varsin yleisiä. /12/, /42/

Akku tarvitsee oikeanlaisen latausmenetelmän, joka huolehtii esimerkiksi latausvirran rajoittamisesta. Latausmenetelmissä on huomattavia eroja, ja niitä onkin järkevintä käsitellä akkukohtaisesti. Tietyissä akuissa itsessään on suojauselektroniikka, joka katkaisee latauksen virhetilanteissa tai kun akku on täysi. /12/

Yleisimmässä latausmenetelmässä akkua ladataan vakiojännitteellä. Ladattaessa ja purettaessa akku lämpenee aina, jota täytyy valvoa tai ottaa huomioon ohjauksessa. Tietyt akut eivät ota latausvirtaa enää vastaan, jos ne ovat päässeet täysin tyhjäksi, koska akku ei enää lainkaan johda sähköä. /12/

Hybridikäyttöissä akku latautuu jarrutusenergiasta ja polttomoottorin latauksen avulla. Monissa sovelluksissa verkkolataus on myös mahdollinen. Kaksisuuntainen vaihtosuuntaaja huolehtii akun latausvirrasta ja -jännitteestä.

2.2.6 Itsepurkautuminen

Akun itsepurkautuminen tarkoittaa käyttämättömän akun itsestään purkautuvaa varausta. Jokainen akku purkautuu itsestään myös käyttämättömänä. Itsepurkautumista mitataan prosentteina aikayksikköä kohden. Itsepurkautuminen vaihtelee paljon eri akkutyypin välillä, esimerkiksi lyijyakuilla jopa 1 % päivässä, kun taas litium-ioniakuilla noin 5 % kuukaudessa. /7/

Itsepurkautumiseen vaikuttavat akkutyypin lisäksi ympäristöolosuhteet ja akun ikä. Kuivassa ja viileässä akun itsepurkautuminen on hitainta. Periaatteessa mitä kylmemmässä akkua säilytetään sitä vähemmän se purkaa itseään, mutta pakkasesta aiheutuu ongelmia tietyille akuille. Ikääntynyt ja huonokuntoinen akku purkaa itseään huomattavasti nopeammin kuin uusi. Myös akun käyttöhistoria tai syklihistoria sekä varaustila vaikuttavat itsepurkautumisen määrään. Monilla akuilla purkautuminen on suurempaa, kun varaustila on täysi tai lähes täysi. /7/

Itsepurkautuminen voi olla vaarallista akulle, jos se on syväpurkautunut eikä sitä ladata heti. Esimerkiksi lyijyakuilla tämä aiheuttaa pysyvää kapasiteetin laskua ja jotkin akut saattavat jopa hajota kokonaan. Esimerkiksi lyijyhappoakulla elektrolyytti muuttuu kokonaan vedeksi, jos syväpurkauksen jälkeen itsepurkautumista jatkuu liian pitkään ilman latausta. Tällöin akku ei enää johda elektrolyytin ollessa vettä, eikä akku ota enää varausta vastaan. Lyijyakkuja voidaan yrittää elvyttää lisäämällä happoa, mikäli se käytännössä on mahdollista. Esimerkiksi Exide X-tra akkuihin voi lisätä akkuhappoa, mikäli nesteen pinta ei ole liian alhaalla (oikea nesteen pinnankorkeus on 10 – 15 mm levyjen yläpuolella). Jos nesteen pinta on liian alhaalla, saa akkuun lisätä vain tislattua vettä. Latureissa on elvytystoimintoja. Nämä eivät kuitenkaan takaa akun heräämistä, ja vaikka akku alkaisi toimia, monesti akun kapasiteetti on laskenut. /7/, /23/, /54/

Mikäli akku on jatkuvassa käytössä, ei itsepurkautumisesta ole juuri haittaa. Tietyissä sovelluskohteissa tämä ilmiö on kuitenkin otettava huomioon, esimerkiksi UPS-järjestelmissä on akun varaustilaa seurattava. /7/

Akun itsepurkautumista voidaan mitata erilaisilla menetelmillä. Yleisin ja yksinkertaisin menetelmä on kapasiteetin mittaaminen, mutta menetelmä on hidas. Kapasiteetin vähentämisestä verrataan alkuperäiseen kapasiteettiin pitkän aikavälin aikana, mistä saadaan laskettua itsepurkautuminen prosenteissa. Toinen vaihtoehto on mitata jännitteen alenemista. /7/

2.2.7 Syväpurku

Syväpurku on akun varaustilan suuri pudotus. Yleensä syväpurkauksella tarkoitetaan akun purkamista täydestä tyhjäksi. Purkusyvyyttä kuvataan DOD-arvolla (Depth of Discharge). Tämä luku osoittaa purettua varausta ja ilmoitetaan prosentteina. Syväpurku on haitallinen

suurimmalle osalle akkutyypeistä, mutta esimerkiksi nikkelpohjaisille (lähinnä nikkeli-kadmiumakulla, millä on ongelmana muisti-ilmiö) akuille on hyväksi säännöllisin väliajoin purkaa akku kokonaan. /32/

Esimerkiksi lyijyhappoakun liiallinen syväpurku voi johtaa akun tuhoutumiseen. Muuten toistuva syväpurku nopeuttaa akun (suuri vaikutus esimerkiksi lyijyakulla ja nikkeli-metallihydridiakulla) ikääntymistä ja näin huonontaa käytettävissä olevaa kapasiteettia. Yleisesti litium-ioniakut kestävät toistuvaa syväpurkua paremmin kuin lyijy- tai nikkeliakut. Epäsäännöllisesti ladattavissa sovelluskohteissa akun olisi hyvä kestää mahdollisimman paljon syväpurkuja. Tällaisia kohteita voisivat olla esimerkiksi sähköautot. /32/

2.2.8 Peukert-efekti

Peukert-efekti vaikuttaa oleellisesti akun käyttäytymiseen suurella kuormituksella. Akun kokoon nähden suurilla virroilla ei saada yhtä tehokkaasti kapasiteettia käytetyksi kuin pienemmillä virroilla. Suurilla kuormituksilla akku vaikuttaakin pienempi kapasiteetiselta. Akku menettää osan tehoista lämmöksi kuormitusvirran ja sisäisen vastuksen takia. Suuremmilla virroilla enemmän. Peukertin lailla on pyritty mallintamaan tätä kapasiteetin saataavuutta. Tosin nykyään on käytössä simulaatiomalleja ja akkujen datalehdissä on kerrottu kuinka paljon kapasiteettia, saadaan käytettyä eri kuormitusvirroilla tietyissä lämpötiloissa. Peukertin laki

$$t_{dc} = t_0 \left(\frac{C}{It_0} \right)^n, \quad (3)$$

missä t_{dc} on todellinen akun käyttöaika purkutilanteessa, I on kuormitusvirta, C on akun kapasiteetti, t_0 on nimellinen purkuaika (yleensä käytetään 20 h) ja n on Peukert-potenssi. Peukert-potenssi on akusta riippuvainen suure, joka on tyypillisesti hieman päälle yksi ($1 < n < 2$). Yhtälön (3) mukaan on huomattavissa, kuinka Peukert-potenssi vaikuttaa todelliseen purkuaikaan. Moni muukin asia mm. lämpötila vaikuttaa saatavaan kapasiteettiin. Jos Peukert-potenssi on 1.0, ei efekti vaikuta. /8/, /9/

Akun yhteydessä käytetään yleensä aikana tunteja h ja kapasiteetista ampeeritunteja Ah. Kapasiteetti voidaan esittää myös coulombeina C. Tällöin yksi ampeeritunti vastaa 3600 coulombia. /8/, /9/

Akun sähkökemiallinen reaktio tapahtuu elektrolyytin osissa. Elektrolyytti ei ole kokonaan aktiivista, vaan se sisältää osia, missä reaktioita ei tapahdu. Suurilla virroilla reaktiot tapahtuvat elektrolyytin rajapinnalla, jolloin aktiivisia osia jää käyttämättä. Myös elektrolyytin pinnalla on passiivisia osia, jotka eivät osallistu reaktioon. Tästä syystä suurilla viroilla kuormitettaessa, jää monta aktiivista aluetta hyödyntämättä ja näin ollen osa kapasiteetistä myös. Kuormitettaessa akkua pienillä virroilla ei vastaavaa tapahdu. Tällöin passiiviset osat ovat jakaantuneet tasaisesti elektrolyyttiin, jolloin pienillä virroilla saadaan akun kapasiteetti käytettyä paremmin. /8/, /9/

2.2.9 Muisti-ilmiö

Muisti-ilmiötä esiintyy nikkelpohjaisilla akuilla ja erityisesti nikkeli-kadmiumakulla. Muisti-ilmiö aiheuttaa akun kapasiteetin pysyvää alenemista. Akun kapasiteetti alenee pysyvästi, jos akkua käytetään toistuvasti samanlaisessa käytössä. Tällöin akkua puretaan aina vain tietty osa koko kapasiteetistä. Näin toimittaessa akku niin sanotusti oppii, kuinka tyhjäksi ne yleensä puretaan.

Muisti-ilmiön välttämiseksi akku tulisi purkaa tietyin väliajoin täysin tyhjäksi, noin 1 V kennojännitteeseen. Nykyisillä NiCd-akuilla riittää, kun ne kerran kuukaudessa puretaan täysin tyhjäksi, vaikka akku olisi jatkuvassa käytössä. Kapasiteetin menettänyttä akkua voi yrittää elvyttää purkamalla sitä pienellä virralla mahdollisimman tyhjäksi. Tällöin kennojännitteen tulisi olla alle 0,6 V. Tämän jälkeen akku on ladattava normaalisti täyteen. NiCd-akkujen käyttö on selvästi vähentynyt viime vuosina litium-ioniakkujen vyöryessä kaikille aloille. /12/

2.2.10 Akun osat

Elektrolyytti on akun (kennon) sisällä elektrodien välillä olevaa ainetta, jonka avulla sähkövirta kulkee katodilta anodille. Vanhastaan elektrolyytti liuotetaan johonkin liuottimeen (esim. vesi). Liuoksessa ionit kuljettavat sähkövarauksia. Elektrolyytti voi olla myös imeytetty johonkin kiinteään materiaaliin, kuten AGM-tekniikalla toteutetun lyijyakun lasikuitumattoon. Uusimpia elektrolyyttimateriaaleja ovat polymeerigeelit, joita käytetään mm. litium-polymeeriakuissa. /10/

Liuottimen tulee pysyä nestemäisenä $-40 - +80$ °C välissä ja sen on oltava mielellään myrkyttöä ja halpaa. Parhaita hyötysuhteita ei kuitenkaan saavuteta myrkyttömällä ja halvoilla liuottimilla. Esimerkiksi asetonitriitillä (C_2H_3N) saadaan hyvä hyötysuhde, mutta se on myrkyllinen ja haihtuu jo 82 °C lämpötilassa. /10/

Kotelon täytyy olla tiivis. Kotelolla on vaatimuksia akkutyypistä riippuen, mm. elektrolyytin ollessa nestettä kotelo ei saa vuotaa tai esimerkiksi litium-ioniakuilla kosteutta ei saa päästä kotelon sisään. Kotelo ei saa reagoida kemiallisesti elektrolyytin eikä minkään muunkaan akun sisäisen aineen tai komponentin kanssa. /12/

Akkujen fyysinen sijoituspaikan valinta on tärkeää monestakin syystä. Turvallisuus ja akun suojaaminen ovat tärkeimmät tekijät. Sähköautoissa akusto on järkevää sijoittaa alas, jotta saadaan massakeskipiste mahdollisimman matalalle, mikä parantaa ajo-ominaisuuksia. Akusto on myös järkevää asentaa akselien väliin, jossa se on parhaiten suojassa mahdollisilta puristuksilta kolaritilanteissa.

Riittävästä jäähtyksestä on huolehdittava akkutyypin mukaisesti. Akku on sijoitettava paikkaan, missä se on suojassa kaikelta ulkoiselta rasitukselta, kuten lialta ja kipinöiltä. Liikuvissa kohteissa on otettava huomioon akun asento ja akkuun kohdistuva värinä. Akkutyypistä riippuen asento on joko vapaa tai rajoitettu, kuten myös värinän määrä. Joistakin akuista kuten esimerkiksi lyijyakuista voi vapautua kaasua, mikä on otettava huomioon akun sijoituspaikan ilmanvaihdossa. /12/

3 SÄHKÖISET ENERGIAVARASTOT

Eri akkutekniikoita on olemassa kymmeniä tai jopa satoja. Osalla näistä tekniikoista on vain pieniä eroja. Tässä työssä esitellään muutamia tekniikoita, jotka ovat mahdollisia vaihtoehtoja isompiin käyttöihin esimerkiksi työkoneisiin. Kerrataan eri akkujen periaatteet ja painotetaan akkujen ominaisuuksiin sekä pohditaan, mikä akku mihinkin käyttökohteeseen sopisi. Puhuttaessa yhdestä kennosta, tarkoitetaan katodin (positiivinen napa), anodin (negatiivinen napa), erottimen ja elektrolyytin käsittelemää yhtä akkukennoa. Kennoja halutusti sarrataan ja/tai rinnan kytkemällä saadaan halutun kokoinen akku, jolla on haluttu napajännite ja kapasiteetti. Tällaisen akun tilavuus ja massa riippuvat akkutyypistä ja kennojen määrästä. Alla olevasta listasta selviävät käsiteltävät akkutyypit.

- Lyijyakut
 - Lyijyhappoakku
 - VRLA-akku
- Nikkeliakut
 - Nikkeli-kadmiumakku (NiCd)
 - Nikkeli-metallihydridiakku (MiMH)
- Litium-ioniakut
 - Litium-kobolttioksidiakku (LCO)
 - Litium-polymeeriakku (LiPo)
 - Litium-rautafosfaattiakku (LFP)
 - Litium-mangaanioksidiakku (LMO)
 - Litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidiakku (NMC)
 - Litium-titanaattiakku (LTO)
 - Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiakku (NCA)

Akkujen ominaisuuksissa ja hinnoissa on suuria eroja. Akun valintaan vaikuttaa moni asia, joista tärkeimpänä voidaan pitää toimintakykyä ja hintaa.

Akun sähkökemiallinen reaktio on hyvin monimutkainen, ja sitä on hyvin hankala kuvata. Latauksen ja purun sähkökemialliseen toimintaan tarvitaankin lisää tutkimusta. Akun varaustila olisi hyvä tietää monissa sovelluksissa, mutta sen määrittäminen on työlästä. Karkeasti voidaan olettaa varaustilan riippuvan kennon jännitteestä. Monet monimutkaiset mallinukset olettavat, että kennon jännite palaa erilaisten käyttötilanteiden jälkeen oikeaan tasapainoon tietyn lepoajan jälkeen. Todellisuudessa kuitenkin jännitteellä on hystereesi-ilmiö.

Vaikka varaustila olisikin sama, saattaa kennon jännite poiketa. Tämä johtuu edeltävistä tapahtumista, esimerkiksi siitä onko akku ollut purku- vai lataustilanteessa. Lopputuloksena voi silti olla sama varaustila eri kennojännitteellä. /21/, /22/, /40/

3.1 Lyijyakut

Ensimmäinen käytännöllinen akkukenno oli lyijyakku, jossa oli kaksi lyijylevyä rikkihappossa kankaalla eristettynä toisistaan. Lyijyakun kehittäjä oli Gaston Plante. Hän esitteli lyijyakun vuonna 1859. Akun peruseräite oli ollut jo tiedossa 1800-luvun alussa. Lyijyakku on edelleen yksi yleisimmistä akkutyypeistä. Suosituin sovelluskohde on auton moottorin käynnistysakku. /12/

Yksi tärkeimmistä tekijöistä akkutyypin valinnassa on hinta, jonka takia sitä käytetään auton käynnistysakkuna, missä halutaan mahdollisimman halvat valmistuskustannukset. Tähän tarkoitukseen lyijyakulla on hyvänä puoleena halvan hinnan lisäksi kyky antaa suuria virtoja pienen hetken. Myös lyijyakun lataaminen on yksinkertaista. /12/

Vielä 1900-luvun lopulla ei ollut lyijyakun lisäksi monia muita vartenotettavia vaihtoehtoja, joten se on saavuttanut määrävän markkinaosuuden. Lyijyakkujen materiaalin takia akut ovat hyvin painavia ja suuremmissa kohteissa parhaita sovelluskohteita ovatkin stationääriset kohteet. /12/

Lyijyakun kennojännite on 2,1 V. Nämä akut ovat rajoittuneita muodoltaan ja tarvitsevat ilmanvaihtoa sekä huoltotilaa. Akussa olevan rikkihapon aiheuttamat mahdolliset turvallisuusriskit on otettava huomioon. /12/

Lyijyakkujen toimintalämpötila-alue on noin $-25 - +55$ °C välissä. Suositeltava käyttölämpötila on $+10 - +30$ °C, jolloin akusta saadaan paras kapasiteetti. Korkeammassa lämpötilassa akun käyttöikä laskee merkittävästi, mutta kapasiteetti ei laske juuri ollenkaan. Kun taas matalammassa lämpötiloissa akun käyttöikä ei merkittävästi huonone, mutta kapasiteetti voi laskea puoleen. Akkua ei saisi käyttää yli 45 °C lämpötiloissa. /12/

Vuotovirtojen estämiseksi akku tulisi pitää puhtaana ja kuivana. Lyijyakkujen mittaus olisi hyvä tehdä säännöllisin väliajoin, jotta välttyttäisiin akun hajoamiselta tai vaaratilanteelta. Akun kennojen jännitettä on mitattava ja lämpötilaa on syytä tarkkailla. Akun sijoituspai-

kassa vedyn määrä ei saisi ylittää neljää tilavuusprosenttia. Tästä tulee huolehtia oikeanlaisella ilmanvaihdolla. Kun akkua ei käytetä, se olisi hyvä säilyttää täyteen ladattuna ja viileässä kuivassa paikassa. Matalammissa lämpötiloissa akun itsepurkautuminen on pienempää. /12/

Tyhjänä pitkään säilytetty akku ei välttämättä ota enää latausta vastaan, tämä johtuu akun levyjen kemiallisesta muutoksesta. Levyt muuttuvat purettaessa lyijysulfaateiksi, jonka sähköjohtavuus on huono. Tyhjänä seisseen lyijyakun sulfaattikiteet kasvavat, ja ne hylkivät johtavia lyijykiteitä. Kasvaneet sulfaattikiteet muodostavat johtamattoman kerroksen anodi- ja katodilevyille. Lyijysulfaattikiteiden seassa on aina jonkin verran sähköä johtavaa lyijyä, mutta liian kauan tyhjänä ollut lyijyakku ei enää toimi. Tyhjä akku voi myös pakkasella jäätyä tyhjänä säilytettäessä, koska tyhjän akun elektrolyytti on suurimmaksi osaksi vettä. /12/

Täyteen ladatun lyijyakun pitäisi kestää noin -60 °C lämpötilaa, mutta esimerkiksi 40 %:n varaustilaan ladattu akku kestää vain $-20\text{ – }-25\text{ °C}$ lämpötilaa. Mikäli akkua säilytetään pitkiä aikoja, on sitä välillä syytä ladata itsepurkautumisen takia. /12/

Lyijyakun lataus suoritetaan tavallisesti vakiojännitteellä, joka on helpoin latausmenetelmä. Tämä ei kuitenkaan ole kovin nopea ja eikä tätä menetelmää käyttämällä välttämättä saavuteta täyttä latausta. Latausjännite on tyypillisesti 2,2 – 2,5 V. Virta nousee vasta, kun akku saavuttaa termisen maksimijännitteen. Tätä voidaan nopeuttaa käyttämällä latauksen alkuvaiheessa isompaa virtaa. Korkean jännitteen ja virran käyttäminen latauksen alkuvaiheessa on tarpeellista vain tietyn ajan. /10/, /13/, /14/

Kennot voivat vaurioitua väärästä latausmenetelmästä, esimerkiksi liian suuresta virrasta. Lyijyakun nopea lataus suoritetaan kontrolloidulla maksimaalisella virralla, jossa jännite vaihtelee. Lataus täytyy kuitenkin suorittaa siten, että akku ei lämpene liiallisesti ja että elektrolyytin vahingoittumista tai kaasuuntumista ei tapahdu. Ylilatauksen seurauksena napajännite nousee ja akussa alkaa tapahtua veden elektrolyyttistä hajoamista, jolloin se vapauttaa räjähdysherkkää vetykaasua. Seuraavaksi on esitelty kaksi yleisintä lyijyakkuja, lyijyhappoakku ja niin sanottu suljettu lyijyakku eli VRLA-akku (Valve Regulated Lead Acid Battery). /10/, /13/, /14/

3.1.1 Lyijyhappoakku

Lyijyhappoakun liuoksen raaka-aineena toimii rikkihappo. Lyijyhappoakun alhainen hinta ja saatavuus ovat monesti syynä akun valinnassa, mikäli akku muuten käy teknisiltä ominaisuuksiltaan kohteeseen. Tämä energiavarasto onkin halvin ratkaisu suuriin sovelluksiin ja sen hyvänä puolena on myös suuri tehonsyöttökyky. Ominaisenergia lyijyakulla on matalahko (30 – 40 Wh/kg), johtuen lyijyn korkeasta tiheydestä. Itsepurkautuminen on varsin nopeaa, pahimmillaan 1 % vuorokaudessa, mikä rajoittaa käyttökohteita. Sykli-ikä on vain 50 – 500 sykliä, eli varsin heikko. /12/

Lyijyhappoakku sisältää myrkyllisiä materiaaleja, joiden kierrätyksestä on huolehdittava. Akku vaatii myös huoltoa eli tislattua veden lisäämistä kennoihin. Latauksen yhteydessä on muistettava riittävä tuuletus räjähdysvaaran vuoksi. Jos tarvitaan halvinta ratkaisua muitten ominaisuuksien kustannuksella, on tämän tyyppin akku paras valinta. Täytyy kuitenkin muistaa, että lyijyakun kestoikä ei ole samaa luokkaa kuin esimerkiksi litium-ioniakun. /12/

3.1.2 Suljettu lyijyakku (VRLA-akku)

VRLA-akku on niin sanottu suljettu lyijyakku (SLA, Sealed Lead Acid), mihin ei tarvitse lisätä nestettä elinaikana. Tämä akkutyypin on helppokäyttöinen ja myös edullinen, mutta kalliimpi kuin lyijyhappoakku. Lataus on yksinkertaista vakiojännitteellä, mutta jännitteen on oltava vakaa ja tasan 2,23 V kennoa kohden. /16/, /17/

VRLA-akkua ei juuri tarvitse huoltaa, sillä on vapaa käyttöasento ja se kestää hyvin tärinää. Käyttöikä oikein käytettynä on suhteellisen pitkä, esimerkiksi syklien määrä on noin tuhat. Akusta saadaan suhteellisen suuri teho, mutta tehopainosuhte on selvästi huonompi kuin litium-ioniakuilla. VRLA-akku on hyötysuhteeltaan (70 – 90 %) lyijyhappoakkuja paljon parempi, jolla on vain 50 – 70 % hyötysuhde. /16/, /17/

VRLA-akku on hyvä valinta sellaisiin käyttökohteisiin, mihin halutaan edullinen ratkaisu, eivätkä koko ja paino ole rajoittavia tekijöitä. Paikallisakkuna tämä toimii erinomaisesti, sillä myös sen itsepurkautuminen on suhteellisen hidasta, noin 5 % kuukaudessa. Tämän akkutyypin sovelluksia on esimerkiksi valaistuksen varasyöttöjärjestelmä. /16/, /17/

VRLA-akku säilytetään täytenä, viileässä ja kuivassa tilassa välillä ladata. Hyvänä puolena lyijyhappoakkuun verrattuna on myös se, että VRLA-akku ei tarvitse omaa akkutilaa tai

huonetta. Kyseinen akku ei päästä mitään kaasuja eikä ole niin altis ulkoisille haitoille. /16/, /17/

VRLA-akku voidaan jakaa kahteen alaluokkaan, jotka ovat AGM-tekniikalla valmistetut ja lyijyhyytelöakut. Halvemmallalla AGM-tekniikalla valmistetussa VRLA-akussa on parempi virranantokyky, mutta ne eivät kestä pitkäjaksoista purkuja niin hyvin kuin lyijyhyytelöakut. VRLA-akulle voidaan osittain tehdä pikalataus, jos akun kennojännite pysyy alle 2,4 V:n. Lyijyhyytelöakuilla käyttöikä on pidempi kuin AGM-akuilla, ja siksi niitä on suosittu sykli- sissä käyttökohteissa, kuten trukeissa. /16/, /17/

VRLA-akku tulee kyseeseen etsittäessä edullista sähkövarastoa yönylitarpeeseen aurinkota- loussovelluksissa, kun pitää päivisin saadulla aurinkosähköllä pärjätä yön yli. Oikein mitoi- tettu, korkealaatuinen lyijyakku kykenisi useamman vuoden käyttöikänsä tällaisessa sovel- luksissa.

