



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Aatu Mutanen

Katsaus litiumakkutekniikoihin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

3.5.2020

Tekijä Otsikko	Aatu Mutanen Katsaus litiumakkutekniikoihin
Sivumäärä Aika	32 sivua 3.5.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Autosähkötekniikka
Ohjaajat	Lehtori Vesa Linja-aho
<p>Tämän opinnäytetyön aiheena on litiumakkutekniikat. Työssä on perehdytty kirjallisen lähdemateriaalin perusteella litiumioniakkujen toimintaan ja niiden käyttösovelluksiin. Litiumioniakkukemioita on monia erilaisia, ja tässä työssä tarkastellaan yleisimmin käytettyjen litiumioniakkukemioiden ominaisuuksia.</p> <p>Työn alussa esitellään lyhyesti akkujen historiaa ja kehitystä. Tämän jälkeen työssä perehdytään litiumioniakun toimintaan ja sen komponentteihin. Lisäksi tarkastellaan eri anodi- ja katodimateriaaleja, minkä jälkeen esitellään kuusi yleistä litiumioniakkukemiaa. Näiden akkukemioiden ominaisuuksia vertaillaan ja niiden perusteella kuvataan eri akkujen käyttökohteita.</p> <p>Seuraavaksi työssä esitellään erilaisia litiumioniakkukennoja. Eri akkukennorakenteilla on omat hyvät ja huonot puolensa, ja tässä osiossa perehdytään niiden ominaisuuksiin ja käyttötarkoituksiin.</p> <p>Oleellisena osana litiumioniakkuja kuvataan niiden akunhallintajärjestelmä. Turvallisen ja pitkän käyttöiän saavuttamiseksi litiumioniakkuja tulee käyttää niiden turvallisella toiminta-alueella. Akunhallintajärjestelmä seuraa akun parametreja, niin että se pysyy turvallisella toiminta-alueella.</p> <p>Lopuksi työssä tarkastellaan akkujen turvallisuuteen liittyviä asioita sekä luodaan katsaus akkujen tulevaisuudennäkymiin.</p> <p>Työn tuloksena syntyi tiivis katsaus litiumakkutekniikoihin.</p>	
Avainsanat	Akku, litiumioniakku, akkutekniikka

Author Title	Aatu Mutanen Review of Lithium Ion Battery Technologies
Number of Pages Date	32 pages 3 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive engineering
Professional Major	Automotive Electronics Engineering
Instructors	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis is based on written source material on lithium-ion batteries. The thesis describes the basic functions and applications of lithium-ion batteries and focuses on the most commonly used lithium-ion battery chemistries and their properties.</p> <p>First the history and the development of batteries are briefly presented. After that, the operation of the lithium-ion batteries and their components are introduced. In addition, different anode and cathode materials are reviewed followed by a presentation of six different lithium-ion chemistries. The properties of these battery chemistries are compared, and their uses are described.</p> <p>Next various lithium-ion battery cell types are introduced. Different battery cell designs have their own pros and cons, features and uses which are discussed.</p> <p>The battery management system is an essential part of lithium-ion batteries which is described. In order to help the batteries to achieve a safe and long life, the lithium-ion batteries should be used within their safe operating range. It is their battery management system that monitors the battery parameters to make sure the batteries are used within their safe operating range.</p> <p>Finally, issues related to battery safety are examined and the future prospects of the batteries are discussed. As a result of this thesis a concise overview of lithium battery technologies was created.</p>	
Keywords	Battery, lithium ion

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Historia	2
3	Litiumioniakkutekniikka	3
3.1	Toimintaperiaate	3
3.2	Katodit	6
3.3	Anodit	7
3.3.1	Litium-kobolttioksidi (LCO)	8
3.3.2	Litium-mangaanidioksidi (LMO)	9
3.3.3	Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi (NMC)	10
3.3.4	Litium-rautafosfaatti (LFP)	11
3.3.5	Litium-nikkeli-kobolttialumiinioksidi (NCA)	12
3.3.6	Litium-titanaatti (LTO)	13
4	Kennot	14
5	Akunhallintajärjestelmä	18
5.1	Tehtävät	19
5.2	Komponentit	21
5.3	Hallinta	23
5.3.1	Suojaus	23
5.3.2	Balansointi	24
5.3.3	Lämmönhallinta	25
6	Turvallisuus	26
7	Tulevaisuuden näkymiä	28
	Lähteet	31

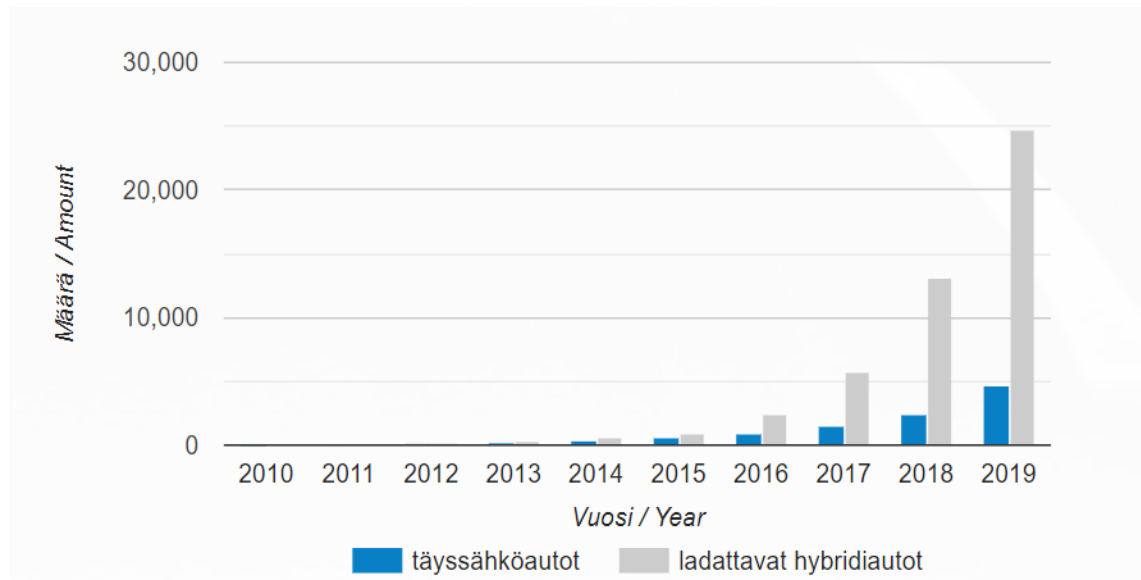
Lyhenteet

BMS	Battery management system. Akun hallintajärjestelmä.
PTC	Positive temperature coefficient. Vastus, jonka resistanssi kasvaa lämpötilan noustessa.
SOA	Safe operating area. Eri parametreista riippuva alue, jolla litiumioniakun on turvallista toimia.
SOC	State of charge. Akun varaustila.
SOH	State of health. Akun kunto.
SOF	State of function. Akun toimintatila.
CSC	Cell supervisory circuit. Kennon valvontapiiri.
DOD	Depth of discharge. Purkauksen syvyys.
NMC	Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi
NCA	Litium-nikkeli-alumiinioksidi
LFP	Litium-rautafosfaatti
LMO	Litium-mangaanidioksidi
LCO	Litium-kobolttioksidi

1 Johdanto

Teknologia kehitty nopeasti, ja tämän seurauksena elektronisista laitteista tulee kompaktimpia. Tämän takia elektroniikka on entistä enemmän riippuvainen riittävästä energian varastoinnista pienessä koossa. Nykypäivänä yhä enemmän ihmisten päivittäin käyttämien elektronisten laitteiden toiminnan taustalla on akku. Monella osa-alueella teknologia suuntaa yhä enemmän kompakteihin ja kannettaviin elektronisiin laitteisiin, ja täten tarve akuille on suuri.

Myös sähköautojen suosio kasvaa kovaa vauhtia. Viime vuosina esillä olleiden ympäristökysymysten sekä polttomoottoreihin kohdistuneen verotuksen ansiosta hybridi- sekä sähköautot ovat yleistyneet kovaa vauhtia. Vuonna 2010 täyssähköautoja oli Suomessa tieliikennekäytössä 23 kappaletta, ja ensimmäiset ladattavat hybridiautot tulivat tieliikenteeseen vuonna 2012 (taulukko 1). Vuonna 2019 täyssähköautoja tieliikenteessä oli 4661 kappaletta ja ladattavia hybridejä 24704 kappaletta. Verrattuna vuoteen 2018 täyssähköautojen ja hybridiautojen määrä oli noin kaksinkertainen vuonna 2019 (kuva 1).



Kuva 1. Suomessa liikennekäytössä olevat sähköautot (1).

Taulukko 1. Suomessa liikennekäytössä olevat sähköautot (1).

Vuosi	täyssähköautot	ladattavat hybridiautot
2010	23	0
2011	56	0
2012	109	128
2013	169	296
2014	360	569
2015	614	973
2016	844	2 441
2017	1 449	5 719
2018	2 404	13 095
2019	4 661	24 704

Monella on litiumioniakkuja käytössä jopa päivittäin, mutta yleisesti näiden akkujen toimintaa ei tunneta. Tässä opinnäytetyössä perehdytään litiumioniakkuihin. Opinnäytetyössä käydään läpi akkuteknologioiden kehitystä, litiumioniakkujen toimintaperiaatteita ja käyttökohteita. Lisäksi lopuksi perehdytään myös hieman tarkemmin litiumioniakkujen turvallisuuteen ja tulevaisuuden näkyymiin.

2 Historia

Vuonna 1780 italialainen fyysikko Alessandro Volta tuotti sähköä ensimmäisen kerran Voltic pile -paristollaan, joka oli tehty kuparista, sinkistä ja elektrolyytistä. Hän oli ensimmäinen ihminen, joka pystyi tuottamaan sähköä elektrolyytin säilömästä elektrokemiallisesta energiasta. (2, preface.)

Litiumparistojen ja -akkujen historia alkoi vuonna 1962. Ensimmäistä akkua ei voinut ladata ensimmäisen purkautumisen jälkeen, eli se oli litiumparisto. Materiaaleina paristossa käytettiin litiumia negatiivisena elektrodina ja magnaanidioksidia positiivisena elektrodina. Tämän pariston toi markkinoille Sanyo vuonna 1972. Moli Energy kehitti

ensimmäisen ladattavan litiumpohjaisen akun vuonna 1985. Tämä akku perustui litiumin käyttöön negatiivisena elektrodina, mikä kuitenkin osoittautui turvallisuusriskiksi.