3.2 Nikkeliakut

Tässä luvussa käsitellään nikkeli-kadmiumakku ja nikkeli-metallihydridiakku. Nikkeli-kad- miumakku on nykyään vähemmän käytetty kuin nikkeli-metallihydridiakku.

3.2.1 Nikkeli-kadmiumakku (NiCd)

NiCd-akku on yksi vanhimmista markkinoilla olevista akuista. Teollisuudessa se on ollut jo 1800-luvun lopulta ja kuluttajille se tuli vasta 1950-luvulla käyttöön. Elektrolyyttinä toimii lipeä eli kaliumhydroksidiliuos ja positiivinen elektrodi on nikkelihydroksidista valmistettu, kun taas negatiivinen on valmistettu kadmiumista. Kadmium on erittäin vaarallinen myrkky, ja nykyisten säännösten mukaan sitä ei saa käyttää kuluttajatuotteissa. Tämä akku onkin enää teollisuuden käytössä. /12/

Hyvänä puolena NiCd-akulla on suuri virransyöttökyky laajalla käyttöalueella, ja se kestää syväpurkuja sekä ylilatauksia. NiCd-akku ei myöskään vahingoitu tyhjänä säilytettynä kuten monet muut akut. Akun sisäresistanssi on matala, minkä vuoksi sitä voidaan kuormittaa jopa yli 10 C virralla. Hetkellisesti NiCd-akku kykenee antamaan paljon suurempia kuin 10 C virtaa. NiCd-akun virransyöttökyky toimii poikkeuksellisen laajalla alueella ja se toimii hy- vin myös pakkasessa. /12/

Mekaanista rasitusta NiCd-akku kestää erinomaisesti, minkä vuoksi sitä käytetäänkin paljon teollisuudessa. Hyvän mekaanisen keston ansiosta akku sopisi liikkuviin käyttökohteisiin, mutta huonon energiatiheuden takia taas ei. Kennoja voidaan valmistaa erilaisiin käyttötarkoituksiin sopiviksi, esimerkiksi noin +70 °C lämpötilaan asti. Käyttöikä on kohtalainen, oikein käytettynä noin 1000 sykliä. NiCd-akulla on muisti-ilmiö, jota tosin on saatu vähennettyä kehityksen myötä. /12/

NiCd-akulle on tehtävä ensimmäisellä kerralla alkulataus, joka on pitkäaikainen ja kestää jopa noin vuorokauden. Tämän jälkeen sitä voidaan käyttää normaalisti, mutta täysi kapasiteetti saavutetaan kahdesta kolmeen lataus-purku syklin jälkeen. Monissa käyttökohteissa vaaditaan akulta pikalatausominaisuutta. Tämä akku kestää normaali lämpötiloissa (5 – 45 °C) pikalatausta. Kylmässä pikalataus tuottaa painetta kennoihin, mikä aiheuttaa kaasun purkautumista kennoista. Hitaammalla latauksella ei painetta synny. Kuumassa lataaminen pienentää akun elinikää, eikä akku ota latausta kunnolla vastaan, vaan varaustaso jää jopa puoleen nimellisestä tasosta. /12/

NiCd-akkua säilytetään kuivassa ja viileässä paikassa tyhjänä. NiCd-akkua on syytä käyttää eli ladata täyteen ja purkaa, mikäli sitä säilötään pitkiä jaksoja (vuosia). NiCd-akkua ei saa koskaan purkaa oikosululla (niin kuin ei mitään akkua). NiCd-akun itsepurkautuminen on hyvin suurta, sillä jo ensimmäisen vuorokauden aikana täysi akku menettää varauksestaan 10 % huoneenlämmössä ja normaalioloissa itsepurkautuminen jatkuu (noin 10 % kuukaudessa) suurena pienentyen kuitenkin selvästi täyteen akkuun verrattuna. Suuri itsepurkautuminen rajoittaa NiCd-akun käyttökohteita. /12/

3.2.2 Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH)

Hieman uudempi nikkeli-metallihydridiakku tuli käyttöön 1980-luvulla. Tässä positiivinen elektrodi on nikkelihydroksidia ja negatiivinen metallihydridiä. Elektrolyytinä toimii kaliumhydroksidi. Edelliseen NiCd-akkuun nähden hyvänä puolena tässä on paljon suurempi ominaisenergia, ja muisti-ilmiön lähes täydellinen puuttuminen. Tehon syöttökyky on myös verrattain hyvä. /12/

NiMH-akku ei ole kovinkaan hyvä nikkeliakku, sillä tällä akulla on matala virransyöttökyky, itsepurkautuminen on varsin suurta jopa 20 – 30 % kuukaudessa, ja latausaika pitkä. NiMH-

akun kestoikään vaikuttaa merkittävästi sen käyttö. NiMH-akkua ei ole suotavaa purkaa kokonaan, vaan se täytyy ladata ennen syväpurkua, kuitenkin lievän muisti-ilmiön välttämiseksi NiMH-akku on purettava silloin tällöin kokonaan. /12/

NiMH-akun käyttöikä on kohtalaisen suuri, sillä se kestää käytössä 5 – 10 vuotta. Tähän vaikuttavat monet tekijät, jotka on kerrottu luvussa 2.2.4 akun käyttöikä. Käyttöikää pienentävät aina syväpurkaukset, ja tämä NiMH-akku kestää niitä noin 600 – 1200, kun akun DOD on 80 %. Pienempiä purku- ja latauskertoja NiMH-akku kestää huomattavasti enemmän, niin kuin muutkin akut. Esimerkiksi NiMH-akun sykli-ikä voi olla yli 90 000 lataus-purku-jaksoa, jos käytetään varaustilasta alle 10 %:n kapasiteettia. /12/

Matalissa lämpötiloissa ladattaessa NiMH-akun kennojen sisäinen paine kasvaa merkittävästi, joten lataus tulisi suorittaa noin 10 – 45 °C lämpötilassa. Muuten NiMH-akun lataus on varsin joustavaa, kunhan vältetään ylilatausta ja lämpenemistä. Myös liikkuvien sovel-luskohteiden jarrutusenergia saadaan talteen hyvän tehon käsittelykyvyn ansiosta. Toimintalämpötila-alue on kuitenkin varsin laaja -30 – +65 °C. NiMH-akku tosin menettää kapasiteettia toimintalämpötila-alueen kummassakin päässä. Alle -20 °C lämpötilassa NiMH-akun kapasiteetti putoaa reilusti, niin kuin yli +45 °C lämpötilassakin. Samoin kuin NiCd-akulla tämäkin kannattaa säilyttää täysin tyhjänä, mutta säilytyslämpötilan ei välttämättä tarvitse olla viileä. /12/

NiMH-akku on varsin hyvä vaihtoehto liikkuviin sovelluskohteisiin ominaisuuksiensa vuoksi. 1990-luvun alussa oli vain kaksi järkevää akkutyyppeä näissä kokoluokissa, lyijy-akku ja nikkeli-kadmiumakku. NiMH-akusta ei uskottu tulevan NiCd-akun korvaajaa, mutta nykyään NiMH-akusta saadaan tehoa vähintäänkin saman verran. NiMH-akku alkaa olla syrjäyttänyt lyijy- ja NiCd-akut sähköautokäytöissä, mutta toisaalta litium-ioniakut valtaavat markkinat. Lyijyakkuun verrattuna ero on energiatiheydessä ja sykli-ikässä, kun taas nikkeli-kadmiumakkuun verrattuna NiMH-akulla on parempi energiatiheys eikä siinä ole myrkyllistä kadmiumia. NiMH-akku on myös varsin edullinen, mutta kuitenkin kalliimpi kuin lyijy-akku. /12/

Edellisen tavoin NiMH-akku on ongelmajätettä nikkelin ollessa myrkyllistä. NiMH-akku ei kuitenkaan ole niin vaarallinen ihmisille kuin NiCd-akku, koska myrkyllistä kadmiumia ei

ole käytetty. Akun raaka-aineet voidaan kierrättää uudelleenkäyttöä varten. Kennoja valmistetaan pääasiassa sylinterimäiseen muotoon ja nappikenoiksi. Kummallakin muodolla on omat hyvät ja huonot ominaisuutensa.

3.3 Litium-ioniakut

Litium-ioniakuilla on yleensä suuri energiatiheys, joka johtuu hyvin kevyestä litiummetallista. Litiumilla on myös suuri sähkökemiallinen jännite, joka edesauttaa korkeaan hyötysuhteeseen. Nämä asiat tekevät litiumista hyvin mielenkiintoisen ja varteenotettavan ratkaisun akkumateriaalina. /2/, /3/, /18/

Litium-ioniakkujen kennojännite on tyypillisesti 2,4 – 3,8 V tienoilla, ja parhaimmillaan päästään käyttöjännitealueella n. 4,2 V:iin. Litium-ioniakuilla on yleisesti hyvä energia- sekä kapasiteettihyötysuhde. Energiahyötysuhde tarkoittaa akun purku- ja latausenergioiden suhdetta. Jos energiahyötysuhde on esimerkiksi 95%, niin akkuun ladattavasta energiasta 5 % menee lopulta lämmöksi. Kapasiteettihyötysuhde on akusta purettavan varauksen suhde edellisen latauksen aikana saatuun sähkövaraukseen. /2/, /3/, /18/

Litium-ioniakkujen ominaisenergia on selvästi suurempi kuin nikkeliakkujen. Hyvänä puolenä on myös muisti-ilmiön puuttuminen. Itsepurkautuminen on varsin vähäistä, noin 5 % kuukaudessa 20 °C lämpötilassa, mistä ei ole juuri haittaa tyypillisissä sovelluksissa. Itsepurkautuminen nikkeli-metallihydridiakulla on 30 % ja nikkeli-kadmiumakulla 20 % kuukaudessa. /2/, /3/, /18/

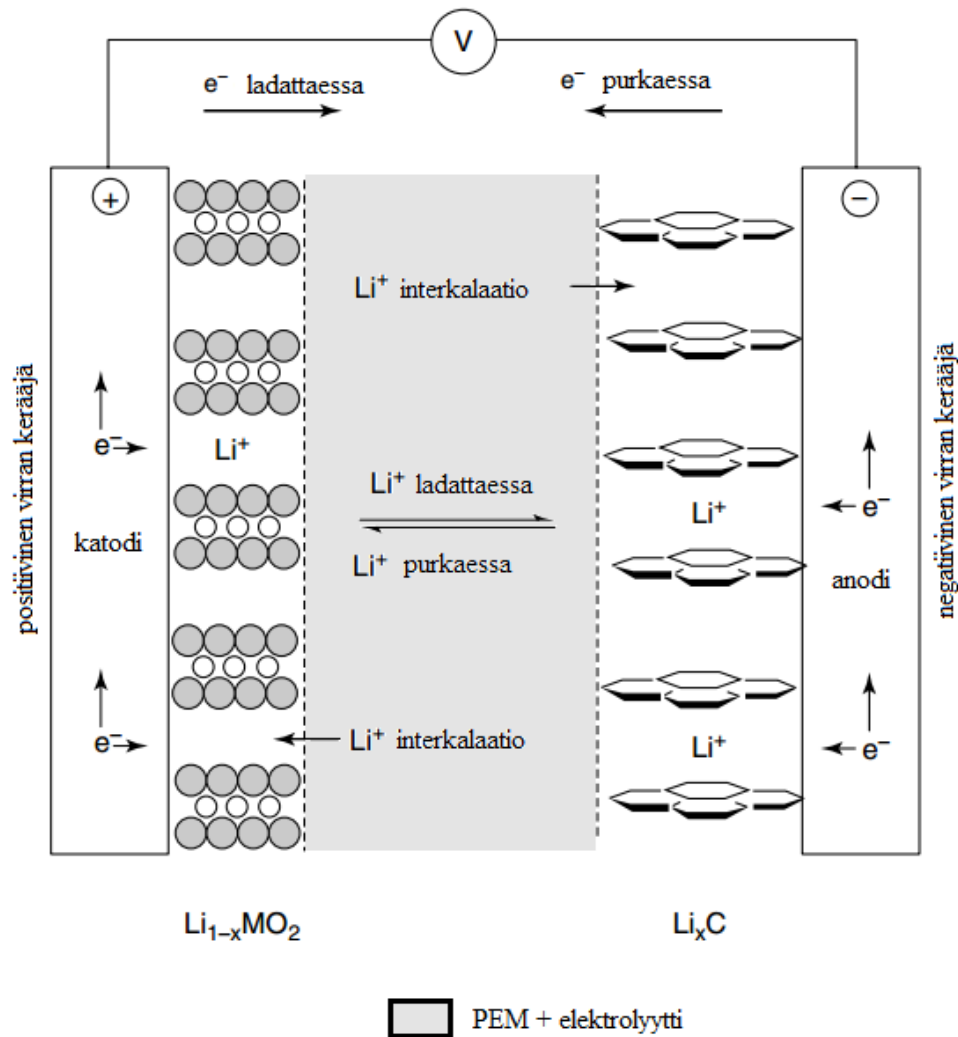
Litium-ioniakuilla huonona puolenä on hankalampi lataus ja purku. Nämä on suoritettava oikein vaaratilanteiden ja akun hajoamisen välttämiseksi. Esimerkiksi akun ylikuumentuminen saattaa aiheuttaa vaaratilanteen. Litium-ioniakuilla käytetään kuitenkin valvontapiirejä ali- ja ylilatauksen estämiseksi. Kennojännitteen pudotessa alle 1,5 V:n tapahtuu akun kuparissa pysyviä vaurioita. Ylilatauksella akku käyttäytyy kuten vastus, eli se alkaa tuottaa ylimääräistä lämpöä. /2/, /3/, /18/

Litium-ioniakuilla sykli-ikä on suhteellisen suuri, jopa tuhansia syklejä riippuen akusta. On kuitenkin selvää, että syväpurku vähentää akun sykli-ikää eli akun kapasiteetti alenee. Akku myös vanhenee käyttämättömänäkin, mihin vaikuttaa paljolti lämpötila. Korkeammassa

lämpötilassa litium-ioniakun vanheneminen kasvaa suhteellisen paljon. Myös jatkuva täysi varaustila heikentää joidenkin litium-ioniakkujen kapasiteettia. /2/, /3/, /18/, /40/

Pääasiassa akun ominaisuuksiin vaikutetaan katodimateriaalilla, mutta tietenkin anodillakin on merkitys. Anodimateriaali litium-ioniakuissa on yleensä hiilen esiintymismuoto grafiitti, mutta joissakin akuissa on muita yhdisteitä. Anodimateriaalia pyritään kehittämään koko ajan, jotta saataisiin akun ominaisuuksia parannettua. Esimerkiksi amorfisen tinakomposiittioksidin (ATCO) esitteli Fuji Photo Film yhtiö vuonna 1995. Tällä anodimateriaalilla voidaan saada kaksinkertainen ominaisenergia verrattuna grafiitilla saatavaan. Kuitenkin tällä materiaalilla on omat ongelmansa, sillä se kärsii peruuttamattomasta kapasiteetin menetyksestä ensimmäisessä syklistä Li^+ -ionien kulutuksen takia. Lisäksi sillä on huono sykli-ikä, joka johtuu elektrodin tilavuusmuutoksista. Myös siirtymämetallioksidit (Co, Ni, Cu, tai Fe) ovat lupaavia vaihtoehtoja anodimateriaaliksi. Niitä ehdotti Poizot jo vuonna 2000. Nämä metalleja sisältävät materiaalit eivät reagoi litiumin kanssa ja voivat tuottaa kaksi tai kolme kertaa niin korkean ominaisenergian grafiittianodiin verrattuna. Mutta nämäkin materiaalit kärsivät peruuttamattomasta kapasiteetin menetyksestä. Varteenotettava anodimateriaali on litium-titanaatti, josta kerrotaan enemmän tässä luvussa kohdassa litium-titanaattiakku. /12/

Seuraavassa kuvassa 4 on esitetty litium-ioniakkujen sähkökemiallinen prosessi. Lataus ja purku.



Kuva 4. Litium-ioniakun yleinen kaaviokuva sähkökemiallisesta prosessista. Katodin puolella M tarkoittaa jotain metallia ja PEM protoninvaihtokalvoa (Proton exchange membrane). Interkalaatiolla tarkoitetaan litium-ionien tunkeutumista anodi- tai katodimateriaaliin. Tämä prosessi turvottaa joitakin materiaaleja enemmän kuin toisia, ja aiheuttaa samalla akun vähittäisen mekaanisen hajoamisen. /12/

Litium-ioniakkujen kokonaisreaktio on



3.3.1 Litium-kobolttioksidiakku (LiCoO₂/grafiitti)

Tämä akkutyypin tunnetaan myös lyhenteellä LCO. LCO-akkua on käytetty pienemmissä sovelluksissa 1990-luvun alkupuolesta alkaen. LCO-akkutyypin soveltuu digitaalikameroihin, matkapuhelimiin ja muihin pientä tehoa vaativiin kohteisiin. LCO-akun ominaisenergia (150 – 200 Wh/kg) on suurimpia käytössä olevista akuista, mutta kuitenkin tämä akku ei

sovellu suuritehoisiin käyttöihin. LCO-akkua ei saisi kuormittaa yli yhden C-arvolla, joten siitä ei saada suuria tehopiikkejä aikaiseksi. Valmistusmateriaali on hyvin kallista, ja akku on erittäin vaarallinen, koska joissain olosuhteissa sen lämpötila voi riistäytyä hallinnasta ja akku tuhoutua. Katodilla käytetään suhteellisen paljon kobolttioksidia (noin 60 % kobolttia moolimassasta) ja anodilla grafiittihiiltä. Epästabiiliutensa johdosta akkutyyppejä ei sovelleta suurissa akuissa ja mm. siksi LCO-akkutyyppi on jäämässä vähemmälle sovelluskohteissa, sillä sitä luotettavampia vaihtoehtoja on jo olemassa. /21/, /23/, /40/

3.3.2 Litium-polymeeriakku (LiPo) (LiCoO₂/grafiitti)

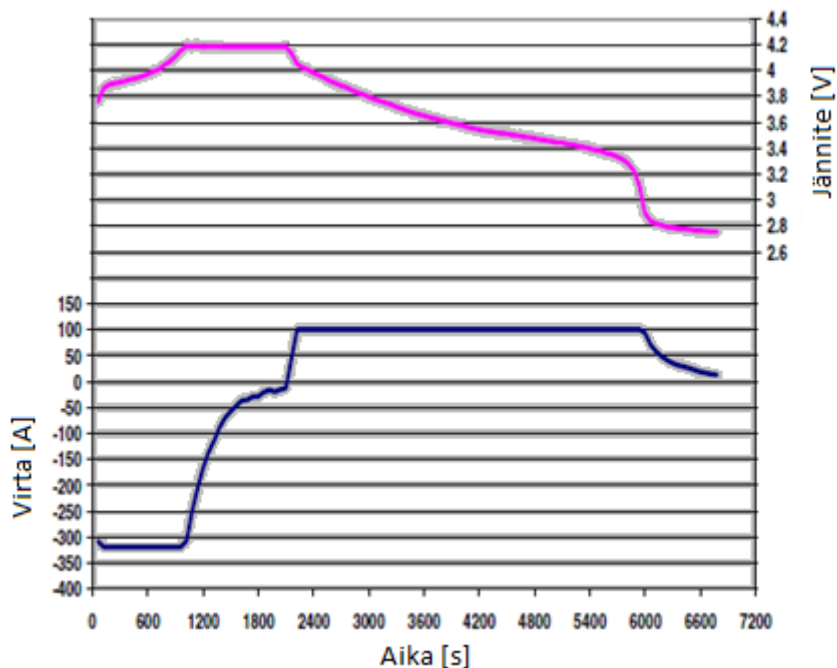
Litium-polymeerikennot ovat kehittyneet litium-ioni- ja litium-metalliparistoista. Ensisijainen ero on, että sen sijaan, että käytettäisiin nestemäistä litium-suolaelektrolyyttiä (kuten LiPF₆), jota pidetään orgaanisessa liuottimessa, akussa käytetään kiinteää polymeerielektrolyyttiä (SPE), kuten polyetyleenioksidia (PEO), polyakryylnitriilia (PAN), polymetyylimetakrylaattia (PMMA) tai polyvinylideenifluoridia (PVdF). Kiinteä elektrolyytti voidaan tyyppillisesti luokitella yhdeksi kolmesta tyyppistä: kuiva SPE, geelitynnyt SPE ja huokoinen SPE. Kuivaa SPE:tä käytettiin ensimmäisen kerran prototyyppiparistoissa noin vuonna 1978. Vuodesta 1990 lähtien useat organisaatiot, kuten Mead ja Valence Yhdysvalloissa ja GS Yuasa Japanissa, ovat kehittäneet paristoja geelityyillä SPE:illä. Vuonna 1996 Bellcore ilmoitti Yhdysvalloissa ladattavasta litium-polymeerikennosta, joka käyttää huokoista SPE:tä. Tyyppillisessä kennossa on neljä pääkomponenttia: positiivinen elektrodi, negatiivinen elektrodi, erotin ja elektrolyytti. Itse erotin voi olla polymeeri, kuten mikrohuokoinen polyeteeni- (PE) tai polypropeeni- (PP) -kalvo; siten, vaikka kennossa on nestemäistä elektrolyyttiä, se sisältää silti "polymeerikomponentin". Tämän lisäksi positiivinen elektrodi voidaan jakaa edelleen kolmeen osaan: litium-siirtymämetalli-oksidiin (kuten LiCoO₂ tai LiMn₂O₄), johtavaan lisäaineeseen ja polyvinylideenifluoridipolymeerin polymeerisideaineeseen (PVdF). Negatiivisella elektrodimateriaalilla voi olla samat kolme osaa paitsi, että hiili korvaa litium-metallioksidin. /12/

Litium-polymeeriakun elektrolyytti on muovikalvomainen kiinteän olomuodon polymeeraine. Tämä ei johda sähköä, mutta ionienvaihto on silti mahdollista. Kiinteän polymeerin ansiosta kyseinen akku on helpompi valmistaa ja se on varsin turvallinen. Vuotoriski on hyvin pieni. Akkutyyppien kennoilla ei ole muutorajoituksia, joten ne voidaan valmistaa hyvin

ohuiksi ja epäsäännöllisenkin muotoisiksi, mikä voi olla edullista akun sijoittamisen kannalta. /19/

Litium-polymeeriakulla on suurehko energiatiheys (373 Wh/dm^3) ja kohtalainen ominaisenergia, 146 Wh/kg . Sykli-ikä on yli 1200 sykliä, joka ilmoitetaan 80 %:n DOD-luvulle. Kuten muillakin litium-ioniakuilla itsepurkautuminen on varsin hidasta, noin 5 % kuukaudessa $20 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Kennojännite on $3,7 \text{ V}$ ja käyttölämpötila-alue on $-20 - +60 \text{ }^\circ\text{C}$. /2/, /18/

Litium-ioniakuille tyypillisesti myös litium-polymeeriakku kestää suuria virtoja. Pikalataus on samankaltainen kuin litium-rautafosfaattiakulla. Akkua ladataan aluksi vakiovirralla, kunnes napajännite saavuttaa $4,2 \text{ V}$ arvon. Tämän jälkeen jatketaan vakiojännitteellä latausvirran laskiessa. Kuvassa 5 on mittaustulos 100 Ah litium-polymeeriakun (LCO) pikalatauksesta sekä purusta. /2/, /18/



Kuva 5. Litium-polymeeriakun pikalataus (3.2 C negatiivinen virta) sekä purku (1 C positiivinen virta). Lataus loppuu noin 2000 sekunnin kohdalla, josta alkaa akun purku. Ylhäällä kennojännite ja alhaalla kennon läpi kulkeva virta. /18/

Pikalataus aloitetaan 320 A vakiovirralla (3.2 C) ensimmäiset 7 minuuttia, tämän jälkeen kennojännite on saavuttanut valmistajan antaman maksimijännitteen $4,2 \text{ V}$. Latausta jatketaan vakiojännitealueella $4,2 \text{ V}$, jolloin latausvirta laskee kuvan mukaisesti. 18 minuutin jälkeen akusta on ladattu jo 80 % ja täysi lataus saavutetaan noin 40 minuutin jälkeen. Lataus

vaihtuu purkuun, kun virran suunta muuttuu. Tämä kohta selviää kuvasta 5, kun virran arvo vaihtuu positiiviseksi. Purku suoritetaan vakiovirralla ja lopetetaan, kun kennojännite romahtaa 2,8 V:iin, jonka alle ei kennojännite saisi mennä. Tällöin myös virta romahtaa äkillisesti, jolloin akusta loppuu kapasiteetti. Testi on tehty 20 °C lämpötilassa. Latauksen aikana akun lämpötila nousi 38 °C:een, mikä osoittaa, ettei ylimääräistä jäähdytystä tarvita tämän akun tällaisessa pikalatauksessa. /18/. Toki akku ei saa olla voimakkaan purkamisen jälkeen tai korkean ympäristön lämpötilan vuoksi kuuma, kun lataus aloitetaan, koska ilmiselvästi akun pikalatauksessa on hyödynnetty sen ominaislämpökapasiteettia pitämään lämpötila kohturajoissa. 38 °C lähestyy jo lämpötilaa, joka on akun hyvinvoinnin kannalta epämieluisa. Jos akku olisi ollut esimerkiksi 40 °C:ssa pikalatauksen alkaessa, ja olisi päättynyt lähelle 60 °C lämpötilaa, ei tuo väittämä jäähdytyksen tarpeellisuudesta pikalatauksessa enää pitäisi paikkaansa.

Kyseisellä litium-polymeeriakulla, kuten yleisestikin litium-ioniakuilla, on käyttöalueella 20 – 40 °C lämpötilassa yli 95 %:n hyötysuhde. Se on merkittävästi parempi kuin esimerkiksi lyijyakuilta tai nikkeliakuilla, joilla se on vain 80 – 85 %. Akun käyttölämpötila-alueella energiahyötysuhde kasvaa lämpötilan noustessa. Litium-polymeeriakulla energiahyötysuhde on laskenut -10 °C lämpötilassa noin 80 %:iin. Kapasiteettihyötysuhde säilyy likimain 100 %:ssa, paitsi -10 °C lämpötilassa tai alle se alkaa laskea selkeästi. Käytettävä virta vaikuttaa energiahyötysuhteeseen. Suuremmilla lataus- ja purkuvirroilla akku lämpenee enemmän, jolloin kapasiteetistä enempi osa kuluu lämmöksi kuin pienien virtojen tapauksessa. /2/, /18/

Lähteen /18/ syklitestin mukaan litium-polymeeriakku ei tarvitse käyttölämpötila-alueella (20 – 40 °C) jäähdytystä. Syklitestillä akkua (100 Ah) ladattiin 50 A virralla ja akkua kuormitettiin myös 50 A virralla. Käytön aikana lämpötila nousi korkeintaan 4 °C. Kuitenkin matalissa lämpötiloissa akku menettää tehokkuutta energian sekä kapasiteetin osalta. Hyötysuhde paranee alle nollan asteen lämpötiloissa, jos akkua lämmitetään. /18/

3.3.3 Litium-rautafosfaattiakku (LiFePO₄/grafiitti)

LiFePO₄ katodimateriaalia alettiin tutkia vuonna 1997. Anodina toimii grafiitti (niin kuin monissa litium-ioniakuissa), joka on hiilen yleisin ilmenemismuoto. Grafiitti on suhteellisen halpaa, ja sillä saadaan akuille korkea ja vakaa jännite. Neitseellisen grafiitin saatavuus globaaleilla markkinoilla on tänä päivänä hyvä, mistä johtuen sen kierrätys on jäänyt toistaiseksi

huonolle tasolle. Grafiitin huonona puolena on sen jossain määrin heikko turvallisuus. Grafiitti ei syty helposti, mutta sytyttyään se palaa hyvin, eli akku sisältää merkittävän määrän palokuormaa grafiitin muodossa. LiFePO_4 akku soveltuu suurta varauskykyä tarvitseviin laitteisiin, kuten kannettaviin tietokoneisiin ja sähköajoneuvoihin. LiFePO_4 akku tai lyhemmin käytetty termi LFP on tällä hetkellä yksi hyvä vaihtoehto sähköautoihin ja muihin raskaimpiin sovelluskohteisiin. LFP-akulla on keskimääräinen ominaisenergia litium-ioniakkujen joukossa. Akkutyyppejä käytetään paljon Kiinassa sähköautoissa ja -busseissa. LFP-akku on yhtä turvallinen, mutta tehokkaampi kuin lyijyakku. LFP-akun sykli-ikä on varsin suuri, jopa 5000 sykliä 80% DOD:llä ja 70 % DOD:llä 8000 sykliä. Testeissä on käytetty tyypillistä 0.5 C kuormitusvirtaa. /20/ /21/, /22/, /40/, /43/, /45/

LFP-akun raaka-aineita on helposti saatavilla ja ne ovat ympäristöystävällisiä sekä suhteellisen edullisia. Erityisesti positiivisena puolena voidaan todeta, että LFP-akkutyyppejä ei tarvitse kobolttia, jonka saatavuus voi uhata monien muiden litium-ioniakkujen massavalmistusta. Kyseinen akku kokonaisuudessaan on yksi edullisimmista litium-ioniakuista ja sillä on paljon hyviä ominaisuuksia ja hinnan oletetaan laskevan markkinoiden kasvaessa. Vaikka LFP-akku onkin kalliimpi kuin esimerkiksi lyijyakku on se kuitenkin sitä huomattavasti tehokkaampi, kestävämpi ja kevyempi. /21/, /22/, /40/, /43/

Litium-rautafosfaattiakun lataus on suhteellisen yksinkertaista. Se voidaan ladata vakiovirralla suoraan 95 %:n kapasiteettitilaan asti. Ainoastaan jos halutaan ladata akku täysin täyteen, on loppu ladattava vakiojännitelatauksella. Latausaika riippuu lataustyypistä ja tehosta, mutta se voidaan ladata 95 %:n kapasiteettiin asti hyvin nopeasti. Tämä asia on hyvin tärkeä ominaisuus monissa käyttökohteissa. /21/, /22/, /40/

Nimellinen kennojännite on 3,2 V, ja ylijännitettä saa olla peräti 0,7 V. Tämä helpottaa akun latausta eikä kennojen jännite-ero tarvitse tarkkaa balansointia. Akku tasaa itse noin 10 %:n erot. Kennon minimi käyttöjännite on 2,8 V. Kyseisen akun ylijännitelatauksessa syntynyt eksotermien lämpömäärä on hyvin alhainen. Liian suuri eksotermien lämpömäärä voi kuitenkin aiheuttaa tulipalon tai akun räjähdysriskin. LFP-akku on oikein käytettynä kuitenkin hyvin vakaa, ja sen termien sekä kemiallinen kestävyys ovat hyvät. Kennot ovat kiinteitä eivätkä sisällä hauraita tai särkyviä osia, joten akku kestää hyvin tärinää. Sitä voidaan käyttää eri asennoissa. Se on ympäristöystävällinen valmistaa ja kierrättää, koska ei sisällä mitään myrkyllisiä materiaaleja. Nämä tekijät ovat tärkeitä kokonaisympäristövaikutuksia arvioitaessa. /21/, /22/, /40/

Matalammissa lämpötiloissa akun kapasiteetti laskee, kuten myös lähellä suurimpia sallittuja lämpötiloja. Ihanteellisin käyttölämpötila on $+20 - +30$ °C tienoilla. Hieman korkeammilla lämpötiloilla kapasiteettiin ei juuri ole vaikutusta, mutta kennon käyttöjännite on hieman alhaisempi. Muutenkin akkua voidaan käyttää turvallisesti jopa $+60$ °C lämpötilassa ilman pysyviä vaurioita. Täytyy kuitenkin muistaa, että akut ikääntyvät nopeammin suurissa lämpötiloissa. /21/, /22/, /40/

Akun tehonsyöttökyky ei ole riippuvainen varaustilasta, koska sen sisäinen vastus pysyy likimain vakiona eri varaustiloissa (näin ei ole kaikilla akuilla). Ainoastaan hyvin pienellä varaustilalla sisäinen vastus kasvaa, mutta akkua ei muutenkaan saisi purkaa niin tyhjäksi. Tyhjää akkua voi kuitenkin säilyttää tietyn ajan (kuukausia) ilman pysyviä vaurioita, mikä ei monilla akuilla onnistu. Itsepurkautuminen on myös hyvin vähäistä. /21/, /22/, /40/

Kuormitustilanteessa jännitteen käyttäytyminen pysyy likimain vakiona eikä laske kuten lyijyakuilla. Näin ollen LFP-akusta saadaan nimellinen teho lähes koko käyttöalueella. Purettaessa suurilla virroilla nousee akun sisäinen vastus, mikä johtaa kasvavaan sisäiseen tehohäviöön. Vastaavaa efektiä ei huomaa esimerkiksi litium-mangaanioksidiaakulla (LiMn_2O_4). LiMn_2O_4 akulla taas sisäinen vastus muuttuu enemmän akun varaustilan (SOC) mukaan. LiMn_2O_4 akun pienillä ja suurilla varaustiloilla tasavirtaresistanssi (DCR) nousee, joten akusta saatava teho on parhailtaan noin 30 – 80 % SOC-arvoilla. LFP-akun (DCR) laskee lämpötilan noustessa. Vaikka LFP-akun sisäinen vastus säilyy lähes vakiona varaustilan mukaan, on LFP-akun sisäinen vastus kuitenkin isompi (noin 2,5 – 3 $\text{m}\Omega/20$ °C) kuin esimerkiksi LiMn_2O_4 akun (noin 1,4 – 1,6 $\text{m}\Omega/20$ °C). Tämä johtuu matalasta sähkönjohtavuudesta, joka onkin LFP-akun suurimpia haittapuolia eli tämä rajoittaa suuria virtoja. Tutkimusta paremman sähkönjohtavuuden kannalta onkin tehty. /21/, /22/, /40/

3.3.4 Litium-mangaanioksidiaakku (LiMn_2O_4 /grafiitti)

Kyseinen akkutyypin julkaistiin ensimmäisen kerran 1983. Se tunnetaan myös lyhenteellä LMO. Matalan sisäresistanssin myötä akku kykenee nopeaan virran hallintaan, jopa 30 C virran purkauspulssiin. Akun käyttöä rajoittaa kuitenkin jonkin verran verrattain pieni sykliikä. Tämän akun valmistusvariaatioilla pystytään vaikuttamaan elinikään, maksimaaliseen kuormitusvirtaan ja kapasiteettiin toistensa kustannuksilla. Esimerkiksi kennon kapasiteetin ollessa vain 1,1 Ah saadaan elinikää pidemmäksi. Tämä akku soveltuukin hyvin hetkellisiä

suuria virtoja tarvitseviin kohteisiin, joissa ei tarvitse käyttää merkittävää osaa akun kapasiteetista. /23/, /40/

Litium-mangaanioksidiaikut ovat pienempiä ominaisenergioiltaan verrattuna muihin litium-ioniakkutyyppeihin, vain noin 100 – 150 Wh/kg. Tekniikka on varsin luotettava ja edullinen, mutta on väistymässä markkinoilta. Tämä pätee grafiitin ollessa anodimateriaalina. LMO-akkua voidaan kuitenkin yhdistää litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidin (NMC) kanssa. Katodimateriaali voidaan tehdä LMO ja NMC sekoituksesta anodin ollessa edelleen grafiittina. NMC lisäyksestä saadaan säädeltyä ominaisenergian, ominaistehon ja sykli-ikänsuhdetta. Eri metallien ominaisuuksia esitellään hieman seuraavassa kappaleessa, jossa käsitellään NMC-akkua. Lisäksi piitä voidaan lisätä grafiittianodille, millä saavutetaan 25 % kapasiteetin kasvu. Samalla tämä tekee akusta epävakaamman ja sen sykli-ikä pienenee, koska pii turpoaa voimakkaasti interkalaation seurauksena. /23/, /40/, /43/, /57/

3.3.5 Litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidiaakku (LiNiCoMnO₂/grafiitti)

Hieman monimutkaisempi, uusimpiin lukeutuva, akkumateriaaliyhdistelmä on litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidiaakku, josta käytetään lyhennettä NMC. Tämä akkutyyppeihin on tällä hetkellä ehkä menestynein litium-ioniakku. Katodilla käytetään nikkelin, mangaanin ja koboltin yhdistelmää, joita käytetään muutamissa eri moolisuhteissa (1-1-1, 5-3-2, 4-3-3, 6-2-2, 8-1-1 jne.). 1-1-1 suhde tarkoittaa, että kaikkia aineosia käytetään saman verran moolina eli kolmannes kutakin. Täten NMC akun pystyy yksilöimään erilaisiin tarkoituksiin. Esimerkiksi yhdessä kennossa voi kapasiteetti olla 2,8 Ah ja se kykenee tuottamaan 4 – 5 A purkuvirran. Kun taas eri lailla optimoituina voi samankaltaisen kennon kapasiteetti olla 2,0 Ah, mutta se pystyy tuottamaan jopa 20 A purkuvirran. /40/

Katodin raaka-aineiden suhteilla on energian ja kuormitettavuuden lisäksi muitakin vaikutuksia. Esimerkiksi sykli-ikä muuttuu erilaisilla suhteilla. Lisäksi raaka-aineiden saatavuus ja hinta ovat vaikuttavia tekijöitä. Varioimalla pitoisuuksia saadaan kalliin ja niukasti saatavilla olevan koboltin menekkiä hallittua verrattuna täysin kobolttipohjaisiin akkutyyppeihin. Nikkelillä saavutetaan korkea ominaisenergia, mutta se aiheuttaa heikon stabiiliuden. Mangaanin vaikutukset akun ominaisuuksiin ovat alhainen sisäinen vastus, mutta pieni ominaisenergia. Koboltin lisääminen tuottaa enemmän ominaistehoa. Näiden metallien sopivilla yhdistelmillä saadaan kunkin vahvuuksia käytettyä halutusti. /40/

Lisättäessä piitä grafiittianodiin voidaan saavuttaa yhdelle kennolle 4 Ah kapasiteetti, mutta kuormitettavuus jää heikommaksi ja sykli-ikä lyhenee. Piin lisääminen aiheuttaa myös haittapuolena anodin kutistumisen ja laajenemisen käytön myötä, mikä tekee kennosta mekaanisesti epävakaa. Uusilla elektrolyyteillä ja lisäaineilla voidaan saavuttaa 4,4 V kennojännite ja parantaa kapasiteettia. /40/

NMC:n käyttökohteina ovat sähköautot, sähköpyörät, teollisuus ja muut sähköiset voimalinjat. Esimerkiksi NMC 6-2-2 suhdetta käytetään Nissan Leaf, Hyundai Kona Electric, Jaguar I-PACE ja Audi e-tron autoissa. 8-1-1 suhde on tulossa sähköautoihin ja kobolttin osuutta saadaan pienennettyä esimerkiksi moolisuhteesta 1-1-1, jossa on noin 33 % kobolttia moolina. 8-1-1 suhteessa on siis vain 10 % kobolttia moolina. 8-1-1 suhde parantaa kapasiteettia sillä nikkelin osuus kasvaa. Tehoa ja kokoa saadaan parannettua 9-5-5 suhteella. Sitä kehitetään tällä hetkellä, mutta tässä moolisuhteessa on kuitenkin paljon kobolttia. Tällaisella moolisuhteella varustetun akun luulisi tulevan käyttöön pienissä määrin ja harkittuihin pieniin ja tehoa vaativiin kohteisiin. Paristojen käytössä pyritään nykyään vähentämään kobolttia ja siirtymään enemmän nikkelpohjaisiin katodeihin, lähinnä kustannusten takia. NMC-akkutyypin perhe kasvaa monimuotoisuudessaan ja on valtaamassa alaa. /40/, /43/

3.3.6 Litium-titanaattiakkuperhe (NMC/Li₄Ti₅O₁₂ tai X/Li₄Ti₅O₁₂)

Litium-ioniakkujen suorituskykyisimpiä akkutyyppejä ovat litium-titanaattiakut LTO. Tässä anodina ei käytetä grafiittia vaan litium-titanaattia. Katodina on useimmin NMC, mutta useita eri katodimateriaaleja voidaan soveltaa. Li₄Ti₅O₁₂:lla saadaan akun turvallisuus hyvälle tasolle. Akkutyypin sallii suuret lataus- ja purkuvirrat. Tässä akkutyypissä yhdistyvät monet hyvät puolet. Niihin sisältyvät erittäin nopea lataus- ja purkuaika, eli akkua voidaan kuormittaa suurilla virroilla, jopa 10 C arvoilla. Akku soveltuu erittäin hyvin pikalatauksiin. Tehotiheys on hyvä. Anodimateriaalina käytetyn litium-titanaatin ansiosta akulla on pitkä sykli-ikä ja hyvä toimivuus laajalla lämpötila-alueella. Pitkä sykli-ikä selittyy LTO materiaalin muuttumattomuudesta latauksen ja purun aikana. Litium-ionien interkalaatio ei käytännössä aiheuta muodonmuutoksia anodilla. Tämän akun käyttölämpötila-alue on laaja, esimerkiksi kapasiteetista on peräti 80 % käytettävissä -30 °C lämpötilassa. Litium-titanaatti anodimateriaalina on perinteisesti käytettyä grafiittia selvästi turvallisempi. Litium-titanaatti ei reagoi ilman vakavaa väärinkäyttöä eikä se pala. Grafiitti sen sijaan toimii polttoaineena. Kompromissina tulee pienempi kennojännite, joka on noin 2,4 V, sekä korkeahko hinta.