Seuraava askel kohti litiumioniakkuja oli sellaisten materiaalien käyttö elektrodeissa, jotka mahdollistavat litiumin interkalaation sekä deinterkalaation ja joilla on myös korkea jännitepotentiaali. Sony kehitti ensimmäisen ladattavan litiumioniakun ja toi sen markkinoille vuonna 1991.

Litiumioniakkuja on käytetty mobiililaitteissa jo vuodesta 1991. Tämä johtuu akkujen korkeasta energiasisällöstä ja alhaisesta painosta. Akkuja on enimmäkseen käytetty matkapuhelimissa sekä tableteissa. Litiumioniakkuja käytetään myös paljon sähkötyökaluissa, joissa jännite vaihtelee 3,6:n ja 36 V:n välillä.

Nykyään litiumioniakkuja käytetään paljon myös liikenteessä. Näiden akkujen käyttö on lisääntynyt mm. sähköpolkupyörien ja -potkulautojen suosion kasvaessa. Lisättäessä käyttövoimaksi litiumioniakku jo ennalta keksittyyn kulkuneuvoon litiumioni sopii hyvin matalan painon ja korkean energiatihedyyden takia. Ladattavat hybridi- sekä täyssähköautot käyttävät käytännössä aina litiumioniakkuja. (2, s. 13–14.) Ei-ladattavissa hybridi-autoissa käytetään myös nikkeli-metallihydridiakkuja.

Akkujen kehitys on ollut hidasta. Siinä, missä Mooren laki on kaksinkertaistanut transistorien määrän mikrosirussa kahden vuoden välein, kapasiteetin lisäys litiumioniakuissa on ollut keskimäärin 8 % vuosittain, sen jälkeen kun kaupalliset litiumioniakut tulivat markkinoille 1991. (3.)

3 Litiumioniakkutekniikka

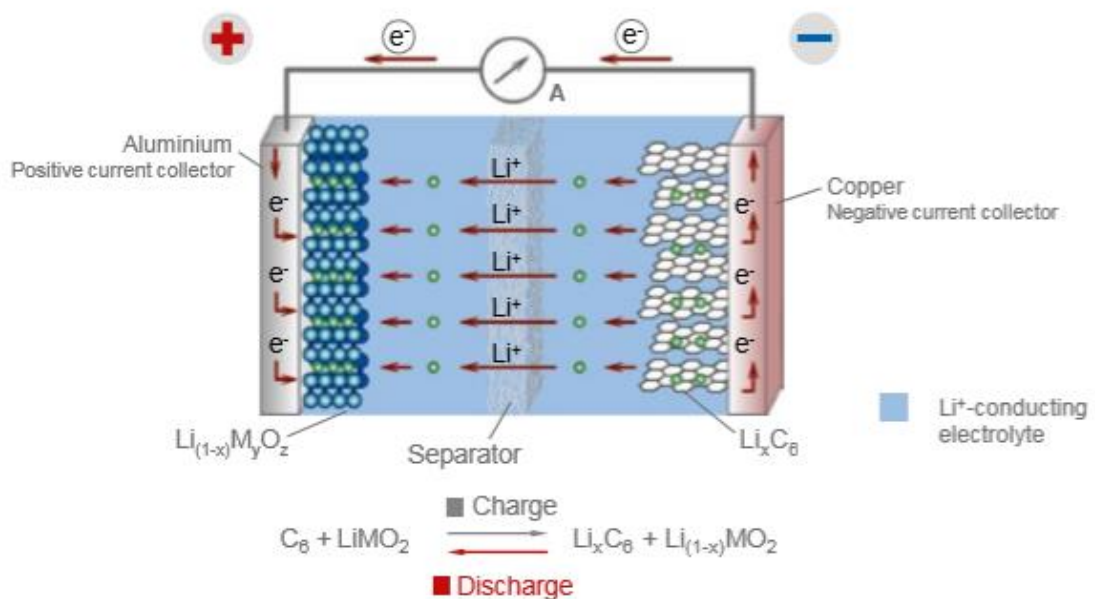
3.1 Toimintaperiaate

Tärkeä osa litiumioniakun toimintaa on hapetus-pelkistymisreaktio. Tämä on ionien pelkistymistä ja hapettumista. Pelkistyminen tapahtuu aina katodilla ja hapettuminen anodilla. On kuitenkin tärkeä muistaa, että latauksen aikana katodinen reaktio tapahtuu niin sanotulla anodilla, sillä se hapettuu ja vapauttaa elektroneja, kun taas anodinen

reaktio tapahtuu niin sanotulla katodilla, sillä tämä pelkistyy ja vastaanottaa elektroneja. Purkauksen aikana katodinen reaktio tapahtuu meille tutulla katodilla, joka vastaanottaa elektroneja anodilla, jossa hapettuminen tapahtui. Jos nämä reaktiot eivät vaihtuisi, akkua ei pystyttäisi lataamaan.

Hapetus-pelkistymisreaktion alussa ja lopussa litiumionit sijoittuvat anodiin tai katodiin, ja tätä kutsutaan interkalaatioksi. Litiumionin ollessa hyvin pieni partikkeli on sen helppoa interkaloitua isompiin yhdisteisiin. Tämä prosessi voidaan peruuttaa, mikä mahdollistaa akun latauksen ja purkauksen. Litiumionin täytyy sijoittua materiaaliin ilman tämän rakenteen suurempaa muuttumista. Tämä voi aiheuttaa vahinkoa isäntämateriaalissa ja lyhentää syklistä ikää. Litiumioniakuissa katodi ja anodi toimivat isäntinä ioneille. Katodin metallioksideilla on joko kerros- tai tunnelityyppinen kristallirakenne, joka mahdollistaa litiumionien sijoittumisen kerrosten väliin tai tunneleihin. Hiilipohjaisten anodien kerrosrakenne mahdollistaa myös litiumionien sijoittumisen kerrosten väliin. (4, s. 66.)

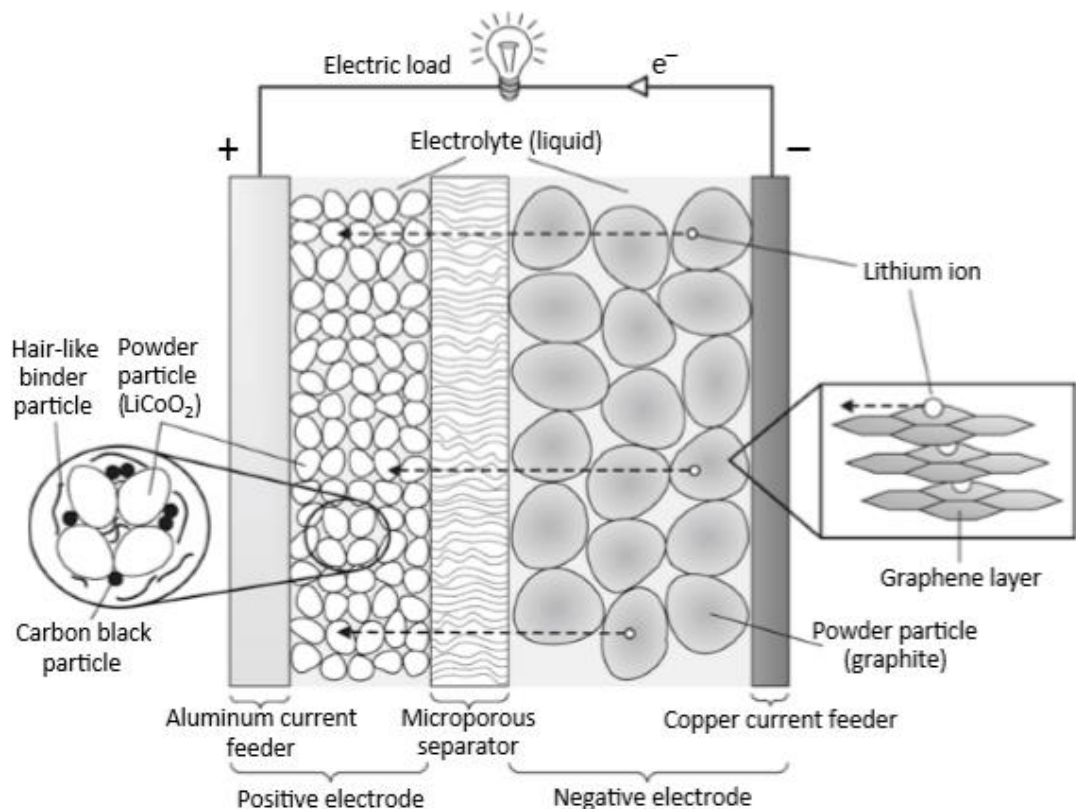
Kuva 2 osoittaa ladattavan litiumioniakun peruseriaatteen ja toiminnan.



Kuva 2. Litiumioniakun toiminta (purkausprosessi) (2, s. 15).

loneja johtava elektrolyytti on sijoitettu kahden elektrodin väliin. Keskellä on myös separaattori, joka eristää elektrodit toisistaan sähköisesti. Yksittäiset litiumionit kulkevat edestakaisin litiumioniakkujen elektrodien välillä lataamisen ja purkautumisen aikana ja interkalatoituvat aktiivisiin materiaaleihin (kuva 3). Purkautumisen aikana litium

deinterkalatoituu negatiivisesta elektrodista ja elektronit vapautuvat. Positiivisen elektrodin aktiivisia materiaaleja ovat esimerkiksi sekoitetut oksidit. Negatiivisen elektrodin materiaalit ovat pääosin grafiitti ja amorfiset hiilyhdisteet. Näihin materiaaleihin litium interkalatoituu. Litiumionit siirtyvät negatiiviselta elektrodilta elektroytyin ja erottimen läpi positiiviselle elektrodille purkautumisen aikana. Samaan aikaan elektronit kulkeutuvat negatiiviselta elektrodilta ulkoisen sähköliitännän kautta positiiviselle elektrodille. Latauksessa on sama prosessi, mutta vain päinvastoin. (2, s. 14–16.)



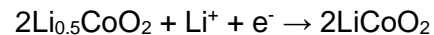
Kuva 3. Perinteiset litiumioniakun osat (2, s. 22).