Tämä akkutyyppe on ainakin vielä kalleimmasta päästä. Ainakin yksi syy hintaan on se, että anodina käytetään $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$:a halvan grafiitin asemasta. Vaihteleva katodimateriaali vaikuttaa hintaan (lähinnä NMC-akun moolisuhteiden vuoksi). LTO-akkutyypillä on anodimateriaalista johtuen pienempi ominaisenergia, joten saman energiamäärän saamiseksi tarvitaan enemmän raaka-aineita, mikä lisää kustannuksia. /36/, /37/, /38/, /39/, /40/, /12/

Yhdysvaltalainen akkuvalmistaja Altairnano sanoo NMC/LTO litium-titanaattiakkunsa kestävän jopa 25 000 lataus-purku-kertaa. Sama valmistaja ilmoittaa akun ominaistehoksi peräti 4 kW/kg ja 7,5 kW/dm³. Altairnanolta on saatavilla 70 Ah:n LTO kenno, jonka ominaisenergia on 82 Wh/kg. Maksimissaan jatkuvaa latausta se sietää 7 C virralla ja myös saman 7 C purkauksessa. 10 sekunnin pulssina noin 13 C virta on mahdollinen. Toimintalämpötila on laaja (-50 – +60 °C). Tässä kennossa hyödynnetään nanotekniikkaa. /36/, /37/, /38/, /39/, /52/

Toshiballa on 2,4 V korkean tehon litium-titanaattikennoja (2,9 Ah tai 10 Ah) ja korkean energian 2,4 V litium-titanaattikennoja (20 Ah ja 23 Ah). 2,9 Ah kenno kestää 420 W purkutehon (60 C-arvo) ja 480 W lataustehon (69 C-arvo) 50 % SOC tilassa 10 sekunnin ajan 25 °C lämpötilassa. 2,9 Ah kennon massa on vain noin 150 g. Kennon sykli-ikä on varsin korkea, jopa 40 000 sykliä 10 C kuormituksella 35 °C lämpötilassa. Tämä 2,9 Ah kenno pystytään lataamaan 80 %:n SOC-tilaansa (SOC: 0 – 80 %) jopa yhdessä minuutissa. /58/

Toshiban 10 Ah kenno (2,4 V) kestää 1800 W purkutehon (75 C-arvo) ja 1500 W lataustehon (63 C-arvo) 50 % SOC tilassa 10 sekunnin ajan 25 °C lämpötilassa. Nämä C-arvot ovat erittäin korkeita. 10 Ah kennon massa noin 510 g. Kennon sykli-ikä on 20 000 sykliä (kun alkuperäisestä kapasiteetistä on jäljellä 90 %) 35 °C lämpötilassa. Tämä 10 Ah kenno pystytään lataamaan 80 %:n SOC-tilaansa (SOC: 0 – 80 %) jopa kolmessa minuutissa. /58/

20 Ah Toshiban kennon energiatiheys on 176 Wh/l ja massa on noin 515 g. Kennon sykli-ikä on 20 000 sykliä (kun alkuperäisestä kapasiteetistä on jäljellä 70 %) 3 C kuormituksella ja 25 °C lämpötilassa. Tämä 20 Ah kenno pystytään lataamaan 80 %:n SOC-tilaansa (SOC: 0 – 80 %) kuudessa minuutissa. Toimintalämpötila-alue on varsin laaja -30 – +45 °C. /58/

Toshiban korkeimman ominaisenergian kenno on 23 Ah kenno, jonka energiatiheys on 202 Wh/l. Tämän kennon massa on 550 g. Näiden Toshiban LTO-kennojen katodimateriaalista ei ollut mainintaa lähteessä. /58/

Huonona puolena NMC/LTO-akussa on niukasti saatavan koboltin käyttö. Osittain siksi LTO-anodimateriaalin kanssa käytetään ja tutkitaan monia muitakin katodimateriaaleja. Näitä katodimateriaaleja ovat mm. LCO, NMC, LFP, LMO, LAMO (litium-alumiini-mangaanioksidi), LNMO (litium-nikkeli-mangaanioksidi). LCO/LTO-akku (2,5 V) on hyvä suorituskyvyltään, mutta sen suuri koboltin tarve ja kallis hinta rajoittavat kehitystä. LCO-katodissa on noin 60 % moolimassasta on niukasti saatavaa ja kallista kobolttia. NMC/LTO-akku on turvallisempi, edullisempi ja laajemmin sovellettavissa verrattuna LCO/LTO-akkuun. NMC:n eri moolisuhteilla (kobolttia saadaan oleellisesti vähemmäksi kuin LCO tapauksessa) saadaan tässäkin akussa säädellyksi ominaisuuksia samoin, kuin NMC/grafiitti -akun tapauksessa. /11/

Yksi mielenkiintoinen ja varteenotettava akku on LFP/LTO (2,0 V) sen katodimateriaalin hyvien ominaisuuksien vuoksi, joihin sisältyi ympäristöystävällisyys ja raaka-aineiden hyvä saatavuus. LMO/LTO-akku on myös kilpailukykyinen vaihtoehto. Tutkimuksen alla on useita katodivaihtoehtoja LTO anodin pariin. Esimerkiksi LAMO/LTO (2,5 V) -akulla tehdyt syklistit ovat osoittaneet hyvää sykli-ikää. Tutkimusten mukaan akku säilyttäisi alkuperäisestä kapasiteetista 91,7 %:a 3600 syklin jälkeen ja 86 %:a voisi säilyä jopa 10 000 syklin jälkeen. Toinen esimerkki on LNMO/LTO (3,2 V) -akku, jolla on mahdollisesti tulevaisuudessa paljon käyttöä korkean ominaisenergian ja tehosiheyden sovelluksissa. Tämän hyvänä puolena on LTO-akkujen joukossa korkea kennojännite. LNMO/LTO-akun kaupallistumisessa on kuitenkin vielä ongelmia, akun spinellimateriaalin stabiloinnissa, elektrolyyttien hajoamisen ja samanaikaisen elektrodien ja elektrolyytin rajapinnassa tapahtuvassa heikennyksessä. Muitakin yhdistelmiä on kehitteellä korkeamman kennojännitteen saamiseksi, mutta näissäkin on ongelmia. /11/

3.3.7 Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiakku (LiNiCoAlO₂/grafiitti)

LiNiCoAlO₂ akku tunnetaan lyhenteellä NCA, joka on hyvin samankaltainen NMC-akun kanssa. Tesla käyttää sähköautoissaan tätä Panasonicin tekemää akkutyyppeä 18650, joten potentiaalia kehitykselle on. Alumiinin lisäyksellä saadaan stabiiliutta. Tässäkin tekniikassa

on koboltin osuutta saatu lasketuksi puoleen alkuperäisestä. Nikkelin ja alumiinin osuuden jälkeen jää n. 15 % kobolttia mooliosuutena. /40/, /43/

3.4 Litium-ioniakkujen yhteenveto

Seuraavassa taulukossa 1 on koottuna yhteen muutamien litium-ioniakkujen tyypillisiä ominaisuuksia.

Taulukko 1. Eri litium-ioniakkujen ominaisuuksia. /40/

	Kennojännite nimellinen [V]	Kennojännite käyttöalue [V]	Ominaisenergia [Wh/kg]	Lataus C-arvo	Purku C-arvo	Sykli-ikä	Sovelluskohteet	Hinta [€/kWh]
LCO	3,60	3,0-4,2	150-200 (240)	0,7-1	1 (sammutus* 2.5 V)	500-1000	Pienelektronikka	
LMO	3,7-3,8	3,0-4,2	100-150	0,7-1	1; joillain 10 ja pulssina 30 (5 sek) (sammutus 2.5 V)*	300-700	Sähkötyökoneet, sähkökäyttöiset voimansiirrot, lääketieteelliset laitteet	
NMC	3,6-3,7	3,0-4,2	150-220	0,7-1	1; joillain 2 (sammutus 2.5 V)*	1000-2000	Sähköpyörät, sähköautot, lääketieteelliset laitteet, teollisuus	378
LFP	3,2-3,3	2,5-3,65	90-120	1	1; joillain 25; 40 A (kennolla) pulssi (2 sek) (sammutus 2.5 V*, alle 2 V jännite aiheuttaa hajoamisen)*	>2000	Laitteet, jotka tarvitsevat suuria kuormavirtoja ja kestävyyttä	522
NCA	3,60	3,0-4,2	200-260 (300)	0,7	1 (sammutus 3 V)*	500	sähköautot (Tesla), teollisuus, lääketieteelliset laitteet	315
LTO	2,40	1,8-2,85	50-80	1; max 5	10; pulssina 30 (5 sek) (sammutus 1,8 V)*	3000-7000	UPS, sähkökäyttöiset voimansiirrot (Mitsubishi, Honda), aurinkosähköiset katuvalaisimet	904

*Sammutus tarkoittaa akun purkamisen lopettamista viimeistään annetulla sammutusjännitteellä.

LFP-akku pystyy antamaan hetkellisesti kovia virtapiikkejä, mutta ominaisenergia ei ole paras mahdollinen. NCA-akulla on taas ominaisenergia näistä parhain, mutta isoja C-arvoja ei saada, ja sykli-ikä olisi varsin keho. Tesla kuitenkin käyttää tätä akkutyyppeä, joten se lie-nee yhdessä Panasonicin kanssa onnistunut parantamaan sykli-ikää. Teslan akuista ei ole julkisuuteen tullut tietoa, että ne eivät kestäisi käyttöä. Lisäksi NCA on myös halvin var-teenotettavista akkutyypeistä, mistä on hintatieto saatavilla (315 €/kWh). NMC-akku vai-uttaa varsin hyvältä vaihtoehdolta, koska sillä on hyvä ominaisenergia, hyvä sykli-ikä ja sen hinta on kohtuullinen. Lisäksi NMC-akulla moolisuhteita pystytään manipuloimaan, jol-loin saadaan ominaisuuksia muokatuksi ja hintaan vaikutetuksi raaka-aineiden menekkiä va-rioidella. Lähinnä koboltin saatavuus on suurin ongelma, joka rajoittaa esimerkiksi LCO-akun käyttöä. LCO onkin varhaisempia litium-ioniakkutyyppejä ja on jäämässä vähemmälle käytölle. Samoin LMO-akku on myös jäämässä vähemmälle käytölle tai tämän tekniikan

hyvät puolet onkin otettu käyttöön NMC-akussa. LTO on taas sykli-ikältään lähes erinomainen, mutta ominaisenergia on heikko. Se on kallein näistä verratuista akkutyypeistä. Lataus LTO-akulla on maksimissaan 7 C tai korkeampi, mikä auttaa esimerkiksi nopeissa energian talteen ostoissa. Näitä tilanteita ovat mm. auton nopea jarrutus tai lastaajan kuorman lasku.
/40/

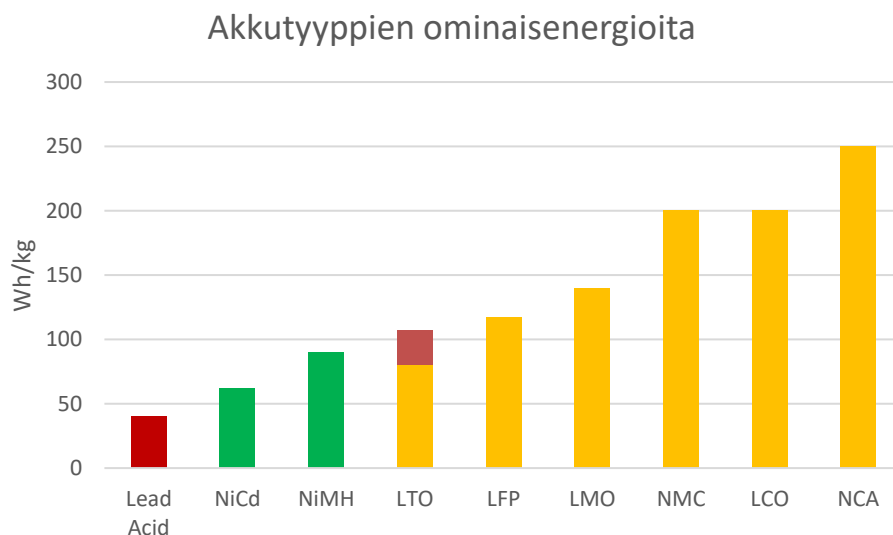
3.1 Eri akkutekniikoiden yhteenveto

Seuraavassa taulukossa 2 on yleisempien akkujen ominaisuuksia. Arvot ovat vain suuntaa antavia, mutta antavat kuvan eri akkujen eroista.

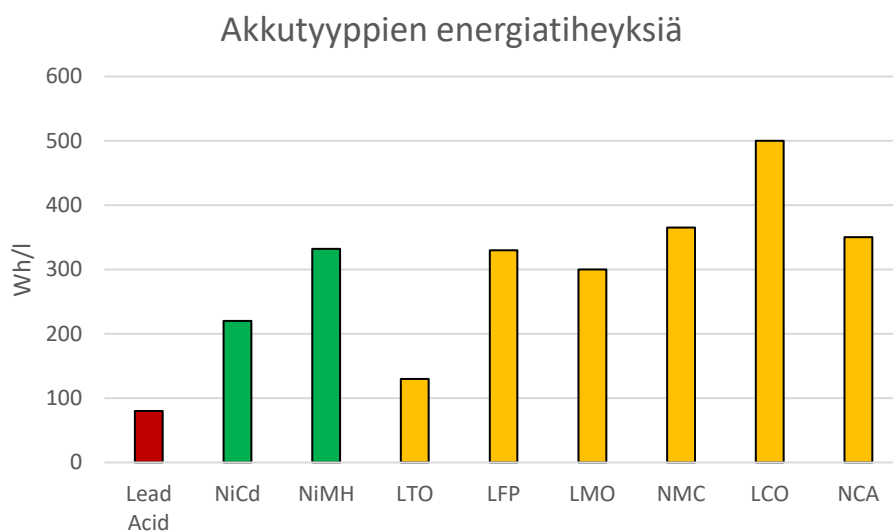
Taulukko 2. Eri akkujen ominaisuuksia. Turvallisuudessa numero 1 vastaa turvallisinta. Litium-ioniakut on koottu tässä yhdelle sarakkeelle käyttäen keskimääräisiä ominaisuuksia. Katso litium-ioniakkujen ominaisuuksia hieman tarkemmin taulukosta 1. /37/, /40/, /41/, /45/

Ominaisuudet\Akkutyypit	Lyijy	NiCd	NiMH	Li-ion
Ominaisenergia [Wh/kg]	10–50	18–80	23–92	80–260
Energiatiheys [Wh/l]	50-111	30-220	32-332	168-555
Ominaisenergia [W/kg]	100-120	330-460	500-800	700-8000
Sykli-ikä	200-300	1000-1500	300–1200	500> (7000)
Käyttölämpötila [°C]	-20–+55	-20–+70	-30–+65	-20–+60
Kennojännite [V]	2	1,3	1,2	2,0-3,6-3,8
Itsepurkautuminen [% / kk]	2-6	5-20	15-20	1-5
Turvallisuus	3	4	2	1-2

Kalenteri-ikää ei ole taulukossa, sillä se on monesta tekijästä riippuvainen, ja uusimmilla akkutyypeillä kalenteri-ikästä ei välttämättä ole vielä luotettavaa tietoa. Taulukon arvot ovat 20 °C lämpötilassa. Taulukossa 2 on litium-ioniakut käsitelty yhtenä ryhmänä, jossa on suuntaa antavia lukuja vertailua varten. Sykli-ikä voi esimerkiksi NMC/litium-titanaattiakulla olla jopa 25 000. Litium-ioniakkujen tarkempi taulukko on kappaleessa 2.3.3 litium-ioniakkujen yhteenvedossa /37/, /38/



Kuva 6. Akkutyypin vertailu ominaisenergian näkökulmasta. /40/



Kuva 7. Akkutyypin vertailu energiatiheyden näkökulmasta. /47/, /48/, /49/

Akkutyypin vertailussa yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on ominaisenergia. Monessa sovelluskohteessa on oleellista tietää energian määrä suhteessa massaan (kuva 6). LTO-akulla on vaihteluväli kuvassa 6. LTO-akun katodilla voi olla lähes mikä tahansa yhdistelmä ja kehitystyötä tällä saralla tehdään jatkuvasti, joten LTO-akun ominaisenergia voi muuttua

noista lukemista lähiaikoina. Myös energiatiheys (kuva 7) on tärkeä tieto. Tällä saadaan tietoa akun fyysisistä mitoista energiaan nähden. Kuviin 6 ja 7 on otettu lyijyakku, 2 nikkeliakku ja 6 yleistä litium-ioniakkuja. Selvästi litium-ioniakuilla on suurin ominaisenergia. /40/

Litium-ioniakkujen kehityksen huippua ei ole vielä nähty. Toisaalta näköpiirissä ei ole uusia akkukemioita, jotka ilman muuta syrjäyttäisivät litium-ioniakut. Tämän johdosta litium-ioniakkujen kehitykseen satsataan edelleen voimakkaasti. Yleisesti ottaen LFP, LCO, LTO, LMO, NMC, NCA ovat Li-ioniakkujen päätekijöitä. Lähitulevaisuudessa ei näytä olevan tulossa mitään uutta voittavaa tekniikkaa.

Litium-ioniakkujen lisäksi kehitetään myös esim. natrium- ja rikkiakkuja, jotka saattavat olla kiinnostavia suurikapasiteettisissa paikallissovelluksissa. Natriumakut eivät kuitenkaan kykene mobiilisovelluksissa kilpailemaan litium-ioniakkujen kanssa. Kaikilla ehdotetuilla akkukemioilla on omia puutteitansa, jotka rajoittavat niiden massatuotantoa ja hyväksyttävyyttä. Uuden läpimurron saavuttamiseksi tarvittaisiin merkittäviä tieteellisiä läpimurtoja. Näyttääkin siltä, että elämme vielä pitkään litium-ioniakkujen valtakautta.

Natriumakut kypsynevät nopeasti markkinoille litium-ioniakkujen rinnalle paikalliskäyttöihin. Rikkiakuilla on vielä monia ongelmia ratkottavaksi. Myös kiinteän elektrolyytin akut ovat vielä kehittymättömiä. Kaikkiaan näyttää siltä, että mitään erityisen dramaattista kehitysaskelta ei ole näkyvissä.

Seuraavat suuret kehitysaskleet otetaan ilmeisesti akkujen pakkaustekniikan alalla. Niin sanotut itsekannattavat elektrodit voivat auttaa kasvattamaan ominaisenergiaa ja energiatheyttä merkittävästi verrattuna nykyiseen tekniikkaan. Esimerkiksi lähde /56/ väittää saavuttavansa nelinkertaisen ominaisenergian ja energiatheyden verrattuna perinteisiin litium-ioniakkuihin. Nikola väittää saavuttavansa 1100 Wh/kg ominaisenergian materiaalitasolla ja 500 Wh/kg solutasolla mitattaessa. Akku kestää 2000 sykliä. Tiedot akusta ovat toistaiseksi vajavaisia, mutta ovat linjassa tutkijoiden odottamien tulosten kanssa, kun itsekannattavat rakenteet yleistyvät. /56/

3.2 Superkondensaattorit

Superkondensaattori on sähköinen energiavarasto. Funktionaalisesti ja kapasiteetiltaan se sijoittuu kondensaattorin ja akun väliin. Tavalliset kondensaattorit ovat sähköstaattisia tai

elektrolyyttikondensaattoreita, kun taas superkondensaattori on sähkökemiallinen. Superkondensaattorin elektrolyytin pinta-ala on paljon suurempi kuin kondensaattorin, ja näin saadaan suuri varauskyky. Toiminnallisena erona kondensaattoriin superkondensaattorilla on korkeahko sisäresistanssi, joka ei kuitenkaan ole akkujen sisäresistanssin suuruusluokkaa. Superkondensaattoreiden kennojännitteet ovat yleisesti matalia, joten työkonikäytöissä niitä on kytkettävä sarjaan sadoittain. Joillakin superkondensaattoreilla (parhaillaan 4 V) päästään samoihin kennojännitteisiin kuin litium-ionikennoillakin. /24/

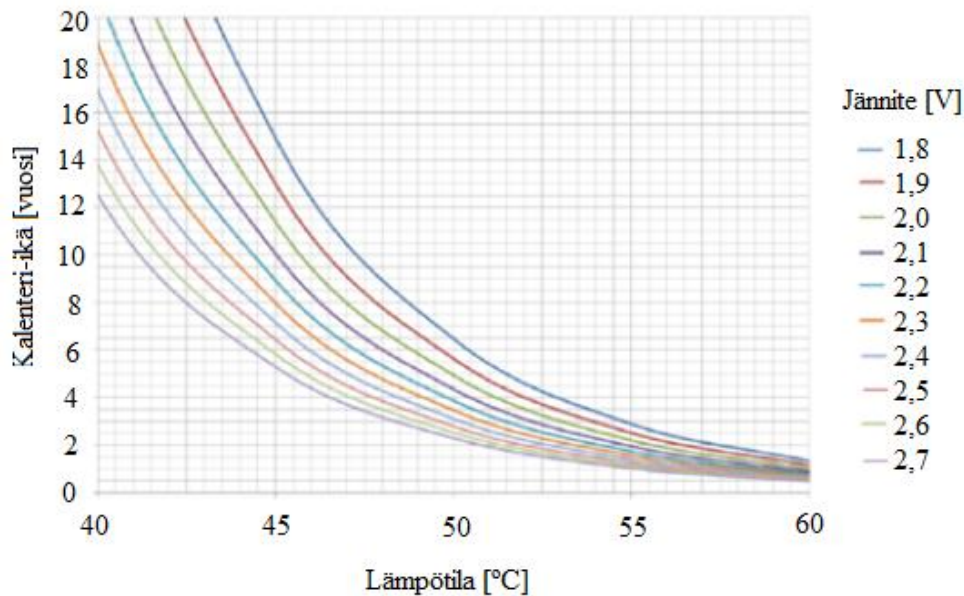
Akun käytössä tapahtuu sisäinen kemiallinen reaktio, mutta superkondensaattorissa ei. Akun sisäisessä kemiallisessa reaktiossa elektrodien materiaalissa energia varastoituu ja purkautuu, mikä aiheuttaa akun järjestelmän osien kulumista. Superkondensaattorilla energian varastoituminen ja purkautuminen perustuu elektrodien varauksen ja elektrolyytin ionien väliseen vuorovaikutukseen. Akun kemiallinen reaktio on hidas vapauttamaan energiaa verrattuna superkondensaattorin nopeuteen. Akussa tarvitaan ionien fyysistä liikkumista paikasta toiseen, mikä hidastaa sekä latausta että purkua. Kemiallisen reaktion seurauksena myös akun sykli-ikä on huomattavasti pienempi kuin superkondensaattorin. /24/

Muuten superkondensaattorin toiminta on samankaltainen akkuun verrattuna. Kondensaattori periaatteessa estää tasavirran kulun latautuessaan täyteen, mutta päästää vaihtovirran läpi. Superkondensaattorin suuri kapasitanssi saa tilanteen kuitenkin käytännössä näyttämään siltä, että sitä ladataan ja puretaan tasavirralla. Onhan tällaisellakin virralla taajuus. Se on vain hyvin matala. Jos kondensaattori ladataan ja puretaan vaikkapa minuutin aikana, tulee taajuudeksi 1/60 Hz. Kondensaattori siis toimii muutostilanteissa, eli se latautuu ja purkautuu syklittäisen virran mukaan.

Huonona puolena akkuun verrattuna on pieni energian varastointikyky ja nopea itsepurkautuminen (noin 5 % / vrk), mutta tavalliseen kondensaattoriin nähden energian varastointikyky on suuri. Kuitenkin monissa muissa ominaisuuksissa superkondensaattori onkin huomattavasti akkua parempi. Tosin energian varastointikyky on yksi tärkeimmistä ominaisuuksista sovelluskohteissa. /24/

Superkondensaattorilla on akkuun verrattuna suuri tehotiheys, nopea lataus ja purku, käyttöikä ja varsinkin sykli-ikä huomattavasti pidempi, jopa miljoonia syklejä. Superkondensaattorin sykli-ikä on käytännössä rajaton ja sen elinikä muodostuukin kalenteri-ään (>10 vuotta)

myötä. Vaikka superkondensaattori soveltuukin hyvin eri lämpötiloihin, on lämpötilalla kuitenkin dramaattinen vaikutus ikääntymiseen. Kondensaattoreiden käyttöikä lyhenee eksponentiaalisesti lämpötilan kasvaessa. Seuraava kuva 8 havainnollistaa tilanteen kalenterikäden näkökulmasta. /24/

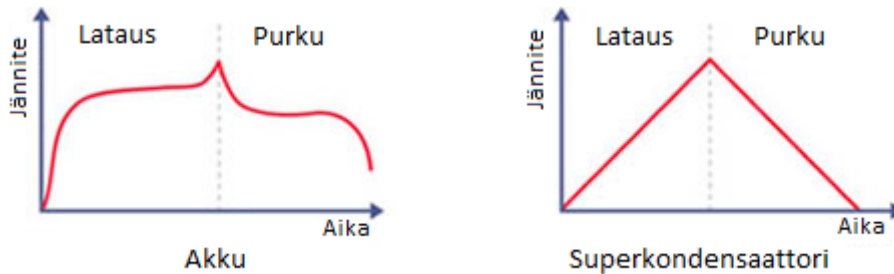


Kuva 8. Tyypillinen superkondensaattorin kalenteri-ikä lämpötilan funktiona. Kalenteri-ikä on huomattavasti suurempi 20 °C lämpötilassa. Sykli-ikä käyttäytyy samantapaisesti lämpötilan kasvaessa. /55/

Superkondensaattorilla on hyvä hyötysuhde sekä hyvin vähäinen huollon tarve. Hinnaltaan superkondensaattorit ovat suhteellisen kalliita. Superkondensaattori soveltuu kohteisiin, missä tarvitaan paljon tehoa lyhytaikaisesti. Nopea lataus ja purku ovat useisiin ratkaisuihin todella tärkeitä ominaisuuksia, esimerkiksi nykiviin käyttökohteisiin, kuten nostureille. Nosturi nostaa ja laskee taakkaa, jolloin superkondensaattoria voidaan käyttää lisätehonlähteenä. /24/

Superkondensaattori voi toimia hyvin monissa järjestelmissä hetkellisen lisätehon antajana, esimerkiksi akkujen rinnalla. Myös polttomoottorin ja sähkömoottorin hybridiyhdistelmissä superkondensaattoria käytetään tehonlähteenä sähkömoottorille. Esimerkiksi jarrutustilanteissa superkondensaattoria ladataan ja kiihdytyksessä puretaan. Yleisesti voidaan sanoa, että superkondensaattoreita voidaan käyttää samoissa sovelluskohteissa kuin akkujakin, esimerkiksi niiden rinnalla tai jopa akkujen tilalla. /24/

Superkondensaattorin ominaiskäyrä on oleellisesti erilainen kuin akun. Akun toimintajännitteessä on selvä vaakasuoraosa, kun taas superkondensaattorilla jännite muuttuu lineaarisesti. Kuvasta 9 käy ilmi akun ja superkondensaattorin ominaiskäyrän ero. /24/



Kuva 9. Akun ja superkondensaattorin ominaiskäyrät vakiolataus- ja purkuvirralla. Jännitteen käyttäytymisessä on suuri ero käytön aikana. /24/

Lineaarisen varauskäyrän johdosta superkondensaattorin jännitteen mittauksen avulla saadaan helposti tietoon energian määrä ja varaustila. Monilla akuilla toimintakäyrässä on lähes täysin vaakasuora osa, minkä takia jännitteen mittauksella on hyvin hankala saada varaustilaa selville. Energiavarastolta käyttösovelluksiin saatava tasainen jännite on kuitenkin parempi kuin muuttuva jännite. Superkondensaattorin jännite voidaan tasoittaa DC-DC-muuntimen avulla. Superkondensaattorin kapasitanssin C yksikkö on Faradi [F, As/V], tämän avulla voidaan laskea akuissa käytettävä energia E Jouleina [J] tai wattitunteina [Wh]. Energia Jouleina on

$$E = \frac{1}{2}CU^2, \quad (5)$$

missä U on kondensaattorin jännite ja C kapasitanssi. Tästä saadaan energia muunnettua wattitunneiksi jakamalla tekijällä 3600 s/h. /24/

Superkondensaattoreita voidaan kytkeä yhteen energian kokonaismäärän lisäämiseksi, jolloin päästään energian osalta kWh luokkaan. Tällöin superkondensaattoria voidaan purkaa minuutteja teholla, joka riittää useisiin sovelluskohteisiin. Parhaiten superkondensaattorit soveltuvat kuitenkin työkonesykleihin, joissa lataus ja purku toistuvat muutamien sekuntien tai enintään kymmenen sekunnin välein. Purkuaika riippuu halutusta tehosta. Akkuja voidaan käyttää pidempiaikaisen energiatarpeen kattamiseen.

Akkujen tapauksessa, kuten myös superkondensaattoreiden tapauksessa on huolehdittava jännitteen tasauksesta, kun kytketään useita superkondensaattoreita sarjaan suuremman lähtöjännitteen aikaan saamiseksi. Ohjauspiirin on kyettävä huolehtimaan jokaisen superkondensaattorin jännitteestä ja tasoittamaan erot. /24/

Superkondensaattoreita pyritään parantamaan ja kehittämään koko ajan. Yksi tärkeä asia on saada kondensaattorin elektrodien pinta-ala mahdollisimman suureksi energiatiheuden lisäämiseksi. Tähän on kehitetty tai kehitteillä erilaisia menetelmiä. Yksi mielenkiintoinen menetelmä on nanotekniikka, jolla voi olla tulevaisuudessa suuri merkitys superkondensaattorien kehitykseen. Nanotekniikan kautta on mahdollista saada energiatiheys jopa akun tasolle. Tällöin superkondensaattorit voivat syrjäyttää nykyiset akut kokonaan, elleivät akut kehity. /24/

Suomalaiset tutkivat selluloosan vaikutusta nanoputkikondensaattoriin. Hiilinanoputket tarttuvat helposti toisiinsa ja selluloosalla ne voidaan saada pysymään erillään, jolloin saadaan elektrodin pinta-alaa lisää. Seuraavaksi on esitelty muutamia eri kondensaattorityyppejä, jotka sopivat suuriin sovelluskohteisiin. Käsitellään tarkemmin Jianghain valmistamaa litium-ionikondensaattoria. /3/, /25/

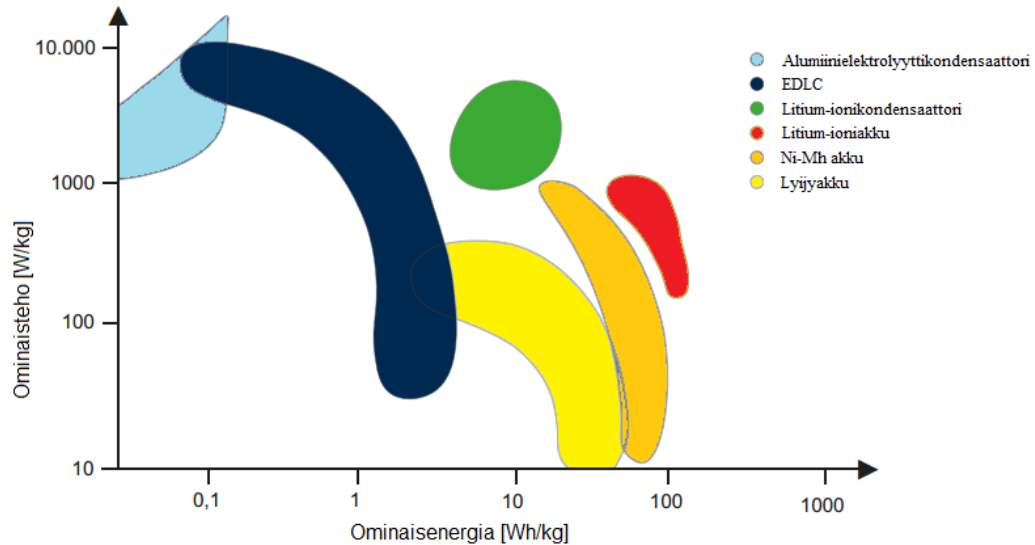
NESS -yhtiö valmistaa ultra- ja pseudokondensaattoreita. Ultrakondensaattorin kennojännite on 2,3 – 3,0 V ja niillä on suuri energiatiheys. Esimerkiksi eräällä mallilla energiatiheys on 7,1 Wh/dm³, (5,8 Wh/kg) 2,7 V kennojännitteellä kapasitanssin ollessa 5000 F. Materiaalina on edullinen aktiivihiilipulveri. Tällä superkondensaattorilla on matala ekvivalenttinen sarjaresistanssi. Pseudokondensaattorilla on myös suuri energiatiheys. Tämä tekniikka on varsin uutta ja sovelluskohteita löytynee paljon kehityksen myötä. /3/, /25/

Maxwellin ultrakondensaattorien eräs malli (PC2500) on kennojännitteeltään 2,5 V, ominaisenergialtaan 3,2 Wh/kg, energialtaan 2,3 Wh ja nimellisvirraltaan 400 A. Datalehden mukaan kapasitanssi on 2500 F. /3/, /25/

3.2.1 Litium-ionikondensaattori

Uuden tekniikan superkondensaattoreihin kuuluva litium-ionikondensaattori (Li-C) on varsin mielenkiintoinen. Käytetään tässä Jianghain valmistaman mallin tietoja. Li-C on saata-

villa kapasitanssiväliltä 1000 – 16 000 F (vaikuttaa ominaisenergiaan ja ominaistehoon) versioina käyttöjännitteen ollessa 2,5 – 4,0 V. Kennolla on matala sisäresistanssi. Vertaillaan kolmea erityyppistä kondensaattoria ja akkuja seuraavassa kuvassa. /46/



Kuva 10. Kondensaattorien ja akkujen vertailu ominaistehon ja ominaisenergian näkökulmasta. /46/

EDLC (Electric Double-Layer Capacitor) on niin sanottu sähköinen kaksikerroskondensaattori. Niistä löytyy sekä korkean ominaisenergian omaavia malleja että erittäin korkean ominaistehon malleja. Yhtäaikaisesti kompromissina saadaan kumpaakin ominaisuutta suhteellisen hyväksi. Kuva 10 selventää EDLC:n laajoja vaihtoehtoja. Kuvasta 10 huomataan kuinka litium-ionikondensaattorit ovat pienehköllä alueella, mutta omaavat erittäin korkean ominaistehon ja superkondensaattoriksi varsin korkean ominaisenergian. Näiden ominaisuuksien valossa litium-ionikondensaattorit ovat hyvä energiaravasto moneen sovellukseen, missä tarvitaan hetkellistä kovaa tehoa ja pitkää sykli-ikää. Esimerkiksi bussin liikkeellelähtö ja jarrutus, trukkien kuorman nosto ja lasku ja muut vastaavat tilanteet. Litium-ionikondensaattori pystyy ottamaan hyvin vastaan tehoa ja luovuttamaan sitä kohtalaisen pitkän ajan (kondensaattorille tyypillisesti poiketen), koska ne omaavat riittävän ominaisenergian. /46/

Litium-ionikondensaattoreille (niin kuin litium-ioniakuillakin) itsepurkautuminen on varsin hidasta. Li-C menettää korkeintaan vain 2 %:a kuukaudessa, kun EDLC taas menettää jo noin 11 %:a kuukaudessa. Korkeimmissa lämpötiloissa EDLC (60 °C) purkautumisaste kasvaa merkittävästi, mikä on normaalikondensaattoreille tyypillistä. Li-C kestää paremmin korkeimpia lämpötiloja. Turvallisuudeltaan nämä ovat yhtä hyviä. Mitään erityisiä suojaus-

menetelmiä käytössä ei tarvita toisin kuin litium-ioniakuilla. Haastavaa raaka-ainetta litiumia tarvitaan korkeintaan vain 3 % siitä määrästä mitä vastaavan teho/kapasiteetti luokan litium pohjaiseen akkuun menisi. Tämä aiheuttaa samalla hyvänä puolena korkean ominais-
tehon. Kuten kuvasta 10 havaittiin, litium-ionikondensaattori sijaitsee muiden sähköisten energiavarastojen ulottumattomissa ja antaa uudenlaisen mahdollisuuden liikkuviin käyttö-
kohteisiin. Jianghai valmistaa jo massatuotantona näitä kondensaattoreita, ja ne ovat käytössä osoittautuneet ominaisuuksiltaan ylivoimaisiksi. /46/. Tämän Jianghain valmistamaa litium-ionikondensaattorista löytyy lisätietoja lähteestä /46/.

Seuraavassa taulukossa 3 on vertailtu oleellisia parametreja kondensaattorin, superkondensaattorin, litium-ionikondensaattorin ja tässä työssä käsiteltävien akkujen välillä. Taulukko on vain suuntaa antava, mutta se havainnollistaa selvät parametrierot. Kuten taulukosta 3 selviää, superkondensaattori ja litium-ionikondensaattori sijoittuvat ominaisuuksiltaan akun ja kondensaattorin väliin.

Taulukko 3. Superkondensaattorin, kondensaattorin, litium-ionikondensaattori ja akun keskeisiä parametreja. /3/, /40/, /45/, /46/

Parametri	Kondensaattori (sähköstaattinen)	Superkondensaattori (sähkökemiallinen)	Li-C	Akku
Purkuaika	10^{-6} - 10^{-3} s	1-30 s	sekunteja-minuutteja	minuutteja-tunteja
Latausaika	10^{-6} - 10^{-3} s	1-30 s	sekunteja-minuutteja	minuutteja-tunteja
Ominaisenergia [Wh/kg]	<0,1	1-11	50-56	70-260
Ominaisteho [W/kg]	>10 000	1000-10 000	7400-8890	50-8000
Lataus/purkuhyötysuhde [%]	~100	90-95		70-95
Käyttölämpötila [°C]	-40 - +70	-40 - +70	-25 - +55	-20-60
Sykli-ikä	Rajaton	>500 000	>100 000	500-7000 (-25000)

3.3 Tulevaisuuden energiavarastot

Nanotekniikan kehityksen myötä on mahdollista saada energiavarastointi uudelle aikakaudelle. Tekniikkaa voidaan hyödyntää niin akuissa ja kondensaattoreissa kuin polttokennoissa, aurinkokennoissa ja vedyn varastoinnissakin. Nanotekniikassa materiaalipartikkelit esiintyvät nanomittakaavassa, mikä mahdollistaa suuret reagoitipinta-alat. Menetelmällä voidaan varastoida yhä suurempia määriä energiaa vastaavaan tilavuuteen nähden. Nanotekniikan avulla energiavarastoja on mahdollista parantaa oleellisesti. /3/

Tutkimuksen alla ovat esimerkiksi hiiliaerogeeli, hiilinanoputket ja -kuidut. Hiiliaerogeeli sopii hyvin elektrodimateriaaliksi, koska sillä on suuri pinta-ala ($400 - 1000 \text{ m}^2/\text{g}$), säädettävä huokoskoko ($<50 \text{ nm}$) ja tärkeänä ominaisuutena on pieni sähköinen vastus. Esimerkiksi kondensaattoriin saadaan tällä materiaalilla sekä suuri tehotiheys että kapasitanssi. /3/

Akkujen elektrodeissa on käytetty perinteisesti hiiltä, mutta sen laajasta pinta-alasta voidaan hyödyntää vain noin 10 % kemiallisessa reaktiossa. Näihinkin hiilinanoputkilla voidaan saavuttaa aktiivisen pinta-alan moninkertaistamista, jolla saavutetaan muun muassa parempi ominaisenergia ja pienempi itsepurkautuminen. /3/

Yksi kehityksen alla olevista nanotekniikkaa hyödyntävistä elektrodien valmistusmenetelmistä on upottaa kopiopaperiarkki hiilinanoputkia sisältävään nesteeseen, eräänlaiseen musteeseen. Menetelmällä on saatu elektrodimateriaali, jonka avulla energiaa saadaan säilöttyä aiempaa enemmän. Uusi elektrodityyppi mahdollistaa myös aiempaa korkeamman jännitteen. Paperi mahdollistaa huokoisen rakenteen, johon hiilinanoputket imeytyvät tiukasti kiinni. Etuna tällä menetelmällä on edullisuus ja keveys sekä mahdollisuus hyödyntää pape-riteollisuuden kehittynyttä valmistusmenetelmää. Tekniikka on tosin vasta kehitysasteella, mutta se sopii ainakin superkondensaattoreille ja sitä on kokeiltu myös litium-ioniakkujen elektrodina. /26/

Uusinta tutkimussuunnissa edustavat suola-akut, jotka ovat huomattavasti ekologisempia vaihtoehtoja perinteisiin akkuihin verrattuna. Suola-akku valmistetaan suolasta, hiilestä, riksistä ja hiekasta. Kuoreen tarvitaan jotain edullista metallia. Kaikki materiaalit ovat siis hyvin yleisiä ja niitä riittää maailmassa, eivätkä ne vaadi samanlaista raskasta louhintaa ja prosessointia kuin litium-pohjaisten akkujen raaka-aineisiin tarvitaan. Kaikki materiaalit pystytään kierrättämään ja ne ovat halpoja. Elektrolyytinä toimii suolasula, esimerkiksi natrium-

kloridiyhdiste. Tavoitehintana on reilut 60 €/kWh, joka on selkeästi halvempi kuin litium-ioniakuissa. Suola-akut ovat kohtalaisen kevyitä, mutta ne vaativat paljon tilaa (energiatiheys huono). Ominaisenergia on kuitenkin kohtalaisen hyvä tällä hetkellä, n. 90 Wh/kg. Ne toimivat 300 – 400 °C lämpötilassa, eikä lämmön ylläpito vaadi paljoa energiaa, kun kennostot on eristetty hyvin. Tällä hetkellä kehitys on kesken ja esimerkiksi sykli-ikä on vain 250, joka ei riitä vielä. Turvallisuuden kannalta suola-akku on hyvä vaihtoehto. Sen raaka-aineiden kuljetus on turvallista. Lisäksi etuina on yhtä hyvä toimintajännite kuin litium-ioniakuilla, joten ne sopisivat latausinfraan. Tämän hetken ominaisuuksien pohjalta suola-akut voisivat toimia ainakin stationäärisissä kohteissa ja mahdollisesti isommissa liikkuvissa käyttökohdeissa, mutta ei esimerkiksi älypuhelimissa. /51/, /53/

4 RAAKA-AINEET JA YMPÄRISTÖ

Sähköautoilun hiilijalanjälki moottorikäytön osalta on täysin riippuvainen siitä, kuinka vähäpäästöisessä prosessissa akustot on tehty ja kuinka vähäpäästöisellä sähköllä autot ladataan. Mikäli akustojen valmistusprosessissa käytetään uusiutuvaa tai ydinenergiaa ja sähköautot ladataan vastaavasti, on se huomattavasti ympäristöystävällisempää kuin vastaavalla polttomoottorikäyttöisellä autolla ajettaessa. Riippuen akun koosta arvioiden mukaan 20 – 60 tuhannen kilometrin jälkeen sähköauto muuttuisi fossiilisin polttoainein kulkevaa autoa vähäpäästöisemmäksi ja tämän jälkeen on käytännössä lähes päästötön, kun latauksessa käytetään uusiutuvaa tai ydinenergiaa. Suomessa tämä tilanne on täysin mahdollinen, mutta monissa maissa ei. Täysin päästöttömäksi ei päästä koko sähköauton elinkaarta ajateltaessa. Varsinkin akkujen raaka-aineiden louhinnasta syntyy ainakin toistaiseksi jopa erittäin merkittäviä päästöjä. Akkujen valmistuksen arvioidaan nykyisin tuottavan noin 150 kg hiilidioksidipäästöt kapasiteetin kilowattituntia kohden. Sähköautoissa on tyypillisesti 30 – 100 kWh akut. Arvioiden mukaan näistä päästöistä puolet syntyy raaka-aineiden tuotannossa ja toinen puoli akun valmistuksessa akkutehtaalla. Suomen Malmijalostus Oy:n mukaan yhteensä sähköautoon menisi esimerkiksi raaka-aineiden yhdistelmänä nikkeliä 50 kg, litiumia 8 kg ja kobolttia 7 kg. Tähän tietenkin vaikuttaa paljon se, minkä kokoisesta ja tyyppisestä akusta on kyse. Esimerkiksi Chilen kaivoksessa yhden litiumtonnin saaminen vaatisi arvioiden mukaan 1250 tonnia maamassaa nostettavaksi ja prosessoitavaksi. On helppo ymmärtää, että tässä toimessa tarvitaan paljon energiaa, ja siitä aiheutuu helposti päästöjä. /43/, /50/

Tutkimukset osoittavat, että jos akustot valmistetaan ja autojen akut ladataan hiilivoimaloissa tuotetulla energialla, ovat sähköauton päästöt koko elinkaaren aikana merkittävästi suuremmat kuin vastaavalla polttomoottorikäyttöisellä autolla. Otetaan esimerkki: Saksassa ruskohiilellä tuotetun sähkön CO₂-päästöt ovat noin 1000 g/kWh. Jos auto kuluttaa tyypilliset 20 kWh/100 km, ovat CO₂-päästöt 200 g/km. EU tavoittelee vuoden 2020 keskipäästökseen alle 95 g CO₂/km. Sähköauto ei siis yllä läheskään tähän tasoon, jos se ladataan ruskohiililauhdevoimalla. /43/

Tällä hetkellä akkukennojen valmistus tapahtuu pääasiassa Aasiassa, missä sähköä tuotetaan pääosin fossiilisella energialla. Esimerkiksi raaka-ainetta louhitaan tai jalostetaan Suomessa ja kuljetetaan vaikkapa Kiinaan hiilisähköllä käyväälle akkukennotehtaalle, josta ne päätyvät mahdollisesti takaisin Suomeen koottavaksi. Koko tuotantoketju olisi hyvä saada lähelle samaa paikkaa, jotta kuljettamisesta aiheutuvat päästöt voitaisiin minimoida. /43/

Varteenotettavissa akuissa käytettävä koboltti (ja litiumin) niukkuus on myös ongelma. Esimerkiksi Terrafamen vuonna 2021 valmistuvan jalostamon Sotkamossa arvioidaan tuottavan noin 300 000 auton tarpeisiin kobolttia vuosittain (7 400 tonnia kobolttisulfaattia, josta on 2 800 tonnia kobolttia). Laskuissa on käytetty keskimääräistä kobolttiin menekkiä (vajaa 10 kg) yhtä akkua kohden. Akkutyypin vaikutus on paljon kobolttiin menekkiin. Esimerkiksi nykyisen Nissan Leafin 50 kWh akkuun tarvitaan 19 kg nikkeliä, 19 kg kobolttia ja 7 kg litiumia. Kun taas Teslan uusimpien mallien vastaavan tehoiseen akkuun tarvitaan 35 kg nikkeliä, vain 4,5 kg kobolttia ja 5 kg litiumia. Sotkamon Terrafamen tehdas arvioidaan tuottavan myös nikkelisulfaattia noin miljoonan sähköauton akkuun vuosittain (170 000 tonnia). Vaikka luvut kuulostavat suurilta, ovat ne maailman mittakaavassa varsin pieniä, kun muistetaan, että henkilöautoja valmistetaan vuosittain lähes 100 miljoonaa ja kuorma-autoja noin 20 miljoonaa. /43/, /59/

Raaka-aineiden hinta on yksi vaikuttava tekijä koko prosessissa. Akustot on tulevaisuudessa kierrätettävä mahdollisimman tehokkaasti niukkuuden, hiilijalanjäljen ja myrkyllisten aineiden takia. Kierrätyksestä tulee tulevaisuudessa kova bisnes. /43/

4.1 Kierrätys

Litiumioni-akkujen kierrätyksestä tulee huolehtia hyvin. Ne sisältävät monia arvokkaita ja toisaalta vaarallisia materiaaleja (mm. nikkeli). Raaka-aineiden niukkuuden (mm. koboltti ja litium) takia kaikki mahdollinen on hyvä saada talteen ja uusiokäyttöön. Kierrätys lisää kokonaiskuluja, tällä hetkellä akkujen kierrättämisestä laskutetaan n. 4 €/kg, eivätkä tämän hetken prosessit pysty hyödyntämään akkujen kaikkia metalleja. Tämäkin tekniikka on kehittymässä ja on ajankohtainen akkujen lisääntyessä. Käytettyjä kierrätysmenetelmiä ovat ainakin pyrolyysi, hydrotermien kierrättäminen ja suora fyysinen kierrättäminen. /44/

5 AKUN MALLI JA SIMULOINTI

Tässä kappaleessa tutustutaan Matlabin Simulinkissä olevaan valmiiseen akkumalliin. Tutkitaan mallin tärkeimmät lohkot ja yhtälöt. Testataan mallia teoreettisesti askelvasteen avulla sekä analysoidaan tuloksia.