Litiumioniakun positiivista elektrodia kutsutaan katodiksi ja negatiivista elektrodia anodiksi. Nämä nimet edustavat todellisuutta vain akkua purettaessa. Tämä on kuitenkin toisin ladattaessa, jolloin positiivinen elektrodi toimii anodina ja negatiivinen katodina. Nimet ovat peräisin litiumparistoista, joita ei koskaan ladattu.

Perinteinen positiivisen elektrodin materiaali on litium-kobolttioksidi LiCoO₂. Tällä on kerrosrakenne, jossa on vuorottelevat koboltti-, happi- ja litiumionkerrokset. Latauksen

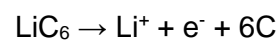
aikana litium poistuu kiteestä (deinterkalaatio) ja purkauksen aikana se palaa (interkalaatio). Kuitenkin vain 50 % litiumista voidaan käyttää. Jos yli puolet litiumista poistuu kiteestä, kiderakenne voi romahtaa ja vapauttaa happea. Tämä voi aiheuttaa lämpöherkkyyden, sillä happi voi polttaa elektrolyytin.

Täydelliseen purkautumisen reaktio positiivisessa elektrodissa on



Kaikista yleisimmin käytetty materiaali negatiivisessa elektrodissa on grafiittinen hiili. Siinä hiiliatomit ovat yhdensuuntaisissa grafeenikerroksissa. Latauksen aikana litiumionit interkaloituvat grafiitin kerrosten väliin. Purkautumisen aikana litiumionit lähtevät grafiitista. Toisin kuin kobolttioksidi, grafiitti on vakaa ilman litiumia, joten se voi purkautua lähes kokonaan. (2, s. 41–42.)

Täydellisen purkautumiseen reaktio negatiivisessa elektrodissa on



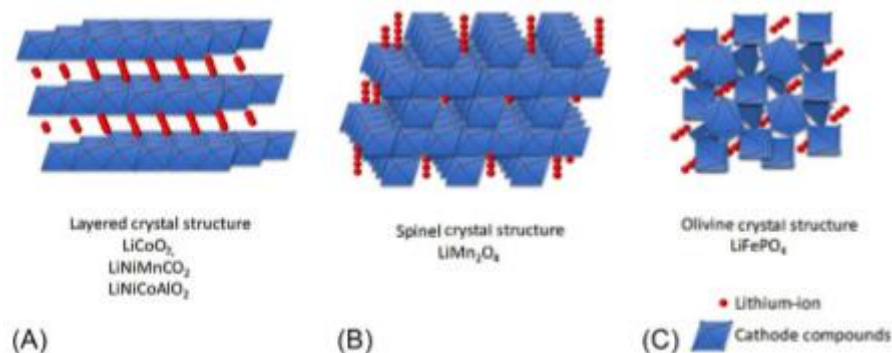
3.2 Katodit

Katodi on sähkökemiallisen litiumioniakun positiivisesti varautunut elektrodi, jossa litiumionin pelkistys tapahtuu. Kuten aiemmin todettiin, katodi voi olla kumpi tahansa elektrodi riippuen siitä, ladataanko vai puretaanko akkua. Alalla on sovittu, että katodiksi kutsutaan elektrodiä, joka on päällystetty aktiivisella NMC, NCA, LFP, LMO tai LCO -materiaalilla riippumatta varauksen tilasta. (4, s. 100.)

Katodielektrodi koostuu kolmesta osasta: virran kerääjä, johtava sidosaine ja aktiivinen materiaali. Litiumioniakkuja on tapana kuvailla niiden aktiivisen aineen perusteella. Yleisin käytetty aktiivinen aine litiumioniakuissa on litium-rautafosfaatti (LFP), litium-kobolttioksidi (LCO), litium-mangaanidioksidi (LMO), litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA) ja litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi (NMC).

Jotta materiaali olisi sopiva litiumionikatodiksi, täytyy tämän materiaalin täyttää muutama avainominaisuus. Materiaalin tulee olla sellainen, että se pystyy keräämään suuren määrän litiumioneja, ja reaktion täytyy olla palautuva. Materiaalin täytyy tehdä tämä ilman rakenteellista muutosta materiaalissa saavuttaakseen pidemmän syklisen iän. Hyvän katodimateriaalin tulisi myös nopeasti interkaloida litiumionit tarjoamalla korkean litiumionien diffuusion, minkä seurauksena saadaan korkea tehoteho. Materiaalin tulisi olla hyvä elektroninen johdin, joka ei liukene elektrolyyttiin. Materiaalin tulisi olla myös halpa ja kaupallisesti saatavilla.

Aktiiviset materiaalit koostuvat litium-metallioksidin tai litium-metalli-fosfaattimolekyylien yhdisteistä. Nämä materiaalit voidaan jakaa ryhmiin niiden kiteisen rakenteen perusteella. Nämä rakenteet ovat kerroksittainen, spinelli ja oliiviini (kuva 4). (4, s. 100.)



Kuva 4. Litiumionikemioiden kiderakenteet (4, s. 100).

3.3 Anodit

Anodin aktiivinen materiaali litiumioniakussa on rakenne, joka toimii isäntänä litiumioneille, jotka tulevat katodilta purkauksen aikana. Tässä käsitellään anodina elektrodia, joka käyttää hiilipohjaista aktiivista materiaalia. Kuten katodi anodi sisältää

joukon sidosaineella yhdessä olevia molekyylejä, jotka yhdistävät aktiivisen materiaalin kupariseen virrankerääjään.

Kuten katodilla anodin aktiivisen materiaalin tulee täyttää muutama avainominaisuus. Materiaalin interkalaation ja deinterkalaation sähkökemiallisten arvojen on oltava suuremmat kuin litiummetallin. Sen tulisi pystyä säilömään suuri määrä litiumia ja olla täysin palautuva. Sillä on myös oltava korkea elektroninen ja ioninen johtavuus. Materiaalilla on myös oltava suuri kapasiteetti gravimetrisesti (mAh/g) ja volumetrisesti (mAh/cm³). Materiaalilla tulee olla matala toimintajännite verrattuna litiumiin. Hyvällä anodimateriaalilla on oltava pitkä syklin käyttöikä ilman rakenteellisia muutoksia. Materiaalin tulee olla kemiallisesti ja termisesti stabiili elektrolyytin kanssa. Korkea terminen stabiilisuus mahdollistaa paremman turvallisuuden, ja korkea kemiallinen stabiilisuus tarkoittaa, ettei materiaali liukene elektrolyyttiin. (4, s. 115–116.)

Erialaisten anodimateriaalien arvioinnissa yksi tärkeimmistä kriteereistä on ominaiskapasiteetti (taulukko 2).

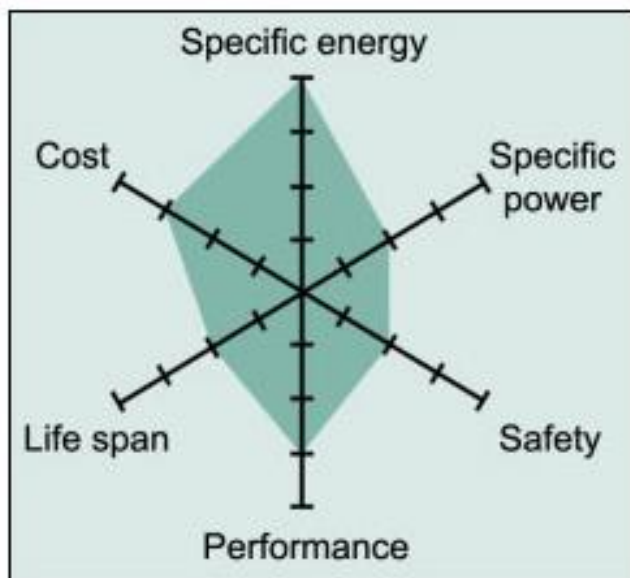
Taulukko 2. Eri anodimateriaalien ominaisenergia (4, s. 116).

Element	Specific capacity (mAh/g)	Volumetric capacity (mAh/cm ⁻³)
Silicon (Si)	4191	9765
Lithium (Li)	3860	2061
Germanium (Ge)	1528	8626
Aluminum (Al)	993	2681
Tin (Sn)	992	7241
Graphene (C)	960	4284
Antimony (Sb)	660	4402
Hard carbon (C)	480	553
Natural graphite (C)	372	837
Artificial graphite (C)	342	369
Soft carbon (C)	255	293
Titanium (Ti)	175	613

3.3.1 Litium-kobolttioksidi (LCO)

LCO-akku koostuu kobolttioksidikatodista ja grafiittianodista. Katodilla on kerrosrakenne, ja purkautumisen aikana litiumionit liikkuvat anodilta katodille. Ionien liikkuminen on päinvastaista latauksessa. Akulla on 3,6 V:n nimellisjännite ja tyypillinen toiminta-alue

3,0–4,2 V. Akun energiatiheys on 150–200 Wh/kg. Huonoina puolina litiumkobolttioksidiaakuissa on sen lyhyt käyttöikä, huono lämpöstabiiliteetti sekä rajoitetut kuormitusominaisuudet (kuva 5). C-nopeus on akun purkautumisnopeuden mitta suhteessa sen maksimikapasiteettiin. 1 C:nnopeus tarkoittaa että purkausvirta purkaa akun tyhjäksi tunnissa. Purkausvirran ollessa 2 C, akku tyhjenee 30 minuutissa. Litiumkobolttiakkua ei saisi ladata eikä purkaa sen suuremmalla virralla kuin 1 C. Täten esimerkiksi 18650-kennoa, jonka kapasiteetti on 2400 mAh, voidaan ainoastaan ladata ja purkaa 2400 mA:n virralla. Pakottamalla pikalatausta tai kuormittamalla yli 2400 mA:n virralla, akku voi ylikuumentua ja kuormittua. Valmistaja suosittelee latauksen C-arvoksi 0,8 C tai 2000 mA. Korkean energiatihedysten takia litiumkobolttia käytetään suurimmaksi osaksi pienenä elektroniikassa esimerkiksi matkapuhelimissa, kannettavissa tietokoneissa ja kameroissa. Litium-kobolttiakkujen suosio on laskussa kobolttin kalleuden takia. (5.)