5.1 Dynaamisen mallin selvitys

Akun mallintaminen on hyvin haastavaa. Sähkökäyttöjärjestelmiin riittää kuitenkin sähköinen malli akusta. On oleellista saada jännitteen käyttäytyminen mallinnettua hyvin. Jännite mallinnetaan varaustilan ja virran funktiona. /30/

Tarkasteltava ja simuloinneissa käytettävä Matlabin Simulink akkumalli on suunniteltu vastaamaan neljää eri akkutyyppeä. Kyseisen akkutyypin pystyy vaihtamaan mallin päävalikosta. Nämä neljä akkua ovat lyijyakku, litium-ioniakku, nikkeli-kadmiumakku ja nikkeli-metallihydridiakku. Malli ottaa huomioon kennojännitteen, avoimen piirin jännitteen, sisäresistanssin, latausvirran sekä varaustilan. Malli on suunniteltu niin lataus- kuin purkutilanteisiin. Pääasiassa malli kuvaa jännitteen käyttäytymistä. Mallin oleelliset parametrit saadaan datalehden purkukäyrästä. /30/

Oletuksia ovat:

- Sisäresistanssi pysyy vakiona latauksen ja purun aikana, eikä muutu virran funktiona.
- Mallin parametrit on johdettu purkukäyrästä.
- Kapasiteetti ei muutu virran funktiona. Peukert-efektiä ei ole otettu mukaan.
- Lämpötilan vaikutusta ei ole otettu huomioon.
- Itsepurkautumista ei ole otettu huomioon.
- Muisti-ilmiötä ei ole otettu huomioon. Tällä tosin on vaikutusta vain nikkeli-kadmiumakun tapauksessa, jossa on muisti-ilmiö.

Rajoituksia ovat:

- Mallin minimijännite on nolla volttia, suurinta jännitettä ei ole rajoitettu.

Malli pystyy kuvaamaan usean akkutyypin käyttäytymistä kohtalaisen tarkasti, mikäli parametrit ovat hyvin valittuja. Mallin ominaisuutena on sen parametrien helppo määrittettävyys purkukäyrästä. /28/, /29/

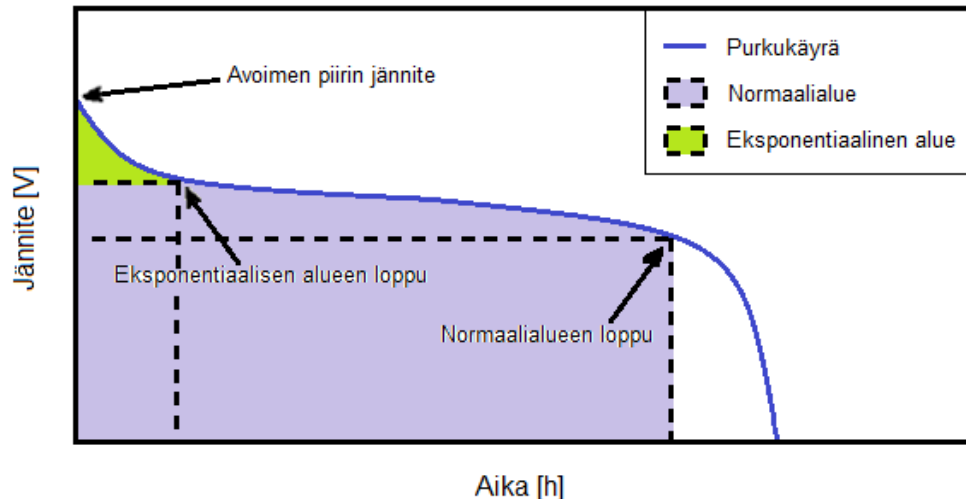
5.2 Akun sisäresistanssi

Akun sisäresistanssi R on yksi tärkeimmistä parametreista. Resistanssi vaikuttaa akun käyttäytymiseen oleellisesti, esimerkiksi akun virran syöttökykyyn ja sen seurauksena lämpenemiseen. Sisäresistanssin määrittäminen on tärkeää, jotta malli kuvaa riittäväällä tarkkuudella jännitteen putoamisen virran muutoksen takia. Mallissa sisäresistanssi on sarjassa ohjatun jännitelähteen kanssa. Akun valmistajan datalehdessä saadaan valmistajan ilmoittama sisäresistanssi tietyissä olosuhteissa. Sisäresistanssi on monen tekijän funktio. /28/

Tässä mallissa sisäresistanssi oletetaan vakioksi. Lähteen /28/ mukaan valmistajan ilmoittamalla sisäresistanssilla malli ei usein kuvaa kovin hyvin todellista akkua. Lähteessä ehdotetaan, että mallin sisäresistanssille haetaan sopiva arvo vertaamalla mallin tuottamaa purkukäyrää mallin parametrien määrittämisessä käytettyyn purkukäyrään. Lähteessä esitetään myös yksinkertainen analyyttinen yhtälö, jota voidaan käyttää sisäresistanssin määrittämiseen. Sisäresistanssi määrää osittain sekä lataus- että purkukäyrän. /28/

5.3 Purkukäyrä

Tyypillinen akun purkukäyrä on esitetty kuvassa 11, jossa on kuvattu akun yhden kennon jännite. Akun mallin purku- ja latausyhtälöt kuvaavat akun sähköistä käyttäytymistä. /28/



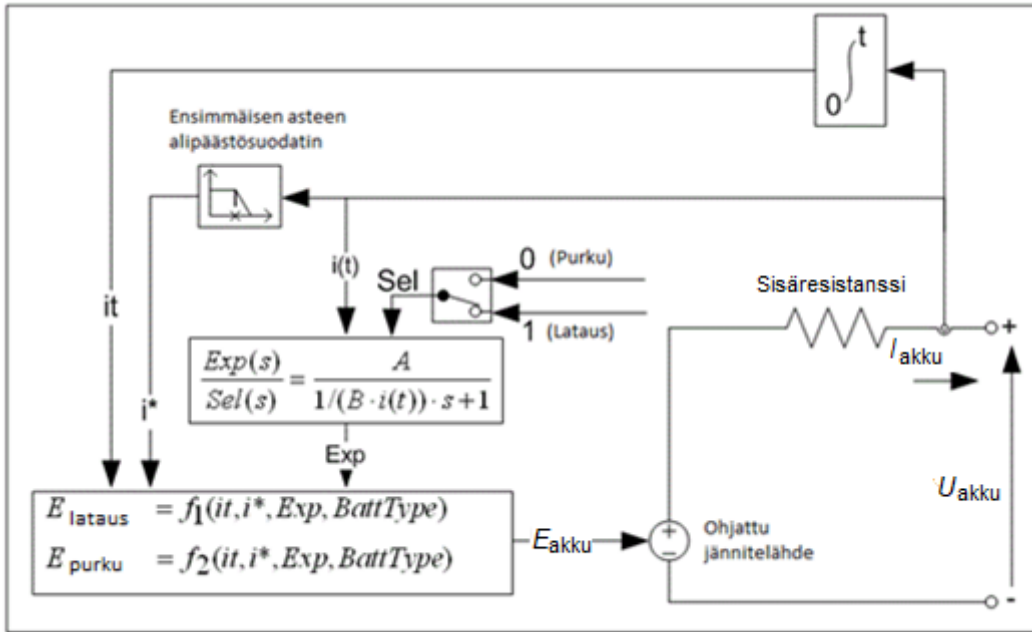
Kuva 11. Akun kennon yleinen purkujännitteen käyrä ajan funktiona. Käyrästä erotetaan kolme pistettä. Käyrä voidaan ilmaista myös varauksen funktiona. /28/

Mallin parametroidin lähtötietoina käytetyt purkukäyrän pisteet on merkitty kuvaan 11 nuolilla. Ensimmäistä aluetta nimitetään eksponentiaaliseksi alueeksi, koska tällä välillä jännite käyttäytyy eksponentiaalisesti laskevana. Jännite on korkeimmillaan, kun akku on täyteen ladattu ja kuormittamaton. Kuorman kytkeminen saa jännitteen putoamaan eksponentiaalisesti kohti normaalialueen jännitettä. /28/

Normaalialueella akun jännite on lähes vakio. Normaalialueen jännitteen alenema vaihtelee akkutyypin mukaan. Litium-ioniakuilla normaalialueen jännitteen alenema on varsin vähäistä, joka on hyvä asia useimpien sovelluskohteiden kannalta. Tällöin akun varaustilan seuranta muuttuu kuitenkin hankalaksi, koska jännitteen suuruudesta ei voida päätellä akun varaustilaa. Normaalialueen jälkeen akun kapasiteetti alkaa loppua ja jännite romahtaa dramaattisesti. Tälle alueelle akkua ei pitäisi käytössä päästää syväpurkautumisen takia, mikä lyhentää akun käyttöikä. /28/

5.4 Akun mallin periaatteellinen lohkokaavio

Tässä työssä keskitytään vain Matlabin Simulinkin litium-ioniakun malliin, vaikka käytetty akkumalli soveltuu myös muiden akkutyypin mallintamiseen. Yhtälöt (6) ja (7) ovat akun purku- ja latausyhtälöt kolmen muuttujan funktiona. Seuraavassa kuvassa 12 on esitettyä akun mallin lohkokaavio, jossa purku- ja latausjännitettä kuvaavaan lohkoon tulevia signaaleja operoidaan lataus- ja purkuyhtälöillä. Lohkon tuottama akun jännite on E_{akku} . Signaali E_{akku} ohjaa mallin ohjattua jännitelähdettä. /30/



Kuva 12. Akun mallin periaatteellinen lohkokkaavio. Syötteillä 0 ja 1 valitaan käyttötila. Laplace -tassossa oleva siirtofunktio ei koske litium-ioniakun mallia. /30/

Kuvan 12 mukaisesti jänniteyhtälöiden tuloina ovat $\int idt$, i^* ja i . Integraali $\int idt$ on akun purettu kapasiteetti. Toinen tulo i^* on matalataajuinen dynaaminen virta. Tämä virta on suodatettu ensimmäisen asteen alipäästösuodattimella. Alipäästösuodatettu virta kuvaa akun jännitteen alenemista kuormitusvirran funktiona. Lähteessä /29/ on annettu kokemukseen perustuva tulos, jonka mukaan alipäästösuodattimen aikavakiolle sopiva arvo olisi 30 sekuntia. Kyseistä aikavakiota ei anneta akun datalehdissä. Ilman alipäästösuodatusta malliin syntyisi lisäksi algebrallinen silmukka, jonka ratkaiseminen vaatisi iterointia jokaisella simulointimallin aika-askeleella. /30/

Kolmas tulo i on akun lähtövirta. Vakioita ovat K (polarisaatiovakio), A (eksponentiaalinen jännite) ja B (eksponentiaalinen kapasitanssi). E_0 kuvaa akun vakiojännitettä ja Q_n täyden akun nimellisvarausta. Nimellisvaraus Q_n on mallin parametri, muut vakiot määritetään. Akun purkujännite esitetään yhtälöllä

$$E_{\text{purku}}(\int idt, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q_n}{Q_n - \int idt} i^* - K \frac{Q_n}{Q_n - \int idt} \int idt + A e^{-B \int idt} \quad (i^* > 0), \quad (6)$$

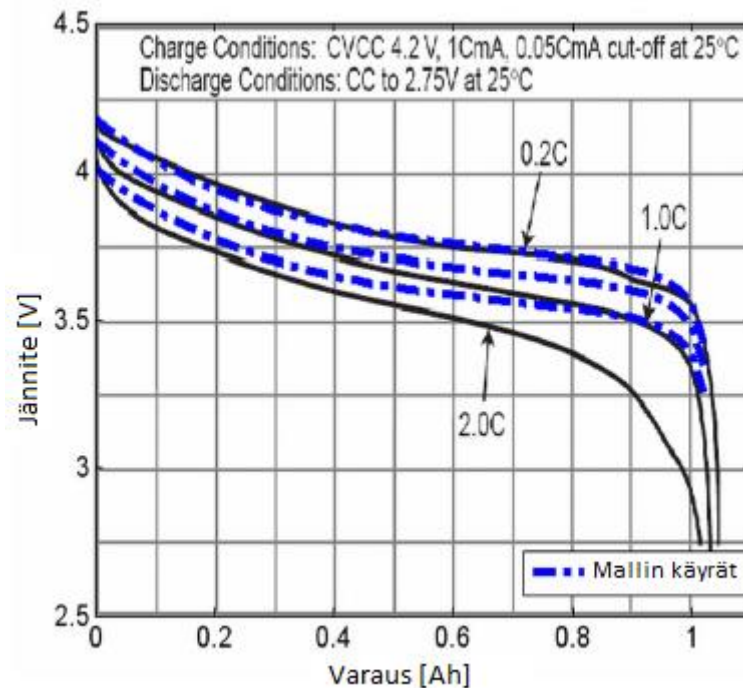
jossa i^* on positiivinen. Seuraavassa yhtälössä on esitetty akun latausjännite, jossa i^* on negatiivinen. /30/

$$E_{\text{lataus}}(\int idt, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q_n}{\int idt + \frac{Q_n}{10}} i^* - K \frac{Q_n}{Q_n - \int idt} \int idt + A e^{-B \int idt} \quad (i^* < 0) \quad (7)$$

Alipäästösuodatetun virran perusteella valitaan, käytetäänkö mallissa lataus- vai purkuyhtälöä. Yhtälöiden toinen termi kuvaa polarisaatioresistanssia, joka kerrotaan suodatetulla virralla i^* . Purkauksen yhteydessä tämä termi alentaa akun jännitettä. Vastaava termi latauksen yhteydessä kasvattaa jännitettä, koska i^* on tällöin negatiivinen. Kolmas termi kuvaa polarisaatiojännitettä ja neljäs eli viimeinen termi kuvaa akun jännitteen käyttäytymisen eksponentiaalista aluetta (kuva 11). /30/

5.4.1 Purkuyhtälö

Purkuyhtälön (6) toinen termi määrää purkukäyrän oleellisen muodon. Termin kerroin i^* laskee purkujännitteen tasoa alaspäin kuormitusvirran kasvaessa. Kuvassa 13 on litium-ioniakun purkujännite. Kennoa on kuormitettu kolmella eri virralla. /29/



Kuva 13. Litium-ioniakun kennon purkujännite varauksen funktiona. Katkoviiva on mallin simuloinnin tulos ja yhtenäinen viiva on vastaavalla kuormituksella oleva datalehden käyrä. Suuremmalla kuormalla tulee pientä eroa mitatun ja simuloidun käyrän välille. Jänniteyhtälöissä käytetyt parametrit ovat $E_0 = 3,7348 \text{ V}$, $R = 0,09 \text{ } \Omega$, $K = 0,0087662 \text{ V}$, $A = 0,468 \text{ V}$ ja $B = 3,5294 \text{ (Ah)}^{-1}$. /28/

Kun purettu varaus $Q(t) = \int idt$ lähestyy nimellisvarausta Q_n , yhtälön (6) toinen ja kolmas termi kasvavat hyvin suuriksi, koska termien jakajat lähestyvät nollaa. Tämä tapahtuu normaalialueen jälkeen, kun akun varaus alkaa lähestyä nollaa ($it \approx Q$). Kolmannen termin kerroin $\int idt$ kasvaa sitä enemmän mitä enemmän akkua on purettu, mutta tämä ei kuitenkaan vaikuta oleellisesti jännitteen laskuun. Näiden takia akun mallin jännite laskee dramaattisesti normaalialueen jälkeen. /29/

Eksponentiaalista aluetta kuvaava viimeinen termi vaikuttaa kuormituksen aiheuttamaan jännitteen alkuromahdukseen ja antaa eksponentiaalisen muodon, kun akku on täyteen varatussa tilassa (SOC 100 %). Tämä termi ei dominoi, jos akun varaustila ei ole lähes täysi, koska termin jakaja kasvaa eksponentiaalisesti puretun varauksen funktiona. /29/

5.4.2 Latausyhtälö

Yhtälön (7) toinen termi vaikuttaa lataustilanteessa nostavasti, sillä virran suunta vaihtuu ($i^* < 0$). Tämä polarisaatioresistanssitermi kuvaa latausjännitteen äkillistä nousua, kun akku alkaa olla täyteen varautunut. Lopun äkillinen nousu johtuu toisen termin jakajasta. Jakajassa on akun käytetty varaus $\int idt$, joka lähenee nollaa, kun akku alkaa olla täyteen ladattu. Jos oletetaan $\int idt$ nolllaksi, niin termi supistuu muotoon $10Ki^*$. Latausjännitteen nousuun vaikuttaa myös virran i^* suuruus. Kolmannessa negatiivisessa termissä kertoimena on $\int idt$. Tällöin latauksen loppuvaiheessa tämä termi lähenee nollaa, koska akun käytetty varaus $\int idt$ lähenee nollaa. Latauksen alkuvaiheessa tämä termi vaikuttaa kuitenkin laskevasti jännitteen muotoon. Viimeisen termin vaikutus latauksessa vaikuttaa latauksen loppuvaiheelle antaen eksponentiaalisen muodon latausjännitteeseen. /29/

Seuraava yhtälö on tehty edellisen purkuyhtälön (6) perusteella. Nyt E_{akku} jännitteeseen on lisätty sisäresistanssin aiheuttama jännitehäviö. Näin ollen yhtälö kuvaa akun napajännitettä, joka muodostuu ohjatun jännitelähteen ja sisäresistanssin R sarjankytkennästä. /29/

$$U_{\text{akku}}(\int idt, i^*, i) = E_{\text{akku}} - Ri \quad (8)$$

$$U_{\text{akku}}(\int idt, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int idt} i^* - K \frac{Q}{Q - \int idt} \int idt - Ri + Ae^{-B \int idt} \quad (9)$$

5.5 Parametrien määrittäminen

Matlabin tarkastellun akun mallin parametrien määrittämiseen riittää valmistajan datalehtien purkukäyrän kolme datapistettä. Tämä approksimaatio antaa riittävän hyvän kuvan jännitteen käyttäytymisestä. Näistä datapisteistä saadaan akun täyteen ladatun jännitteen arvo $E_{täysi}$. Eksponentiaalisen ja normaalialueen välissä olevasta pisteestä saadaan jännite E_{eks} ja varaus Q_{eks} . Normaalialueen jälkeisestä pisteestä saadaan E_{nor} ja Q_{nor} . Tämän pisteen jälkeen jännite romahtaa äkillisesti ja jännitteen ollessa nolla saadaan akun suurin varaus Q . Nämä kolme datapistettä näkyvät kuvassa 11. /28/

Jänniteyhtälöiden (6) ja (7) ratkaistavat parametrit ovat R , A , B , K ja E_0 . Eksponenttitermin kerroin A saadaan jännitteen $E_{täysi}$ ja eksponentiaalisen alueen loppuosan jännitteen E_{eks} erotuksesta seuraavasti

$$A = E_{täysi} - E_{eks}. \quad (10)$$

Saman termin eksponentiaalinen kapasitanssi B määritetään eksponentiaalisen alueen lopun kapasiteetista Q_{eks} seuraavasti

$$B = \frac{3}{Q_{eks}}. \quad (11)$$

Muut parametrit ovat laskettu käyttämällä purkuyhtälöä (6) hyväksi. Polarisaatiovakio K voidaan kirjoittaa muotoon

$$K = \frac{(E_{täysi} - E_{nor} + Ae^{-BQ_{nor}} - 1)(Q - Q_{nor})}{Q_{nor}}, \quad (12)$$

jossa on käytetty ensimmäistä pistettä ja normaalialueen jälkeistä pistettä hyväksi. Mallin vakiojännite E_0 saadaan täyteen ladatun akun jännitteen avulla. Alkutilanteen mukaan ajanhetkellä nolla purkuyhtälö supistuu muotoon

$$E_0 = E_{täysi} + K + Ri - A \quad (13)$$

Tämä approksimaatio soveltuu myös muille akkutyypeille kuin litium-ioniakuille. /28/

5.6 Mallin verifiointi

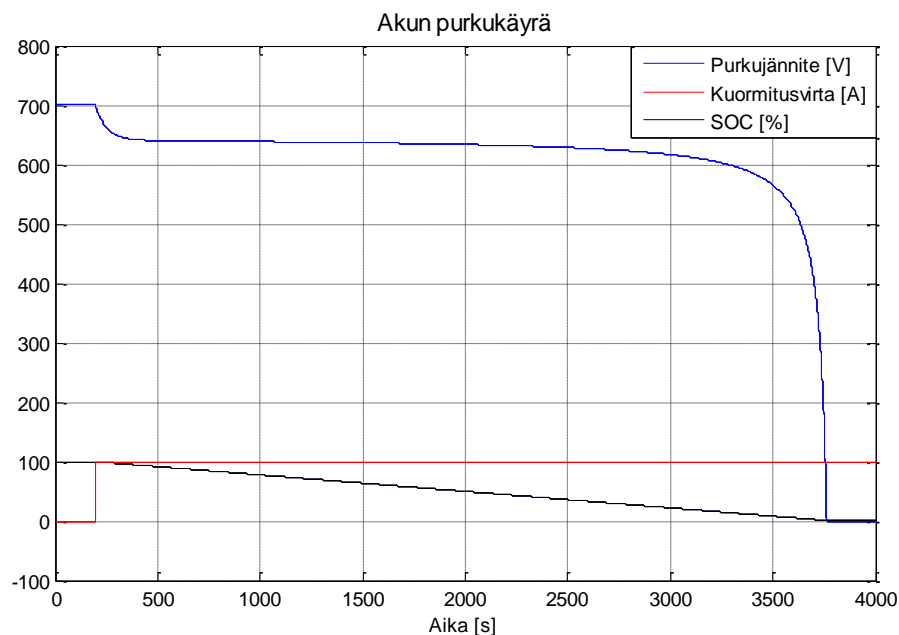
Lähteen [28] mukaan mallia on testattu neljällä eri akkutyypillä vastaaviin valmistajan datalehdien mukaisiin jänniteyhtälöihin. Akun mallia on kuormitettu vastaavilla virroilla kuin datalehdessä. [28]

Testin mukaan mallin jännitteen käyttäytyminen toimii hyvin. Ainoastaan litium-ioniakulla suurimman virran (2,0 C) arvolla oli pientä poikkeamaa. Mallin jännite on hieman mitattua jännitettä korkeampi. Tämä huomataan kuvasta 13. Testien tarkemmat vertailutulokset löytyvät liitteestä 1/lähteestä [28]. [28]

5.7 Akun simulaatio askelvasteella

Simuloidaan Matlabin Simulink -ohjelmistolla litium-ioniakkua. Tutkitaan muutamaa eri tilannetta ja verrataan mallin käyttäytymistä jänniteyhtälöihin. Ohjataan simulointimallia vakiovirtalähteellä, jonka tuloksi asetetaan askelvaste. Valitaan akun parametreiksi jännite $U = 600$ V ja akun kapasiteetti $C = 100$ Ah. Tämä jännite tarkoittaa akun normaalialueen jännitettä, joten tietyissä tilanteissa jännite on korkeampi kuin 600 V.

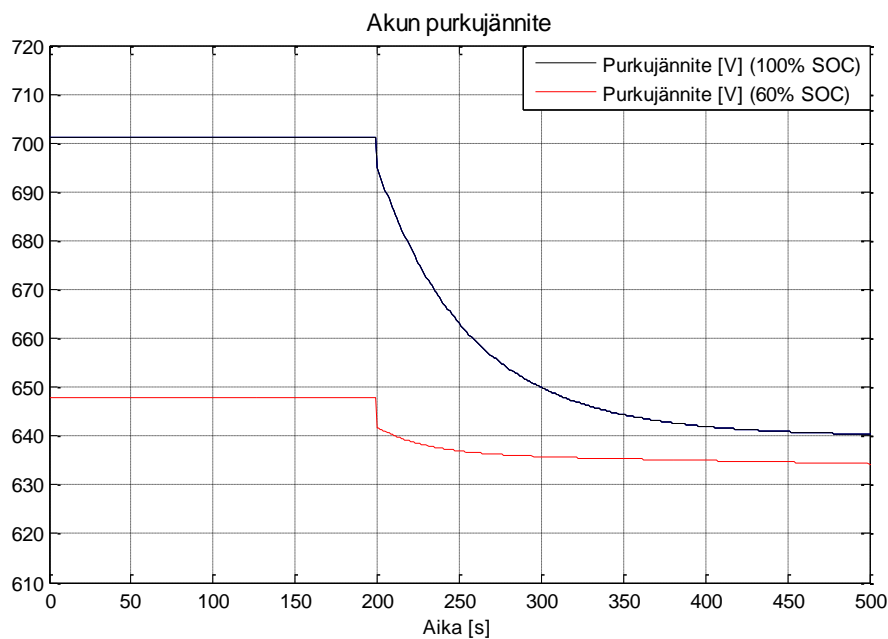
Tarkastellaan purkukäyrää, kun askelvasteen loppuarvoksi valitaan 100 A. Tällöin täysi akku (SOC 100 %) purkautuu tunnissa (3600 s). Askel saa loppuarvon kohdassa 200 sekuntia. Seuraavassa kuvassa 14 näkyy purkukäyrä vastaavilla arvoilla.



Kuva 14. Akun purkujännite, kuormitusvirta ja SOC ajan funktiona. Akku on täysi, kun siihen kytetään kuorma hetkellä 200 s.

Kuvassa 14 kuormitusvirran askelmuutos tapahtuu kohdassa 200 sekuntia ja akku on purkautunut kokonaan kohdassa 3800 sekuntia. Jännite lähtee noin 700 V kohdalta ja kuorman kytkentätilanteen jälkeen jännite laskee eksponentiaalisesti. Tämä vastaa mallin eksponentiaalista aluetta hyvin. Eksponentiaalisen termin vaikutus loppuu nopeasti, koska termin jakaja kasvaa eksponentiaalisesti akun purkautuessa. Noin 500 sekunnin jälkeen jännite saavuttaa normaalialueen ja pysyy tällä alueella lähes vakiona. Normaalialueen jälkeen jännite putoaa äkillisesti, kuten purkuyhtälön teoria osoittaa. Tällöin akun kapasiteetti lähenee nollaa.

Tutkitaan seuraavaksi 60 %:n (SOC) varaustilassa olevaa akkua, kun kuormitus kytkeytyy. Muuten tilanne on sama kuin edellisessä tapauksessa. Keskitytään akun kuormituksen kytkentään jännitekäyrän osalta. Seuraavassa kuvassa 15 on lähikuva tilanteesta, jossa on vertailun vuoksi myös 100 %:n varaustilassa oleva akku.



Kuva 15. 100 %:n ja 60 %:n varaustilassa olevat akut, kun kuormitus kytketään. Purkujännite ajan funktiona.

Kuvasta 15 havaitaan kummankin käyrän jännitteen laskevan heti noin 6 V kytkentätilanteessa. 100 %:n varaustilassa olevan akun jännitteen laskeminen kohti jatkuvuustilaa käytäytyy eksponentiaalisesti. 60 %:n varaustilassa olevan akun jännite laskee sen sijaan hyvin hitaasti jatkuvuustilaansa. Tämä hitaasti laskeva osuus on akun mallin polarisaatioresistans-

sitermin vaikutus. Termin kertoimena on suodatettu virta i^* . Alipäästösuodattimen aikavakio on 30 sekuntia. 60 %:n varaustilassa olevassa akussa ei ole eksponentiaalisen osuuden vaikutusta havaittavissa, kuten purkuyhtälöstä käy ilmi.

5.8 Akun koon mitoitus käyttökohteen mukaan

Hybridikäyttöisessä työkoneessa dieselmoottori mitoitetaan yleensä koneen tarvitseman keskitehon perusteella. Tässä työssä oletetaan dieselmoottorin tehon pysyvän vakiona ja työkoneen tarvitsema tehon vaihtelu katetaan sähkömoottorilla. Tämä ratkaisu ei kuitenkaan välttämättä ole optimaalisin, vaan dieselmoottorin tehon voisi antaa myös vaihdella hieman. Dieselmoottorin pyörimisnopeus on tarkoitus olla sen parhaalla hyötysuhdealueella. Sähkömoottorin tarvitsema energia syötetään energiavarastosta. Energiavaraston täytyy pystyä antamaan hetkellisesti tehokäyrän mukainen suurin huipputeho ja toisaalta kapasiteetin on riittävä suurimpaan jatkuvaan keskitehon ylittävään energian tarpeeseen. Tehokäyrän alittessa keskitehon energiavarastot puolestaan latautuvat dieselmoottorin avulla sekä talteen otetusta energiasta, kuten jarrutuksesta tai taakan laskemisesta.

Työsyklistä täytyy tunnistaa tehon tarpeet ja kuinka isoja energia määriä tarvitaan. Jos työsyklissä on vain nopeita suuria tehon vaihteluja, mitkä eivät sisällä energiaa paljon, pelkkä superkondensaattori voisi riittää energiavarastoksi. Kuitenkin, jos työsyklissä on pidempiaikaisia keskitehon ylityksiä, ei pelkkä superkondensaattori riitä kattamaan energiantarvetta. Tällöin on käytettävä akkuja tai akkujen ja superkondensaattorin yhdistelmää. Myös uudet litium-ionikondensaattorit voivat tuoda juuri oikean ratkaisun. Tässä työssä käytetään energiavarastona litium-ioniakkua.

5.9 Akun mitoitus

Seuraavassa esimerkkitapauksessa valitaan energiavarasto työsyklin perusteella. Liikkuvan työkoneen dieselmoottorin työsykli on valittu työkoneiden testisyklistä (Nonroad Transient Cycle /34/). Työsyklissä on lähtötietoina vääntömomentti T ja pyörimisnopeus n , jotka on ilmoitettu prosentteina. Nämä arvot muunnetaan valitun dieselmoottorin tehon mukaisesti. Valitaan dieselmoottorin nimelliseksi tehoksi $P = 200$ kW ja nimelliseksi pyörimisnopeudeksi $n = 2700$ rpm. Tämä pyörimisnopeus on muunnettava kulmanopeudeksi Ω seuraavasti

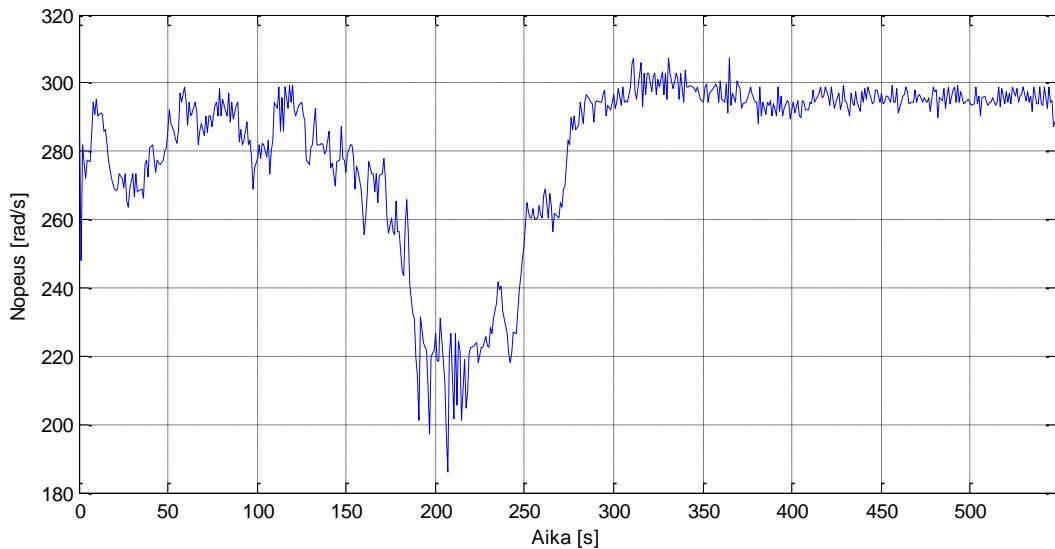
$$\Omega = 2\pi n = 2 \cdot \pi \cdot \frac{2700}{60} \approx 283 \text{ rad/s}$$

Moottorin nimellinen vääntömomentti

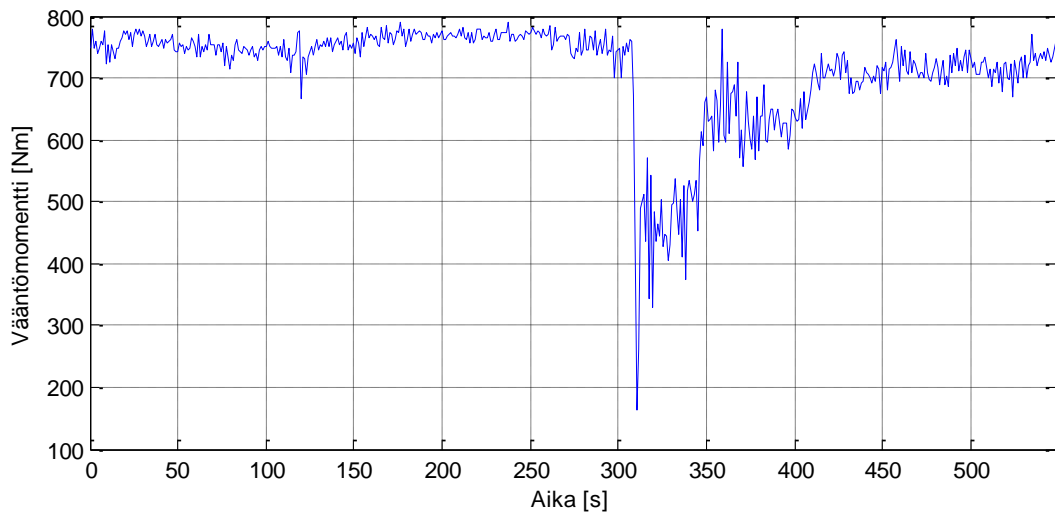
$$T = \frac{P}{\Omega} = \frac{200000}{283} \approx 707 \text{ Nm}$$

Kulmanopeuden ja vääntömomentin käyrät ovat esitettyinä seuraavissa kuvissa 16 ja 17.

Työsyklin kesto on noin 10 minuuttia.



Kuva 16. Työsyklin (Nonroad Transient Cycle) mukainen dieselmoottorin kulmanopeus ajan funktiona.

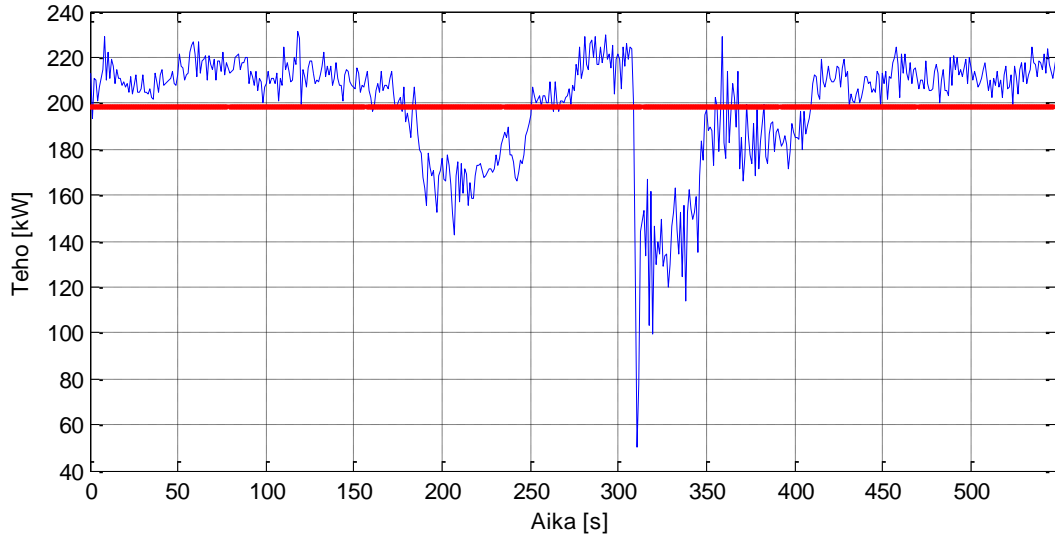


Kuva 17. Työsyklin (Nonroad Transient Cycle) mukainen dieselmoottorin vääntömomentti ajan funktiona.

Edellisten käyrien tulona saadaan työsyklin mukainen dieselmoottorin tehokäyrä, jossa on ilmoitettu myös keskiteho. Keskiteho voidaan laskea integraalista seuraavasti

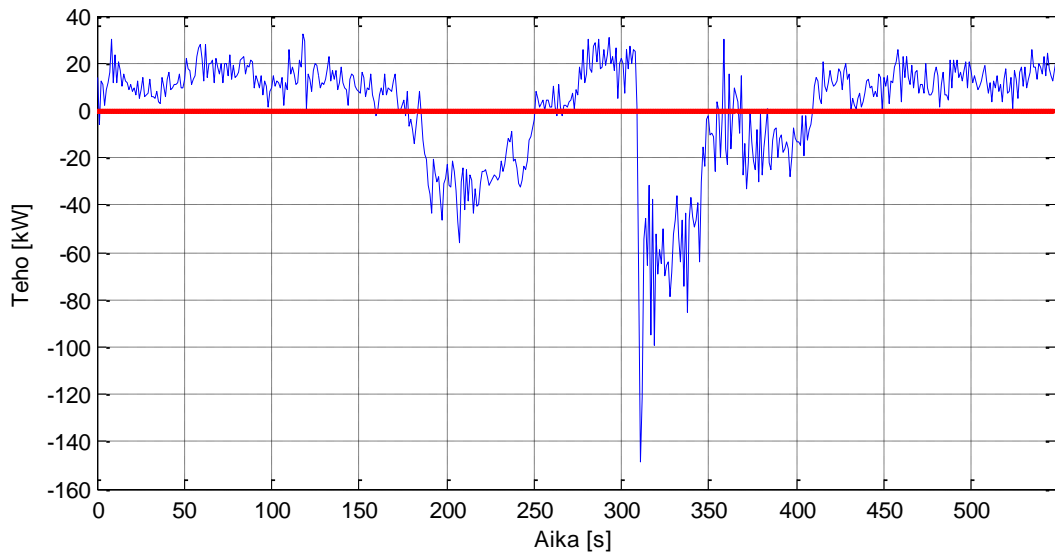
$$P_{\text{keski}} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt, \quad (14)$$

jossa T on jaksonaika. Seuraavassa kuvassa 18 on esitettyä tehokäyrä.



Kuva 18. Työsyklin (Nonroad Transient Cycle) mukainen dieselmoottorin teho ajan funktiona. Kuvassa suoralla punaisella viivalla on osoitettu keskiteho, joka on noin 200 kW.

Työsyklin keskitehon P_{keski} avulla saadaan laskettua uusi käyrä (kuva 19), jossa työsyklin tehosta on vähennetty keskiteho.



Kuva 19. Tehokäyrä vähennettynä keskiteholla. Punainen viiva havainnollistaa tehon nolla-arvon.

Kuvan 19 käyrä kuvaa tehon vaihtelua, mikä katetaan sähkömoottorilla. Käyrän perusteella mitoitetaan tarvittava energiavarasto. Kuvaajan perusteella etsitään ja lasketaan suurin dieselmoottorin keskitehon ylittävä energian tarve. Käyrästä etsitään myös suurin teho, joka akun on kyettävä antamaan. Energia E lasketaan tehon integraalista ajan suhteen seuraavasti

$$E = \int_0^T P(t)dt. \quad (15)$$

Kuvan 19 käyrän perusteella laskettu suurin energian tarve on noin 2,25 MJ aikavälillä 0 – 180 sekuntia. Tämä energia jaetaan käyttöjännitteellä, joka on valittu invertterin välipiirin jännitteen suuruusluokkaan $U = 600$ V. Lasketaan tämän aikavälin tarvitsema energiakapasiteetti seuraavasti, joka muunnetaan lopuksi ampeeritunneiksi.

$$\frac{2.25 \cdot 10^6 \text{ J}}{600 \text{ V}} \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \approx 1 \text{ Ah}$$

Akkujen käyttöikään vaikuttaa merkittävästi syklien määrä ja etenkin niiden purkusyvyys. Syväpurkauksessa akun kapasiteetistä käytetään noin 70 – 90 %, mutta jos akun kapasiteettia käytetään vain 10 %:n vaihtelulla, sen sykli-ikä on huomattavasti suurempi kuin suurilla purkusyvyyksillä. Akku voi kestää syväpurkauksia esimerkiksi 5 000 kertaa, kun taas 10 %:n SOC vaihtelulla 100 000 kertaa. Täytyy kuitenkin muistaa, että akun on oltava tällöin kapasiteetiltaan tarvittavaan kuormitukseen nähden huomattavasti suurempi. Mitoituksessa on otettava huomioon, kuinka paljon energiaa tarvitaan yhtäjaksoisesti akusta, ja kuinka usein tällainen tarve toistuu.

5.10 Simuloinnin tulokset

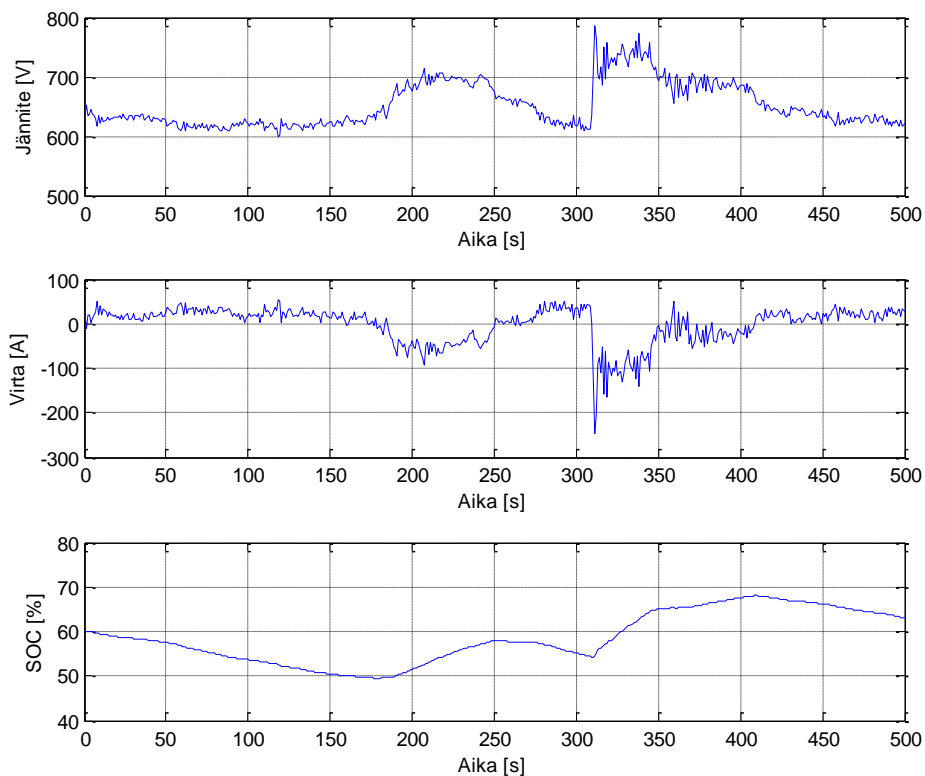
Valitaan akun kapasiteetiksi kymmenkertainen kuvan 19 käyrän suurimpaan energiantarpeeseen nähden. Kymmenkertaisen valinnan perustana on haluttu 10 % SOC vaihtelu akulle. Suurin yhtäjaksoinen energian tarve oli 1 Ah. Akun kapasiteetiksi valitaan 10 Ah, joten täyden akun energia on 6 kWh. Näin ollen akun suurin varaustilan vaihtelu olisi 10 %. Tällaisen akuston massa olisi alle 100 kg.