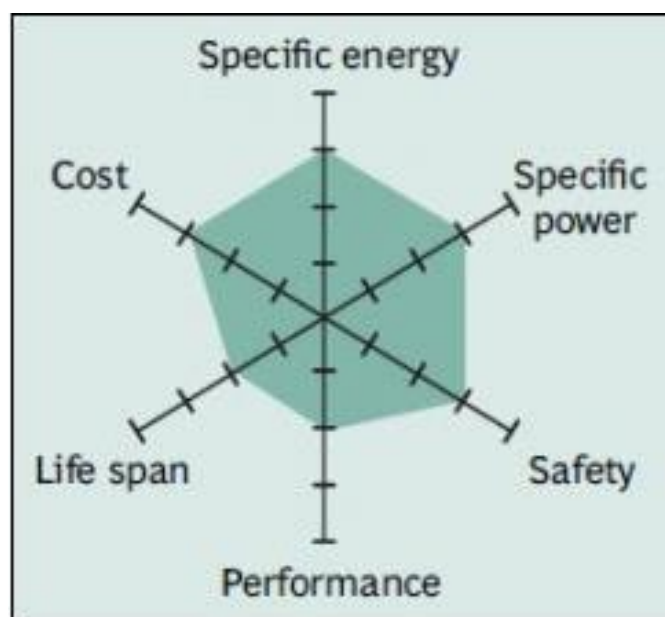


Kuva 5. Litium-kobolttiakun seittikaavio (5).

3.3.2 Litium-mangaanidioksidi (LMO)

Litiumioniakku mangaanispinelillä julkaistiin ensimmäisen kerran Materials Research Bulletin -lehdessä vuonna 1983. Vuonna 1996 Moli Energy kaupallisti litiumionikennon mangaanioksidikatodilla. Tämä arkkitehtuuri muodostaa kolmiulotteisen spinellirakenteen, joka parantaa ionien virtaa elektrodissa, minkä seurauksena sisäinen resistanssi laskee. Lisäksi spinellirakenne tarjoaa korkeamman lämpöstabiilisuuden ja

parantaa turvallisuutta, mutta akun syklinen ikä laskee (kuva 6). Matala sisäinen resistanssi mahdollistaa nopean latauksen ja korkean purkausvirran. 18650-mallisessa kennossa litiummangaaniakkua voidaan purkaa jopa 20–30 A:n virroilla. On myös mahdollista purkaa akkua 50 A:n virralla käyttäen yhden sekunnin kuormituspulssia. Jatkuva noin 50 A:n purku aiheuttaisi ylikuumenemisen, eikä kennon lämpötila saa nousta yli 80 °C:seen. LMO akun nimellisjännite on 3,7 V ja tyypillinen toiminta-alue 3,0–4,2 V. Akun energiatiheys on 100–150 Wh/kg. LMO-akkuja käytetään sähkötyökaluissa, lääketieteellisissä laitteissa sekä sähkö- ja hybridautoissa. (5.)

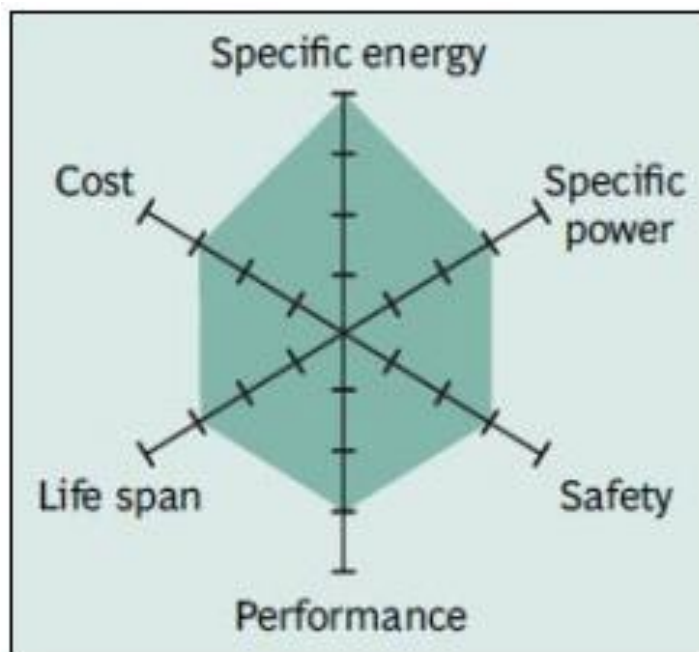


Kuva 6. Litium-mangaaniakun seittikaavio (5).

3.3.3 Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi (NMC)

Yksi menestyneimmistä litiumionikemioista on nikkeli-mangaani-kobolttiyhdisteinen katodisekoite. 18650-kennossa olevan NMC-akun kapasiteetti kohtuullisella kuormituksella on 2800 mAh, ja se pystyy toimittamaan 4 A – 5 A:n virran. Vastaavasti samankokoinen NMC-kenno, joka on optimoitu tehotehyyteen, on kapasiteetiltaan vain 2000 mAh mutta voi antaa jatkuvaa 20 A:n virtaa. Piipohjainen anodi kykenee jopa 4000 mAh:n kapasiteettiin, mutta heikentää kennon latausnopeutta sekä elinikää.

Grafiittiin lisätyllä piillä on haittapuolena anodin koon kasvaminen ja kutistuminen latauksen ja purkauksen aikana, mikä aiheuttaa mekaanista epävakautta. Nikkeli tunnetaan korkeasta tehotiheydestään ja huonosta stabiliteetista, mutta mangaanin etuna on tämän muodostama spinellirakenne, jolla saavutetaan matala sisäinen resistanssi. Yhdistämällä nämä kaksi metallia ne parantavat toistensa heikkouksia (kuva 7). Akkujen valmistajat siirtyvät pois koboltti akuista koboltin korkean kustannuksen takia. Nikkelipohjaisilla akuilla on korkeampi energiatiheys, matalampi hinta sekä pidempi syklinen käyttöikä, mutta matalampi jännite. (5.)

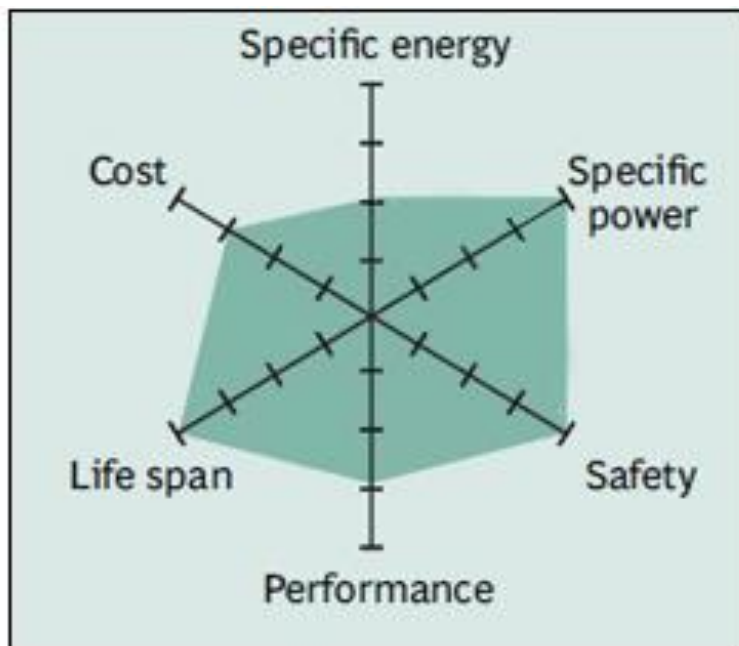


Kuva 7. Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidiaakun seittikaavio (5).

3.3.4 Litium-rautafosfaatti (LFP)

Litium-fosfaatti sietää enemmän täyden varauksen olosuhteita sekä stressiä kuin muut litiumioni pohjaiset akut. Tämän seurauksena akulla on pienempi nimellisjännite 3,2 V, mikä vähentää akun tehotiheyttä (kuva 8). Akun energiatiheys on 90–120 Wh/kg. Litiumfosfaattiakun itsepurkautuminen on nopeampaa kuin muilla litiumioniakuilla, mikä voi aiheuttaa ongelmia kennojen varausten tasaamisessa ikääntymisen myötä. Tätä voidaan lieventää käyttämällä laadukkaita kennoja tai huolellisesti suunniteltua ohjauselektroniikkaa, joissa kummassakin tapauksessa akkupaketin hinta nousee.

Valmistuksen puhtaus on tärkeää pitkäikäisyyden kannalta. Kosteus voi vähentää akun syklistä ikää jopa 50 sykliin. Litium-fosfaattia on yleensä käytetty korvaamaan lyijyakkua autojen käynnistysakkuina. Neljä kennoa sarjassa tuottaa 12,8 V. Autot lataavat lyijyakkua 14,4 V:n jännitteeseen ja ylläpitävät tätä varausta. Tämä voi aiheuttaa ylimääräistä stressiä litiumfosfaatti akulle, mikäli pitkän ajon aikana akun lataus pysyy 14,4 V:ssa. Myös kylmät lämpötilat voivat aiheuttaa alhaista suorituskykyä akun kylmäkäynnistysteholle. (5.)

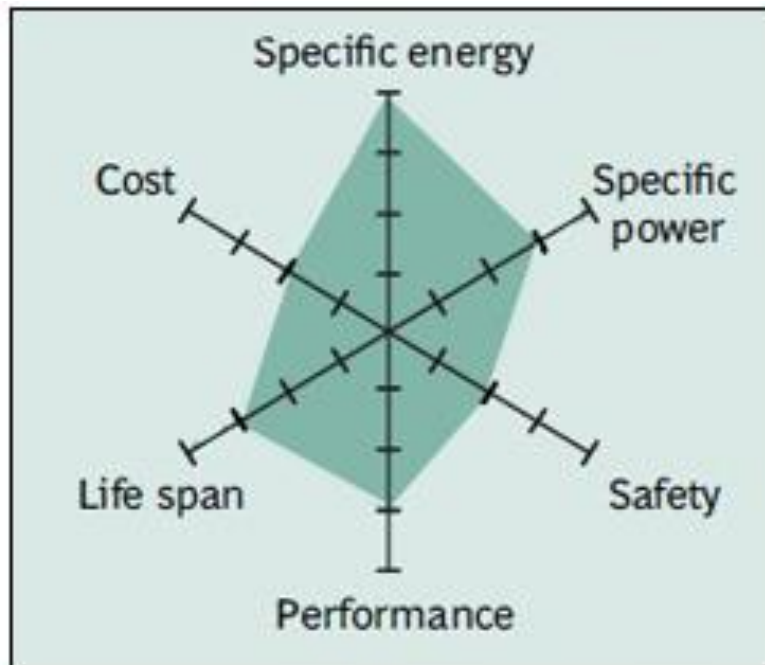


Kuva 8. Litium-rautafosfaatti akun seittikaavio (5).

3.3.5 Litium-nikkeli-kobolttialumiinioksidi (NCA)

Litium-nikkeli-kobolttialumiinioksidiakkuja on ollut erikoiskäytössä vuodesta 1999. NCA-akulla on paljon yhtäläisyyksiä NMC-akun kanssa. NCA-akulla on korkea energiatiheys, kohtalaisen hyvä tehotiheys sekä pitkä käyttöikä (kuva 9). Vähemmän houkuttelevia ominaisuuksia ovat NCA-akun turvattomuus ja korkea hinta. NCA-akku on pidemmälle kehitetty litiumnikkelioksidiakku. Alumiinia lisäämällä on saatu stabiilisuutta parannettua. NCA:n nimellisjännite on 3,6 V ja toiminta-alue 3,0–4,2 V. Energiatiheys 200–260 Wh/kg. (5.) NCA-akkuja käytetään sähköautoissa ja verkkovarastoinnissa. Tesla on

kuitenkin pääasiassa ainoa sähköautojen valmistaja joka käyttää NCA-akkuja, kun taas muut valmistajat suosivat NMC-akkuja.

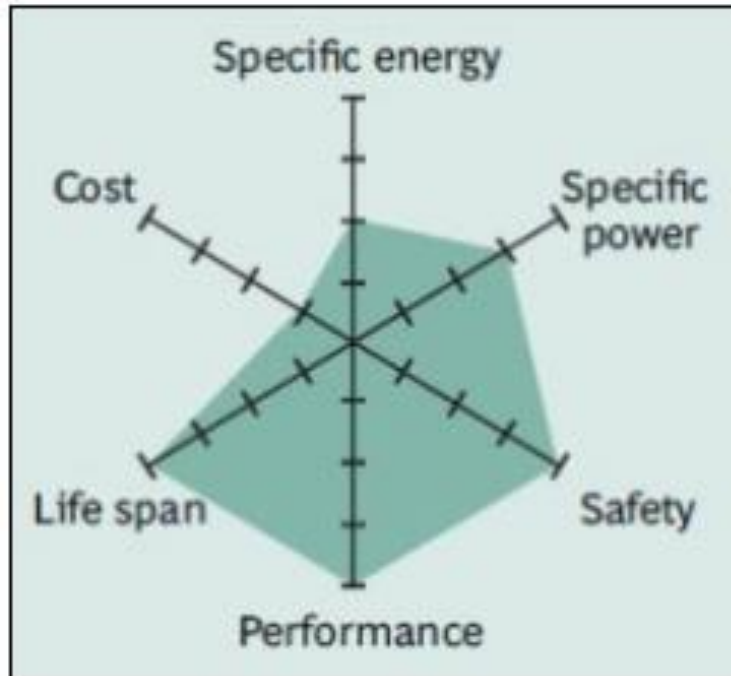


Kuva 9. Litium-nikkeli-kobolttialumiinioksidi akun seittikaavio (5).

3.3.6 Litium-titanaatti (LTO)

LTO akussa litium-titanaatti korvaa grafiitin anodissa ja muodostaa spinellirakenteen. Katodi voi olla litiummangaanioksidia. LTO-akun ominaisjännite on 2,4 V, ja sitä voidaan ladata nopeasti sekä akku pystyy antamaan korkean purkuvirran 10 C eli 10-kertaisen nimelliskapasiteettiin verrattuna. Akun syklinen käyttöikä on korkea, ja akku on turvallinen (kuva 10). LTO-akulla on erinomaiset matalan lämpötilan purkausominaisuudet ja säilyttää 80 % kapasiteetistaan $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa. Etuna LTO-akulla on tämän nolajänniteominaisuus, ei SEI-kalvon muodostumista eikä litiumpinnoituksen muodostumista, kun kennoa ladataan nopeasti tai puretaan matalassa lämpötilassa. Akkua ladataessa ja purkaessa aktiivisen materiaalin tilavuus muuttuu ionien siirtyessä materiaalien välillä. Nollajänniteominaisuuden määritelmä on alle 1 %:n muutos aktiivisen materiaalin tilavuudessa syklin aikana. Lämpöstabiilisuus korkeissa lämpötiloissa on myös parempi verrattuna muihin litiumionikemioihin.

Kuitenkin huonona puolena LTO-akulla on sen korkea hinta sekä matala energiatiheys 65 Wh/kg. (5.)



Kuva 10. Litium-titanaatti akun seittikaavio (5).

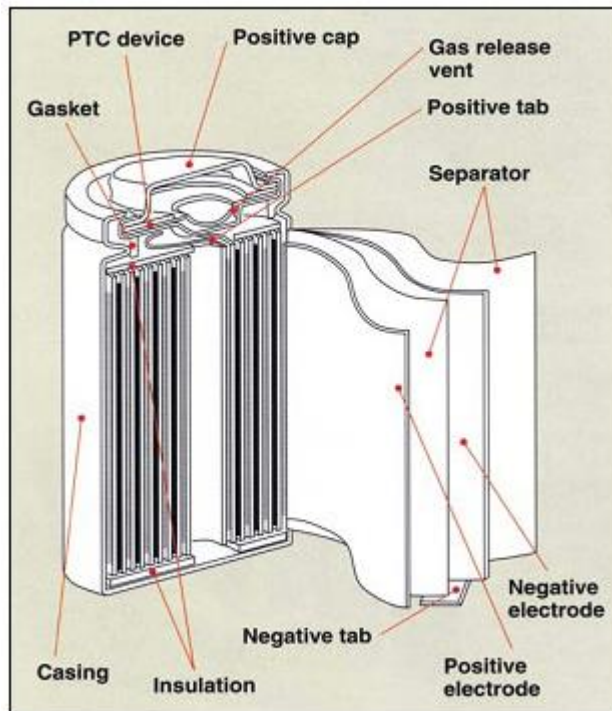
4 Kennot

4.1 Sylinterikenno

Sylinterikenno on yleisimmin käytetty kennotyyppi (kuva 5). Suosituin näistä on selvästi 18650- sylinterikenno. Tämä kenno on halkaisijaltaan 18 mm ja pituudeltaan 65 mm. Tätä kennotyyppiä käytetään paljon kannettavissa elektronisissa laitteissa, sähkötyökaluissa sekä sähköpyörissä.

Monissa litium- ja nikkelpohjaisissa sylinterikennoissa on PTC-vastukseen perustuva oikosulku- ja ylikuormitussuoja. Tämän vastuksen vastaanottaessa ylimääräistä virtaa normaalisti johtava polymeeri kuumenee lisäten tämän resistanssia. Tämä resistanssi katkaisee virran kulun. Tällöin polymeeri jäähtyy ja alkaa johtamaan jälleen virtaa. Tämä

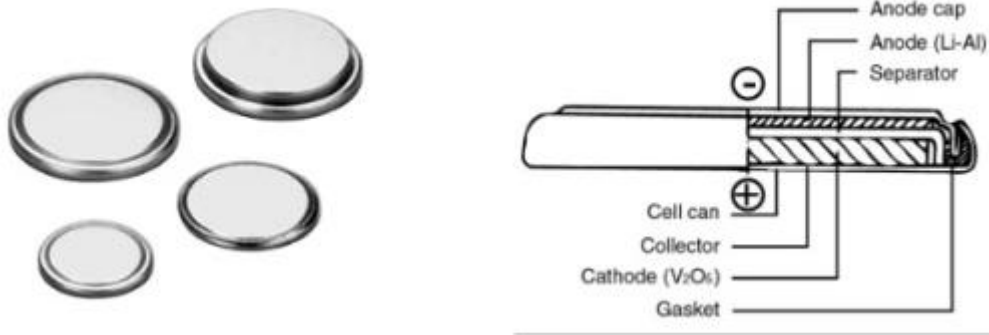
toimii kennon oikosulkusuojana. Monet sylinterikennot sisältävät myös varoventtiilin. Tämä perustuu huokoiseen kalvoon, joka puhkeaa korkean paineen vaikutuksesta. Myös uudelleen sulkevia jousikuormitteisia venttiilejä käytetään. (6.)



Kuva 11. Halkileikkaus litiumionisylinterikennosta (6).

4.2 Nappikenna

Nappikenna on pieni kolikon muotoinen kennotyyppi (kuva 12). Pienen koon ansiosta nappikennoa käytetään paljon kannettavissa elektronisissa laitteissa, kelloissa ja autonavaimissa. Huonona puolena nappikennossa on sen turpoaminen nopean latauksen aikana. Yleisimmät nappikennot eivät ole ladattavia akkuja vaan litiumparistoja. (6.)

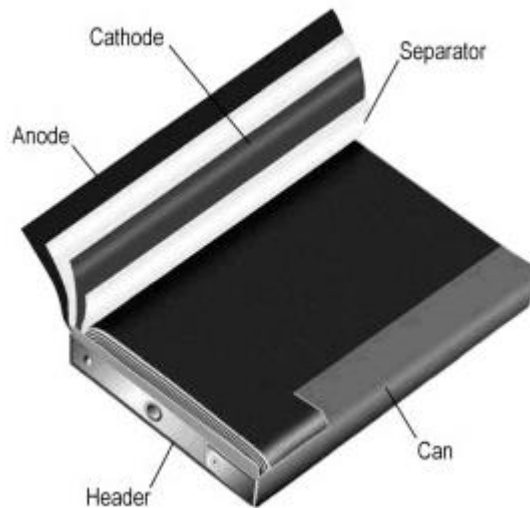


Kuva 12. Nappikennon poikkileikkaus (6).

4.3 Prismaattinen kenno

Prismaattinen kenno on vuonna 1990 esitelty ohuemman koon akkukenno. Laatikkomaisen pakkauksen myötä, prismaattinen kenno hyödyntää tilankäyttöä optimaalisesti (kuva 13). Näitä kennoja käytetään suurimmaksi osaksi matkapuhelimissa, tableteissa sekä kannettavissa tietokoneissa. Myös suurempia alumiinikuorissa olevia kennoja käytetään sähkö- ja hybridautojen voimansiirrossa. (6.)

Prismaattisen kennon koot vaihtelevat hyvin pienestä (<4 Ah) jopa suuriin (>250 Ah) kennoihin. Prismaattiset kennot käyttävät yleensä joko rullattua tai taitettua atodi-anodi-separaattoriasetelmaa asennettuna alumiini- tai muovikuoriin. Riippuen kennon koosta anodi ja katodi voivat käyttää joko z-taitto, pino- tai rullattua mallia. (7, s. 132–134.)