Arvioidaan kuinka pitkään akku kestäisi tällaista varaustilan vaihtelua. Työsyklin pituus on noin 10 minuuttia ja oletetaan työkoneen olevan käytössä 12 tuntia päivässä vuoden jokaisena päivänä. Kuvan 19 käyrän mukaan noin 10 %:n varaustilan vaihtelua tapahtuu kaksi kertaa kymmenen minuutin aikana. Lasketaan näillä oletuksilla syklien määrä vuoden ajalta

$$2 \cdot 6 \cdot 12 \cdot 365 \approx 52500 \text{ (10 \%:n sykliä vuodessa)}$$

Tällaisella käytöllä 10 % kapasiteetin vaihteluja kertyisi jo kahdessa vuodessa n. 100 000 kpl. Akun ikääntyminen olisi jo lähellä, joten rinnalle olisi hyvä saada esimerkiksi superkondensaattori. Tällöin SOC vaihtelu pienenesi 10 prosentista. Akun kapasiteetin lisäämisellä saataisiin SOC vaihtelu alle 10 %:n, mutta samalla lisääntyisi akun massa ja koko. Myös dieselin pyörimisnopeuden ei tarvitse olla täysin vakio, mikä auttaa tilannetta. Muutenkin tällainen tilanne voisi pelkästään toimia litium-ionikondensaattorille parhaiten.

Simuloidaan akun käyttäytymistä työsyklin mukaan. Simulointimallin tulona on tehokäyrä, josta on vähennettyä keskiteho. Akkua kuormitetaan virtalähteellä, jonka ohjauksena on tehokäyrän ja akun navoilta mitatun jännitteen jako. Akun alkutilanteen varaustilaksi on asetettu SOC-arvoksi 60 %. Akun mallin alipäästösuodattimen aikavakioksi on asetettu 30 sekuntia. Akun jännitteeksi on valittu 600 V, joka tarkoittaa nyt mallin normaalialueen jännitettä. Näin ollen suurin jännite on enemmän kuin 600 V. Seuraavassa kuvassa 20 on simuloinnin tulos.



Kuva 20. Akun mallin jännite, virta ja varaustila ajan funktiona.

Kuvasta 20 selviää akun jännitteen, virran ja varaustilan käyttäytyminen koko työsyklin aikavälillä. Akun jännite nousee aina, kun virran suunta vaihtuu laskevaksi. Negatiivinen virta tarkoittaa akun latautumista. Esimerkiksi ajan hetkellä 310 sekuntia virta laskee äkillisesti negatiiviseksi ja tällöin akku alkaa latautumaan. Tämä havaitaan jännitteen sekä varaustilan kasvuna.

Ajan hetkellä 0 – 180 sekuntia on suurin yhtäjaksoinen energian tarve akusta. Tällä aikavälillä virta pysyy koko ajan positiivisena ja purkaa akkua. Kuvan 20 SOC käyrästä selviää varaustilan väheneminen aikavälillä 0 – 180 sekuntia. Varaustila putoaa arvosta 60 % arvoon 50 %. Varaustilan 10 %:n putoaminen on sama mikä haluttiin akun varauksen vaihtuvuudeksi suurimman energian tarpeen alueelle.

Todellisuudessa akun mitoituksessa pitää ottaa monia asioita huomioon. Esimerkiksi kuinka suuria virtoja akku kestää. Kuvan 20 virtakäyrän mukaan hetkellisesti saavutetaan jopa -230 A virta, eli kyseisen akun pitäisi kestää 23 C:n virtaa muutaman sekunnin ajan. Lisäksi virtakäyrän mukaan akun pitäisi kestää 10 C:n virtaa noin 30 sekunnin ajan. Myös tehoelektronikan komponenttien kestoisuudet täytyy ottaa huomioon. Litium-ionikondensaattori selviäisi todennäköisesti näistä virta vaatimuksista paremmin kuin litium-ioniakku. Toisaalta litium-ionikondensaattorilla ei todennäköisesti riitä energia pisimmälle yhtäjaksoiselle energian tarpeelle.

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tarkastella liikkuvien työkoneiden kannalta varteenotettavia akkutekniikoita. Esiteltiin akkujen perusominaisuuksia, kuten ominaisenergia ja käyttöikä. Litiumioniakkutekniikka näyttäisi yleisesti ottaen olevan paras vaihtoehto työkoneisiin. Tällä hetkellä litium-titanaatti (LTO)-, litium-rautafosfaatti (LFP)-, litium-nikkeli-koboltti-manganioksidi (NMC)- tai litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiakku (NCA) voisi olla järkevin liikkuviin työkoneisiin. Jokaisella akulla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Akun valinta täytyykin tehdä tarkasti sovelluskohteen käyttötilanteiden perusteella.

Tasaisiin pitkäkestoisempiin sykleihin NCA-akku hyvän ominaisenergiansa ja kohtuullisen edullisen hinnan takia voisi olla hyvä vaihtoehto, kun taas jatkuviin tehon tarpeen muutoksiin voisi sopia pelkästään litium-ionikondensaattori (Li-C). Pitkäkestoisempaan ja hetkelistä tehoa vaativiin tilanteisiin voisi NCA-akun ja Li-C yhdistelmä olla hyvä, mutta monimutkainen vaihtoehto. LTO-akku sietää kovia lataus- tai purkuvirtoja (hyvä pikalataus), joten se on hyvä vaihtoehto liikkuviin työkoneisiin ja toisaalta linja-autoihin ja ehkä vähemmän henkilöautoihin. Tosin vielä tällä hetkellä LTO-akku on kalleimpia akkuja. LFP-akun tärinän kesto on hyvä, ja sitä voidaan käyttää eri asennoissa. Suorituskyvyltään LFP-akku on keskiverto, ja se on yksi ympäristöystävällisemmistä nykyiseltään käytetyistä akuista. LFP-akku voisi olla esimerkiksi hybridimetsäkoneen akkuna hyvä vaihtoehto.

Tulevaisuudessa nähtävästi on muitakin akkutekniikoita, jotka kilpailevat nykyisten akkutekniikoiden kanssa. Suola-akut vaikuttavat mielenkiintoisilta niiden ympäristöystävällisyyden takia.

Työssä tutkittiin Matlabin Simulinkin akun mallia, esiteltiin mallin käyttäytyminen sen purku- ja latausyhtälöiden avulla. Mallia tutkittiin simuloinnin avulla. Työssä mitoitettiin hybridikäyttöiseen liikkuvaan työkoneeseen energiavarastoksi akku. Akuksi valittiin litiumioniakku, jonka kapasiteetti laskettiin dieselmoottorin työsyklin suurimman energian tarpeen avulla. Akun kapasiteetiksi valittiin 10 Ah ja käyttöjännitteeksi 600 V. Tällöin akun kapasiteetin varaustilan vaihtelu kyseisellä työsyklillä olisi 10 %. Simulointimallin avulla akun valintaa verrattiin simuloinnissa saatuihin tuloksiin. Lopuksi osoittautui, että tämä 10 %:n akun varaustilan vaihtelu toteutui suurimman energian tarpeen alueella.

Matlabin Simulinkin akun mallin valinnassa voidaan lisätä kapasiteettia tuplaten, joten varaustilan vaihtelu olisi 5 %. Tällöin akun sykli-ikä nousisi, mutta paino kaksinkertaistuisi.

LÄHTEET

- /1/ Linden David, Reddy Thomas B. Handbook of Batteries, Third Edition, 2002. ISBN 0-07-135978-8
- /2/ Alanen, Raili; Hätönen, Hannu; Kallunki, Juha; Ikäheimo, Olli; Knuuttila, Jussi; Holma, Anne; Kauhaniemi, Kimmo; Saari, Pekka; Rinne, Timo, Keskikoon energia-varastot hajautetun sähkönjakelun sovelluksissa, VTT, 2006.
- /3/ Alanen, Raili; Koljonen, Tiina; Hukari, Sirpa; Saari Pekka, Energia varastoinnin nykytila, VTT, 2003.
- /4/ Leppäaho Jari, Tuulivoiman saarekekäyttö, Wind power in power systems. Saatavissa: <http://www.tut.fi/eee/opetus/kurssit/Wind/Seminaarit/luku14.pdf>. Viitattu 9.10.2019.
- /5/ Nurminen Jari. Tutkimus lavankäärintäkoneen oikosulkumoottorien jarrutusenergian varastoimiseksi ja uudelleen käytettäväksi, Hämeen ammattikorkeakoulun opin- näytetyö, 2009. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/5264/ENERGIANSAASTOTUTKIMUS.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Viitattu 9.10.2019.
- /6/ Cheng, Ming-Wang; Wang, Shih-Ming; Lee, Yuang-Shung; Hsiao, Sung-Hsin, Fuzzy Controlled Fast Charging System for Lithium-Ion Batteries, Proceedings of the IEEE, 2009 Vol. 95, No. 4, April 2007
- /7/ Zimmerman Albert H., Self-discharge losses in lithium-ion cells, Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Journals, Vol. 19, No. 2, Feb. 2004
- /8/ The Peukert-Effect. Saatavissa: www.39pw.us/car/peukertEffect.html. Viitattu 2.10.2019.
- /9/ Kitahara, Takeshi; Nakamura, Hajime, A Data Transmission Control to Maximize Purku Capacity of Battery, Wireless Communications and Networking Conference, Proceedings of the IEEE, April 2008. s. 2951-2956
- /10/ Industrial Power. Saatavissa: [www.exide-nordic.com/pdf/manualer-fi/VRLA%20\(Suomi\).pdf](http://www.exide-nordic.com/pdf/manualer-fi/VRLA%20(Suomi).pdf). Viitattu 20.9.2019.
- /11/ Gaojie Xu, Pengxian Han, Shanmu Dong, Haisheng Liu, Guanglei Cui, Liquan Chen. Li₄Ti₅O₁₂-based energy conversion and storage systems: Status and prospects. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/317075857_Li_4_Ti_5_O_12_-based_energy_conversion_and_storage_systems_status_and_prospects/link/5a2e3edb45851552ae7f15ac/download. Viitattu 20.11.2019.
- /12/ Ru-Shi Liu, Lei Zhang, Xueliang Sun, Hansan Liu, and Jiujun Zhang. Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion, Volume 2.

- /13/ Himy, Albert; Dahl, Ernest, Feedback Control Battery Charging, Telecommunications Energy Conference, Proceedings of the IEEE, March 2009. s. 313-314. Viitattu 4.4.2019
- /14/ Esala Mikko. Ideaport. Saatavissa: www.kolumbus.fi/mikko.esala/slaominaisuudet.pdf. Viitattu 24.9.2019
- /16/ Honkanen, H., Akku- ja Paristotekniikat, Oppimateriaali Kajaanin ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://docplayer.fi/4408499-Akku-ja-paristotekniikat.html>. Viitattu 12.10.2019.
- /17/ Haaja, Jani, Valaistustekniikan ja sähkösuunnittelun seminaari Urheilusukeltajien käyttämät valaisimet, 2002. Saatavissa: <http://tsa.kapsi.fi/files/laitedata/urheilusukeltajien%20k%E4ytt%E4m%E4t%20valaisimet.pdf>. Viitattu 16.9.2019.
- /18/ Salameh, Z.M.; Kim, B.G., Advanced lithium polymer Batteries, Power & Energy Society General Meeting, 2009 IEEE Conference, July 2009 s. 1-5.
- /19/ Snelman Henrik, Akkutekniikat 2005, Proessori 10/2005
- /20/ Lithium Yttrium Power LiFeYPO₄. Saatavissa: <http://gwl-power.tumblr.com/post/179845023/lifeypo4-Battery-purku-characteristics-based>. Viitattu 25.9.2019.
- /21/ Ritämäki Pekka, Keksintöjä Li-ion akuissa, Probyte Oy, 2008. Saatavissa: <http://robotti.wdfiles.com/local--files/akut/LiFePo4akut.pdf>. Viitattu 28.9.2019.
- /22/ Jiayuan, Wang; Zechang, Sun; Xuezhe, Wei; Univ, Tongji, Performance and Characteristic Research in LiFePO₄ Battery for Electric Vehicle Applications, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009 IEEE Conference, Sept. 2009. s. 1657-1661
- /23/ Exide akut. Teknistä tietoa. Saatavissa: https://exide.fi/wp-content/uploads/sites/15/2014/11/Exide_fi_Teknisk_info.pdf Viitattu 13.8.2019.
- /24/ LS Mtron. Saatavissa: <http://www.flinkenberg.fi/electronics/lsmtron.html>. Viitattu 15.8.2019
- /25/ Rantanen Kalevi, Nanokonkasta toivotaan akun voittajaa, Tiede-lehti. 11/2009
- /26/ Vanhala Lauri, Nanotekniikka muuttaa kopiopaperin tehokkaaksi akuksi, Tekniikka ja Talous, 9.12.2009.
- /27/ Simola Kaisa, Uudella nanotekniikalla tehokkuutta aurinkokennoihin, Tekniikka ja Talous, 23.7.2010
- /28/ Tremblay, O.; Dessaint, L.-A.; Dekkiche, A.-I., A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007 IEEE Conference, Sept. 2007. s. 284-289

- /29/ Tremblay, O.; Dessaint, L.-A., Exserimental validation of Battery dynamic model for EV applications. World Electric Vehicle Journal, Vol. 3 ISSN 2032-6653, May 2009
- /30/ MathWorks, Blocks, Electrical Sources, Battery. Saatavissa: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/powersys/ref/Battery>. Viitattu 15.9.2019
- /31/ Tuomi Tapio. BCDC energia, Hajautettu pientuotanto ja akut perusteet ja lyhyt oppimäärä. Saatavissa: <http://www.bcdenergia.fi/blogi-ja-uutiset-vierailublogi-hajautettu-pientuotanto-ja-akut-perusteet-ja-lyhyt-oppimaara/>. Viitattu 10.9.2019.
- /32/ Virtanen Markus, Yleisten akkutekniikoiden soveltuvuus Sähköautokäyttöön, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2009.
- /33/ Väyrynen Antti, Sähköauton akuston tasausjärjestelmän ohjauksikriteerien määrittäminen, Lisensiaatintutkimus, 2008.
- /34/ Nonroad Transient Cycle, Saatavissa: www.dieselnet.com/standards/cycles/nrtc.html. Viitattu 29.9.2019
- /35/ Battery and Energy Technologies, Electropaedia. Saatavissa: www.mpoweruk.com/life.htm. Viitattu 6.9.2019.
- /36/ Han-Joo, Kim; Mi-Hyun, Oh; Won-Keun, Son; Tae-Il, Kim; Soo-Gil, Park, Novel Synthesis Method and Electrochemical Characteristics of Lithium Titanium Oxide as Anode Material for High Power Device, Properties and applications of Dielectric Materials. 2006 IEEE Conference, June 2006. s. 464-467
- /37/ Partanen Jarmo. Sähköistyminen mullistaa muunkin kuin energiateollisuuden. Saatavissa: <https://www.lut.fi/documents/27578/498728/Electrification+by+Blue+E+research+%28presentation+by+Jarmo+Partanen%29/3520345b-5482-4d23-af3a-2e8480bd3870> Viitattu 20.10.2019.
- /38/ Altairnano's advanced energy storage systems provide fundamental advantages over existing, traditional lithium-ion Battery designs, Altairnano. Saatavissa: www.altairnano.com. Viitattu 4.6.2019.
- /39/ Duncan Graham-Rowe, Charge a Battery in just six minutes, NewScientist, March 2005. Saatavissa: www.newscientist.com/article/dn7081. Viitattu 4.6.2011.
- /40/ Battery university, Types of Lithium-ion, 2019. Saatavissa: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion. Viitattu 2.10.2019
- /41/ Honkoaho Riku. Diplomityö, Akkukäyttöiset liikkuvat työkoneet. 2016. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/24535/honkoaho.pdf?sequence=3&isAllowed=y> Viitattu 1.11.2019

- /42/ Peltonen Juha. Auto Bild, Uutiset: K-latauksen pikalatauspisteet. Saatavissa: <https://autobild.fi/artikkeli/klatauksen-pikalatauspisteet-maksullisiksi-25-2019-alkaen--sahkoautoilijoille-uusi-sovellus-maksamiseen-ja-lataamiseen-6.182.129829.99f76c5750>. Viitattu 10.10.2019
- /43/ Lähteenmäki Pekka. Talouselämä, Energia: Akkutehdas Suomi. 12/2019. Viitattu 30.10.2019
- /44/ Kushnir Duncan. Chalmers University of Technology, Lithium Ion Battery Recycling Technology 2015, Current State and Future Prospects. Viitattu 25.10.2019
- /45/ Heikkilä Perttu. Diplomityö, Ajoneuvo litium-ioniakkupaketin käyttöönotto. 2015. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/16840/master_Heikkilä_Perttu_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Viitattu 28.10.2019
- /46/ Jianghai. Energy capacitors, HAA AA Series. Saatavissa: www.jianghai-europe.com/ Viitattu 18.10.2019
- /47/ Sillanpää Teemu. Kandidaatintyö, Litium-ioniakun tasapainon hallinta. 2012. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/76743/thesis_lutpub.pdf?sequence=1&isAllowed=y Viitattu 18.10.2019
- /48/ Eskola Miikka. Diplomityö, Energiavarastojen mitoitus laivasähköjärjestelmään. 2011. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/69814/nbnfi-fe201105271621.pdf?sequence=3> Viitattu 20.10.2019
- /49/ Honkoaho Riku. Diplomityö, Akkukäyttöiset liikkuvat työkonet. 2016. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/24535/honkoaho.pdf?sequence=3&isAllowed=y> Viitattu 1.11.2019
- /50/ Mattila Ilpo, Autouutiset. Viisi syytä siihen, miksi akun valmistus pilaa sähköauton ympäristöystävällisen maineen. 2018. Saatavissa: <https://www.iltalehti.fi/autouutiset/a/484381c5-53a3-4a6a-b337-5c54c75b8959> Viitattu 2.11.2019
- /51/ Toivanen Pauliina, Yle uutiset, Sähköauton akku on epäekologinen ja siksi nyt on kehitteillä ilmastoystävällisempi vaihtoehto, suola-akku, joka saattaa olla suuri pelastajamme 2018. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10853858>. Viitattu 3.11.2019
- /52/ Lahti Akseli, Kandidaatin työ, Sähköajoneuvoihin soveltuvien litiumioniakkujen valmistuskapasiteetti. 2019. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159473/Kandidaatinty%c3%b6%20Lahti%20Akseli.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Viitattu 3.11.2019
- /53/ Motiva. Akut. 2019. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvo-tekniikka/akut](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava-liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvo-tekniikka/akut). Viitattu 1.11.2019
- /54/ Ketonen Tapio. Tuulilasi. 2012. Saatavissa: https://exide.fi/wp-content/uploads/sites/15/2014/11/Exide_fi_Teknisk_info.pdf. Viitattu: 17.11.2019

- /55/ Nork Sam. Supercap Backup Circuit Provides Reliable Uninterrupted Power. Saatavissa: <https://www.analog.com/en/technical-articles/supercap-backup-circuit-provides-reliable-uninterrupted-power.html>. Viitattu 24.11.2019
- /56/ Nikola. Nikola Corporation to Unveil Game-Changing Battery Cell Technology at Nikol World 2020. Saatavissa: https://nikolamotor.com/press_releases/nikola-corporation-to-unveil-game-changing-battery-cell-technology-at-nikola-world-2020-67. Viitattu 27.11.2019
- /57/ Satishkumar B. ChikkannanavarA, Dawn M. Bernardi, Lingyun Liu. A Review of Blended Cathode Materials for use in Li-Ion Batteries. 2014. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/270980611_A_review_of_blended_cathode_materials_for_use_in_Li-ion_batteries. Viitattu 2.12.2019
- /58/ Toshiba. Saatavissa: <https://www.scib.jp/en/product/cell.htm>. Viitattu 2.12.2019
- /59/ Tekniikka ja talous. Suomen kaivosala hyppää sähköauton kyytiin – Riittävätkö metallit miljoonien sähköautojen akkuihin? 2019. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/suomen-kaivosala-hyppaa-sahkoauton-kyytiin-riittavatko-metallit-miljoonien-sahkoautojen-akkuihin/56cd57cd-d3a4-3e98-81e0-b45e8cd9e6bd>. Viitattu 5.12.2019

LIITEET

LIITE 1.

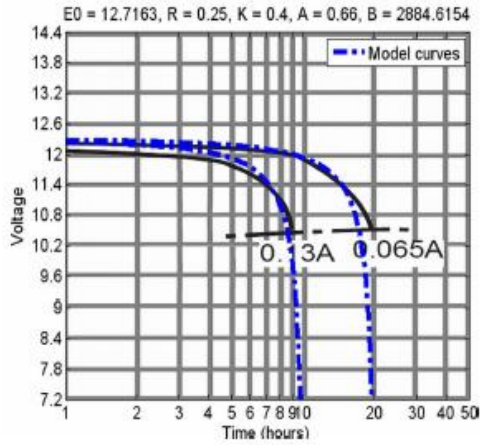


Fig. 5. Lead-Acid battery 12V 1.2Ah

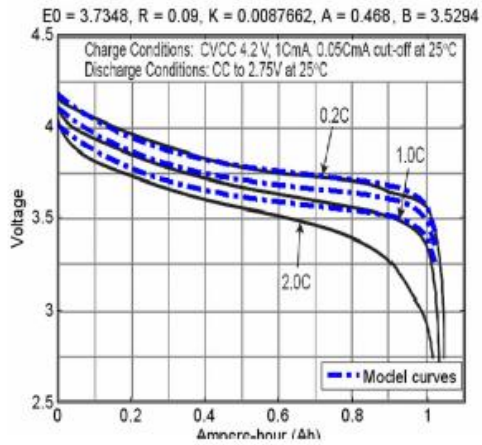


Fig. 7. Lithium-Ion battery 3.6V 1Ah

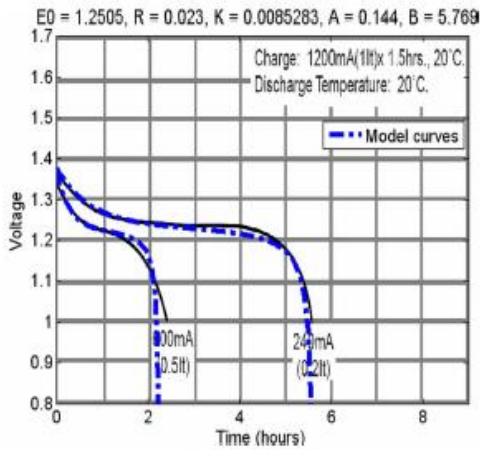


Fig. 6. Nickel-Cadmium battery 1.2V 1.3Ah

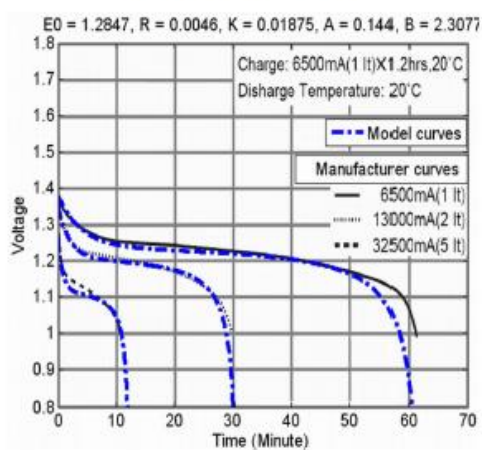


Fig. 8. Nickel-Metal-Hydrid battery 1.2V 6.5Ah