Kuva 13. Halkileikkaus prismaattisesta kennosta (6).

4.4 Pussikkenno

Pussikennossa sähköä johtavat foliolevyt hitsattiin elektrodihin ja vietiin kennon ulkopuolelle täysin suljetulla tavalla (kuva 14). Pussikkenno käyttää tehokkaimmin tilaa ja saavuttaa 90–95 prosentin pakkaustehokkuuden, joka on korkein kaikista akkukennoista. Poistamalla metallikuori voidaan vähentää kennon painoa, mutta kenno silti tarvitsee tukirakenteen ja tilaa laajentua akkupaketissa. Kennoja käytetään kuluttaja-, sotilas- sekä ajoneuvosovelluksissa. Pussikennoissa käytetään yleensä litium-polymeerikemiaa. Litium-polymeeriakuissa elektrolyytinä käytetään puolikiinteää polymeeriä elektrolyytinä.

Pussikkennoja käytettäessä on otettava huomioon kennon turpoaminen. Pienemmät kennot voivat kasvaa 8–10 % 500 syklin aikana, kun taas isommat kennot voivat kasvaa saman verran 5000 syklin aikana. Kennoja ei tule pakata päällekkäin ja teräviä kulmia tulee välttää turpoamisen varalta. (6.)



Kuva 14. Pussikenno (6).

5 Akunhallintajärjestelmä

Litiumioniakkujen väärinkäyttö voi vähentää niiden käyttöikää, vahingoittaa kennoja ja aiheuttaa turvallisuusriskejä. Näiden ongelmien ratkaisemiseksi käytetään akunhallintajärjestelmää (BMS), joka varmistaa akun käytön turvallisella toiminta-alueella (SOA). Tämä on erityisen tärkeää isoilla litiumioniakuilla koska

- litiumionikennot ovat herkkiä vaurioitumaan väärinkäytöstä
- Isot akkupaketit, joissa on monta kennoa sarjassa, ovat enemmän alttiita epätasaiselle lataukselle ja purkaukselle. Litiumionikennoja ei saa ylläladata eikä -purkaa.

Акунhallintajärjestelmän tärkein tehtävä on suojata akun yksittäisiä kennoja ja lisätä käyttöikää. (8, s. 15–16.)

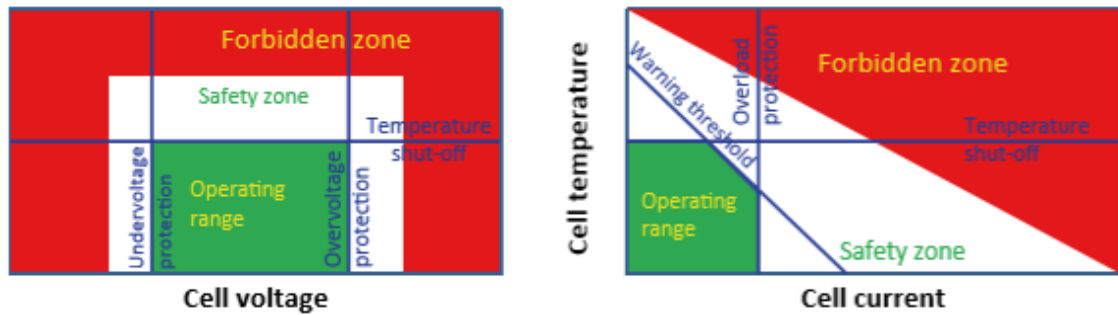
5.1 Tehtävät

Turvallisuuden ja akun kennojen pitkän eliniän takaamiseksi, litiumioniakun hallintajärjestelmän on huolehdittava vähintään seuraavista tehtävistä:

- Estää kennon jännitteen ylittymisen katkaisemalla latauksen tai pyytämällä latauksen katkaisua. Tämä on turvallisuuskysymys kaikille litiumioni kennoille.
- Estää kennon lämpötilan ylittymisen katkaisemalla virran akulle, pyytämällä virran katkaisua tai pyytämällä jäähdytystä akulle.
- Estää kennon jännitteen putoamasta alle akulle asetetun turvallisen rajan katkaisemalla purkausjännitteen tai pyytämällä purkausjännitteen katkaisun.
- Estää latauksen jännitteen ylittämisen pyytämällä jännitteen vähentämistä tai sen katkaisun.
- Estää purkausjännitteen ylittämisen pyytämällä jännitteen vähentämistä tai sen katkaisun. (8, s. 16.)

Akunhallintajärjestelmä mittaa ohjausparametreja, kennon jännitettä, lämpötilaa sekä akun virtaa (kuva 15). Tyypillisellä akun kennolla on 3,6 V:n ominaisjännite, maksimilatausjännite 4,2 V ja purkautumisen loppujännite vähintään 2,5 V. Korkea purkautuminen (< 2,5 V) aiheuttaa peruuttamattoman vahingon kuten kapasiteetin menetyksen ja lisääntyneen itsepurkautumisen. Ylijännite (> 4,2 V) voi aiheuttaa spontaanin itsesyttymisen, joka lisää turvallisuusriskiä. Kapasiteetin menetys aiheutuu yleensä latauksen aikana, kun lämpötila ja jännite nousee liian korkeaksi. Oikein käytettynä vakioakku on hyväkuntoinen noin 500–1000 sykliä, ennen kuin se menettää noin 20 % alkuperäisestä kapasiteetistaan.

Kennon jännitteen, virran ja lämpötilan tarkkailu mahdollistavat akun varaustilan (SOC) ja kunnan (SOH, *state of health*) ennustamisen. SOC vertaa akun varaustasoa suhteessa täyteen akkuun. SOH vertaa akun kuntoa suhteessa uuteen akkuun.

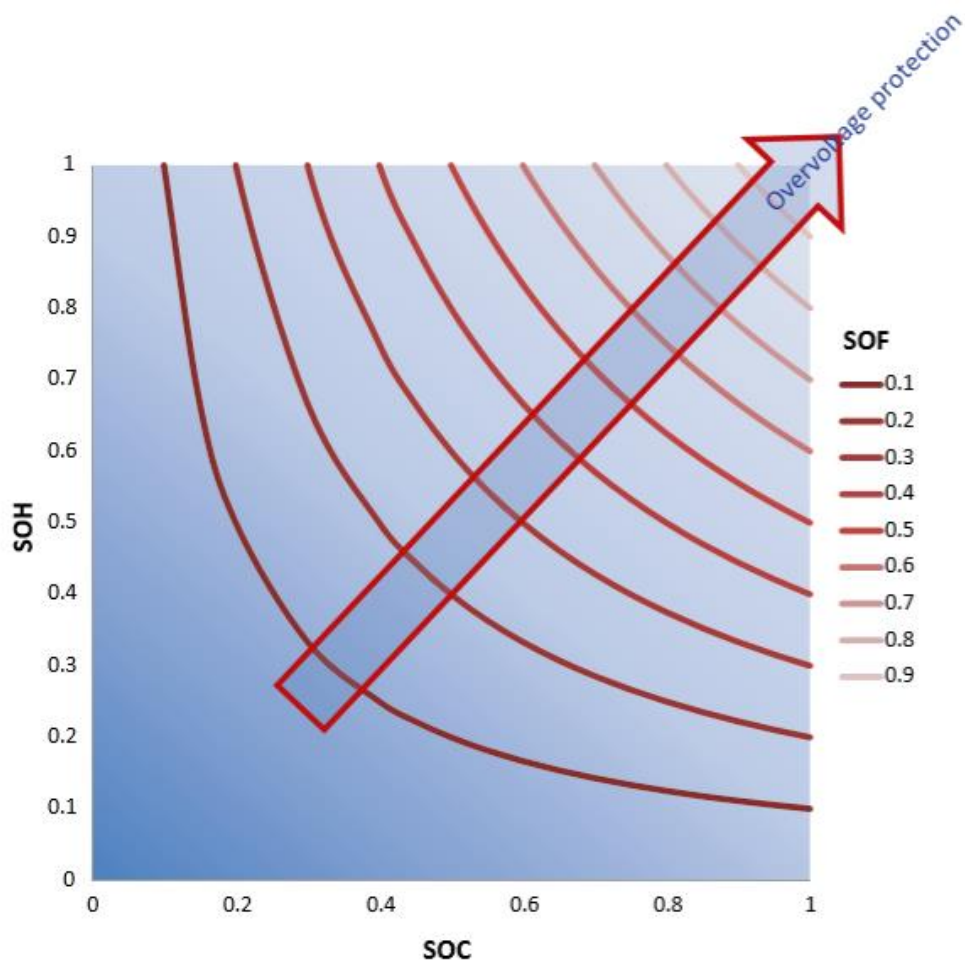


Kuva 15. Litiumioniakkukkennojen toiminta-alue (2, s. 166).

Molemmat parametrit ovat tärkeitä ajoneuvon toimintatilan (SOF) varmistamiseksi. Kuva 16 havainnollistaa näiden kahden parametrin välisen suhteen.

Tämä on tärkeää tietoa kuljettajalle: pääseekö auto perille vai täytyykö akkua ladata etukäteen. On olemassa kolme tapaa laskea nämä parametrit.

- Sähkömalli
Akkua simuloidaan analogisella sähkömallilla. Yksittäisten komponenttien parametrit mukautetaan materiaalien kapasitiivisten, induktiivisten ja puhtaasti ohmisten ominaisuuksien suhteen ottaen huomioon ikään liittyvät muutokset.
- Sähkökemiallinen malli
Tämä simulaatio pohjautuu akun kennojen kemiallisiin ominaisuuksiin sähköominaisuuksien mallintamiseksi.
- Kalman-suodatus
Tämä menetelmä estimoii akun tilaa mitattujen parametrien perusteella, joiden tulisi heijastaa akun ominaisuuksia sen hetkisiin olosuhteisiin nähden. (2, s. 166.)



Kuva 16. SOC, SOH ja SOF välinen suhde (2, s. 167).

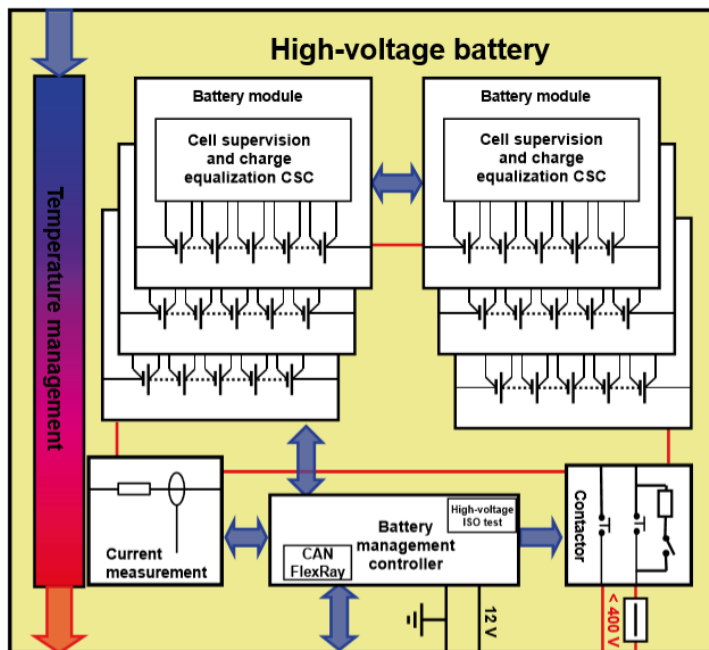
5.2 Komponentit

Tyypillisesti akkupaketit koostuvat viidestä komponentista (kuva 17):

- Tyypillisesti akkumodulit sisältävät useita pinottuja kennoja. Kennojen jännitettä ja lämpötilaa tarkkaillaan näissä moduuleissa ja nämä tiedot lähetetään ohjausyksikölle. Latauksen tasaamista ja kennojen valvontaa ohjaa useimmiten kennon valvontapiiri (CSC). Sähköautojen akut sisältävät useita moduuleja kytkettynä sarjaan, ja akuston kokonaisjännite on satoja voltteja.
- Ohjausyksikkö laskee SOC, SOH ja kontrolloi varauksentasauksen. Standardoituja ajoneuvon rajapintoja, kuten CAN-väylää tai FlexRayta

käytetään kommunikointiin ajoneuvossa ja määrittämään SOF. Rajapinta myös kontrolloi ajoneuvon latausta sähköverkosta. Tämän takia ohjausyksikön on myös valvottava akun suorituskyvyn hallintaa, ja sen on pienennettävä passiivisessa tilassa virrankulutusta minimiin.

- Kontaktori erottaa akkukennot autosta passiivisessa tilassa ylimääräisten häviöiden eristämiseksi. Se voi myös eristää akun toimintahäiriön kuten oikosulun, ylimääräisen lämpenemisen tai tapaturman aikana. Akku on myös suojattu sulakkeella oikosulun varalta.
- Virta mitataan yleensä erityisellä anturilla suoraan akussa. Kahta itsenäistä järjestelmää käytetään turvallisuussyistä. Järjestelmät käyttävät anturina mittausvastusta tai sähkömagneettista kenttää.
- Lämpötilanhallinta varmistaa, että akku toimii optimaalisissa lämpötiloissa. Tämä on erityisen tärkeää kennojen yhtäaikaisen ikääntymisen kannalta. Käyttöikä, saatavuus ja turvallisuus ovat riippuvaisia oikeasta käyttölämpötilasta. (2, s. 167-169.)



Kuva 17. BMS:n komponenttikaavio (2, s. 168).

5.3 Hallinta

Akunhallintajärjestelmä voi hallinnoida akkua kolmella tavalla: suojaamalla, balansoimalla ja lämmönhallinnalla (8, s. 58).

5.3.1 Suojaus

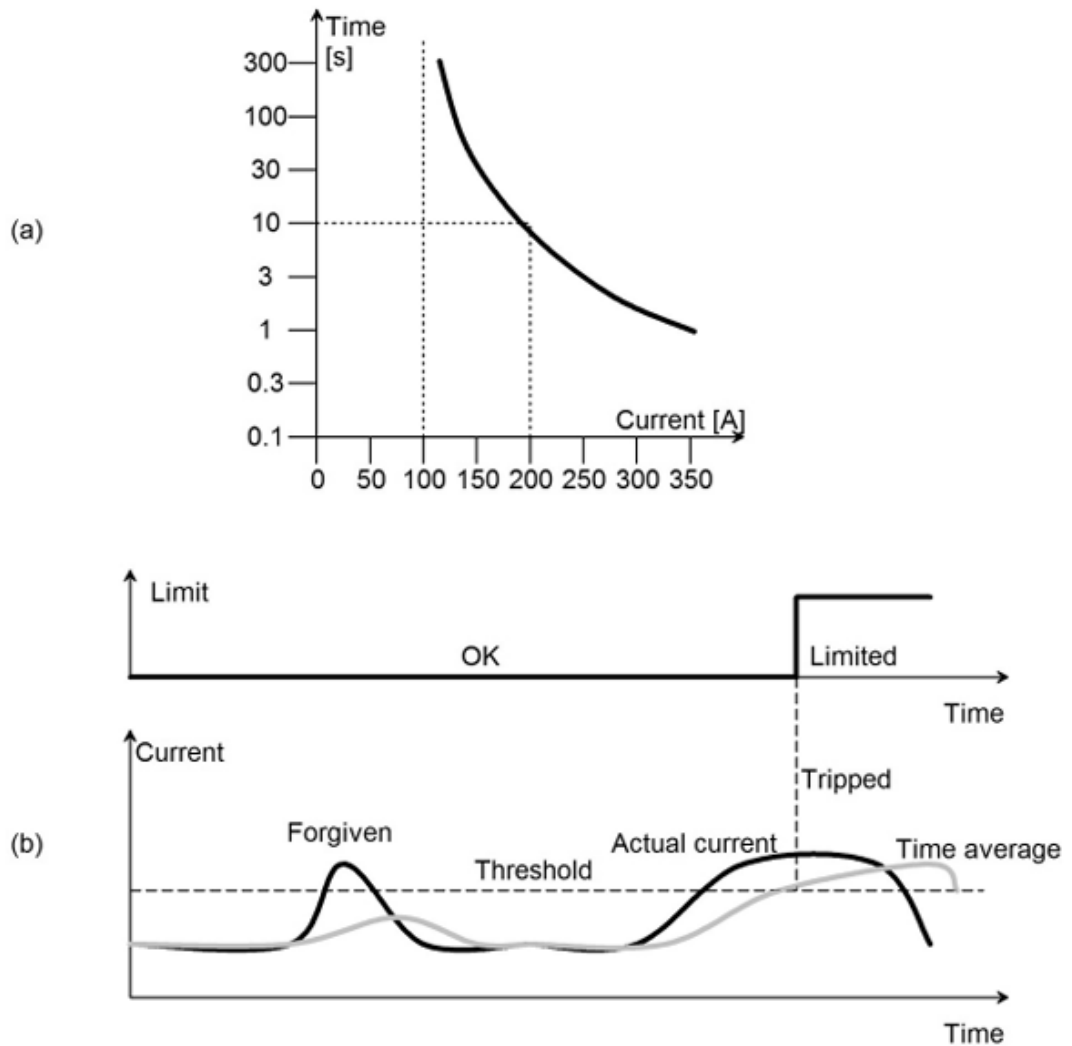
Hyvä akunhallintajärjestelmä suojaa akkupakettia estämällä sen toimintaa turvallisen toiminta-alueen ulkopuolella. Riippuen olosuhteista akunhallintajärjestelmä voi joko katkaista virran kulun tai pyytää sen vähentämistä. Akunhallintajärjestelmä tekee tämän päätöksen perustuen yhteen tai useampaan seuraavista olosuhteista:

- akkupaketin virta
- kennojännite
- kennon (tai akkupaketin) lämpötila.

Litiumionikennoilla on eri rajat maksimilatausvirralle kuin purkuvirralle, ja ne pystyvät käsittelemään korkeita huippuvirtoja lyhyen aikaa. Kennojen valmistajat määrittävät kennoille neljä eri parametria:

- jatkuva latausvirta
- huippulatausvirta
- jatkuva purkausvirta
- huippupurkausvirta.

Akunhallintajärjestelmä, joka pystyy erottamaan jatkuvan ja huippuvirran välillä, sisältää algoritmin joka integroi ylimäärisen virran huipun aikana ja määrittää, milloin virtaa tulee vähentää tai katkaista se kokonaan (kuva 18). (8, s. 58–59.)



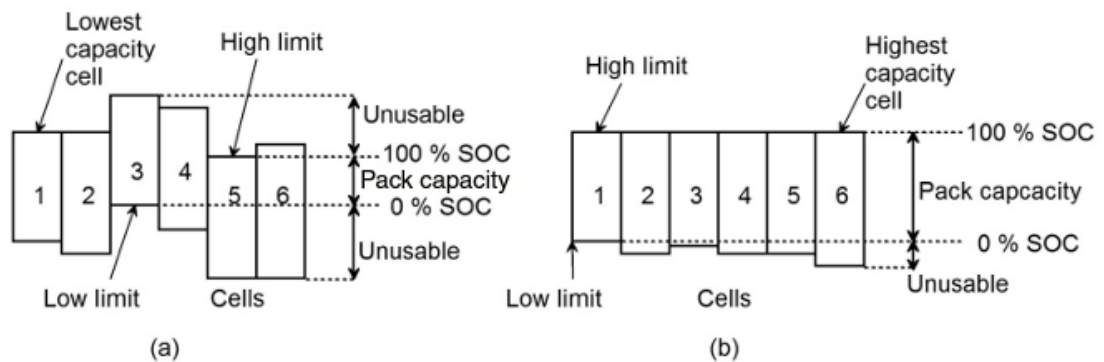
Kuva 18. Reaktio jatkuvalle ja huippuvirralle: (a) vasteaika olettaen, että 100 A jatkuva ja 200 A 10 sekunnin huippi; ja (b) viivästetyn vasteen kuvaaja nykyiselle huipulle (8, s. 59).

5.3.2 Balansointi

Balansointi on prosessi, joka tuo kaikki kennot samaan varaustasoon (kuva 19). Balansoinnin voi tehdä joko akunhallintajärjestelmä tai hajautettu laturi. Jos balansointi tehdään akunhallintajärjestelmän avulla, balansointi voi olla passiivinen (jolloin energiaa haihtuu lämpönä) tai aktiivinen (energiaa siirretään kennojen välillä). Uudelleen jakaminen menee askeleen edelle balansointia ja mahdollistaa täyden kapasiteetin käytön jokaisella kennolla.

Ilman balansointia akkupaketin sarjassa olevat kennot näyttävät täsmälleen saman virran, jolloin niiden purkautumissyvyys (DOD) muuttuu samalla nopeudella. Akunhallintajärjestelmä balansoi akun mahdollistamalla tietyn solun saamaan eri virran joka eroaa akkupaketin virrasta, jollakin seuraavista tavoista:

- poistamalla latausta täynnä olevasta kennosta, joka mahdollistaa isomman latausvirran ja täten lataa vajaita kennoja
- ohittamalla osan tai kaikki eniten latautuneet kennot ja mahdollistaa latausvirran kulun suoraan tyhjemmille kennoille
- syöttämällä latausvirtaa pelkästään vähiten ladatuille kennoille. (8, s. 64-65.)



Kuva 19. Balansointi prosessi: (a) ei balansoitu akku, (b) balansoitu akku (8, s. 64).

5.3.3 Lämmönhallinta

Litiumionikennojen toimintalämpötila-alue (esimerkiksi -20 – $+60$ °C) on laajempi kuin muissa akkukemioissa, mutta on silti huonompi kuin mitä monet sovellukset vaativat (esimerkiksi autoympäristö: -40 – $+85$ °C). Siksi jotkut sovellukset vaativat lämmönhallinnan akkupaketeissa. Akunhallintajärjestelmä voi ohjata akkupaketin lämpötilaa käyttäen lämmitystä ja jäädytystä.

Litiumioniakkujen suorituskykyyn vaikuttaa suuresti lämpötila. Litiumioniakut eivät toimi hyvin liian kylmässä tai liian kuumassa lämpötilassa, joka voi aiheuttaa vahinkoa akun kennoille.

Kun akun lämpötila on tiedossa, akunhallintajärjestelmä voi ohjata lämmitintä, joka pitää akun lämpötilan minimitoimintalämpötilan yläpuolella. Yleensä tämä tehdään vain silloin, kun akkua ladataan sähköverkosta (esimerkiksi kun ajoneuvo on latautumassa). (8, s. 58–59.)

Samalla tavoin akunhallintajärjestelmä havaitsee akun korkean lämpötilan, jolloin akkua täytyy jäädyttää. Tämä on erityisen tärkeää ajoneuvoissa, jotka käyttävät suuria litiumioniakustoja. Ajoneuvon latautuessa, joko verkkovirrasta tai regeneratiivisesta jarrutuksesta tai sen käyttämästä virrasta voimansiirrolle ja varusteille energiaa kulkee akkupaketin läpi. Tämä virran kulku aiheuttaa lämpenemistä akkupaketin kennoilla.

On olemassa kolme yleistä lämpötilanhallintamenetelmää:

- konvektio ilmaan joko passiivisesti tai pakotetusti
- upottamalla akku dielektriseen öljyyn, joka pumpataan sitten lämmönvaihdiväijärjestelmään
- kierrättämällä vesipohjaista jäähdysnestettä akkurakenteen jäähdytiskanavien kautta. (9; 10.)

6 Turvallisuus

Litiumioniakkujen suuren ominaiskapasiteetin ja syklisen iän seurauksena akkuja käytetään paljon sähköautoissa, kannettavissa elektronisissa laitteissa, sähkötyökaluissa sekä lääketieteellisissä laitteissa. Tällöin tulee myös ottaa huomioon akkujen turvallisuus. Akkujen turvallisuuden takaamiseksi käytetään akkujen sisäisiä ja ulkoisia mekanismeja. Ulkoinen suojaus perustuu elektronisiin laitteisiin, kuten lämpötilantureihin ja paineventtiileihin, jotka lisäävät akun painoa tai tilavuutta ja ovat epäluotettavia lämmön tai paineen väärinkäyttöolosuhteissa. Sisäiset suojausten perustuvat turvallisiin materiaaleihin akun komponenteissa.

Litiumioniakun elektrolyytti on itsessään syttyvää. Lämpöryntäys on yksi vaarallisimmista tapahtumista, jota pidetään tärkeimpänä huolenaiheena liittyen akkujen turvallisuuteen (kuva 20). Lämpöryntäys tapahtuu yleensä, kun eksotermiinen reaktio karkaa hallinnasta. Akun lämpötilan noustessa yli 80 °C:seen, eksotermiinen kemiallinen reaktio kiihtyy ja

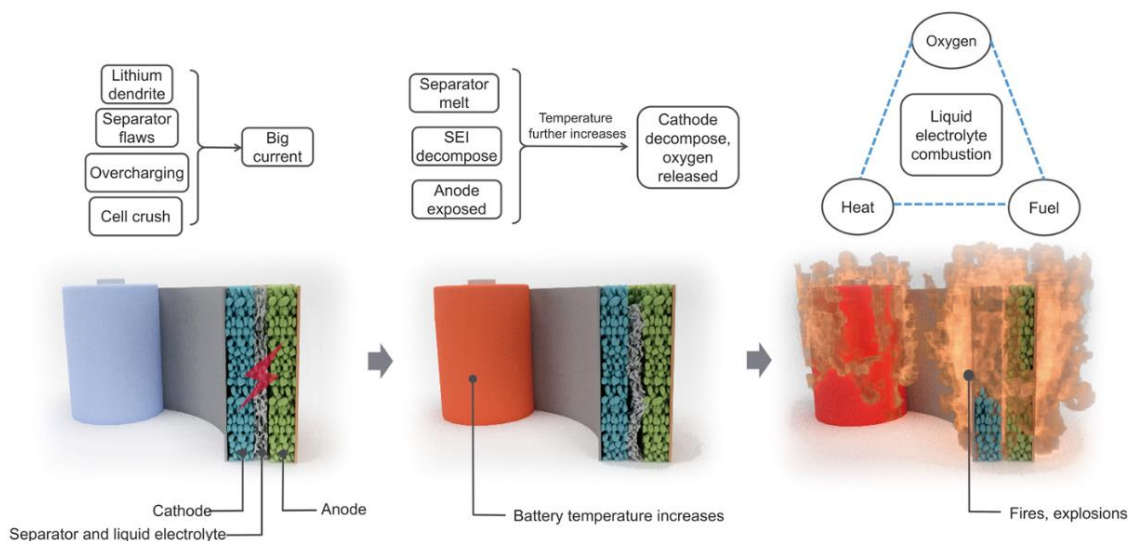
lämmittää kennoa entisestään. Jatkuvasti kasvava lämpötila voi johtaa tulipaloon ja räjähdykseen varsinkin suuremmissa akkupaketeissa.

Lämpöryntäys alkaa akun lämpenemisestä. Alustava lämpeneminen voi johtua ylilataamisesta, altistumisesta liialliselle lämmölle, ulkoisesta oikosulusta viallisessa johtosarjassa tai sisäisestä oikosulusta viallisessa kennossa. Näistä syistä yleisin on sisäinen oikosulku. Sisäinen oikosulku voi tapahtua kennojen murskautuessa, kuten ulkoisen metalliosan läpäisy ajoneuvon törmäystilanteessa, litiumdendriitin muodostuessa korkeassa latausjännitteessä, ylilatauksessa tai matalassa lämpötilassa tai valmistuksen aikana asennetun viallisen separaattorin takia.

Lämpöryntäyksen vaiheessa 1 kaikki yllä mainitut viat aiheuttavat akun ylikuumentumisen. Kun akun sisäinen lämpötila alkaa kasvaa, vaihe 1 päättyy ja vaihe 2 alkaa.

Vaiheessa 2 akun sisäinen lämpötila kasvaa nopeasti. Solid electrolyte interphase (SEI) hajoaa ylikuumentumisen tai lävistyksen seurauksena. SEI-kerros koostuu pääosin stabiileista ja metastabiileista komponenteista. Metastabiilit komponentit voivat hajota eksotermisesti noin 90 °C:ssa vapauttaen syttyviä kaasuja ja happea. SEI:n hajotessa lämpötila kasvaa ja litiummetalli tai interkaloitunut litium anodissa reagoi elektrolyytin kanssa vapauttaen syttyviä hiilivetykaasuja. Lämpötilan noustessa noin 130 °C:seen separaattori alkaa sulaa, mikä aiheuttaa oikosulun katodin ja anodin välille. Lopulta lämpötilan seurauksena litium-metalli-oksidikatodimateriaali hajoaa vapauttaen happea. Katodin hajoaminen on erittäin eksoterminen reaktio, joka lisää lämpötilan ja paineen nousua täten nopeuttaen reaktiota. Lämpöryntäys siirtyy vaiheeseen 3 heti, kun reaktio on saavuttanut tarpeeksi happea ja lämpöä palamista varten.

Vaiheessa 3 palaminen alkaa. Vaiheen 2 vapauttama happi ja lämpö tarjoavat vaadittavat ehdot elektrolyytin syttymiselle täten aiheuttaen tulen ja räjähdysvaaran.



Kuva 20. Lämpöryntäyksen kolme vaihetta (11).

Näitä turvallisuusriskejä voidaan vähentää käyttämällä erilaisia materiaaleja akkujen valmistuksessa. Separattorin terminen stabiilisuus on iso osa litiumioniakkujen turvallisuutta. Korkean sulamispisteen omaava separaattori vähentää oikosulun riskiä suuresti, mutta kuitenkin näiden materiaalien mekaaniset ominaisuudet eivät ole vielä tarvittavalla tasolla käytettäväksi litiumioniakuissa. Kiinteä elektrolyytti vähentäisi myös sisäisen oikosulun riskiä suuresti. Kuitenkin materiaalien valinnassa tulee ottaa aina huomioon kustannukset, saatavuus sekä suorituskyky. Akkuvalmistajat tasapainottelevat näiden välillä saavuttaakseen parhaan mahdollisen lopputuloksen. (11.)

7 Tulevaisuuden näkymiä

Litiumioniakkujen suurimmat markkinat ovat perinteisesti olleet kannettavat elektroniset laitteet, mutta litiumioniakkujen kysyntä kasvaa kovaa vauhtia myös liikennekäytössä. Sähköautot alkavat pikkuhiljaa vastaamaan tavanomaisia autoja hinnan ja toimintamatkan suhteen, ja käytännössä kaikki sähköautovalmistajat käyttävät voimansiirrossa litiumioniakkuja. Nykypäivänä sähköautoilla voidaan päästä jopa yli 500 km yhdellä latauksella. Energiatiheyden parantumisen myötä auton autonomia kasvaa, mikä tekee sähköautoista entistä kannattavampia. Autonomian kasvaessa autoilija ei ole

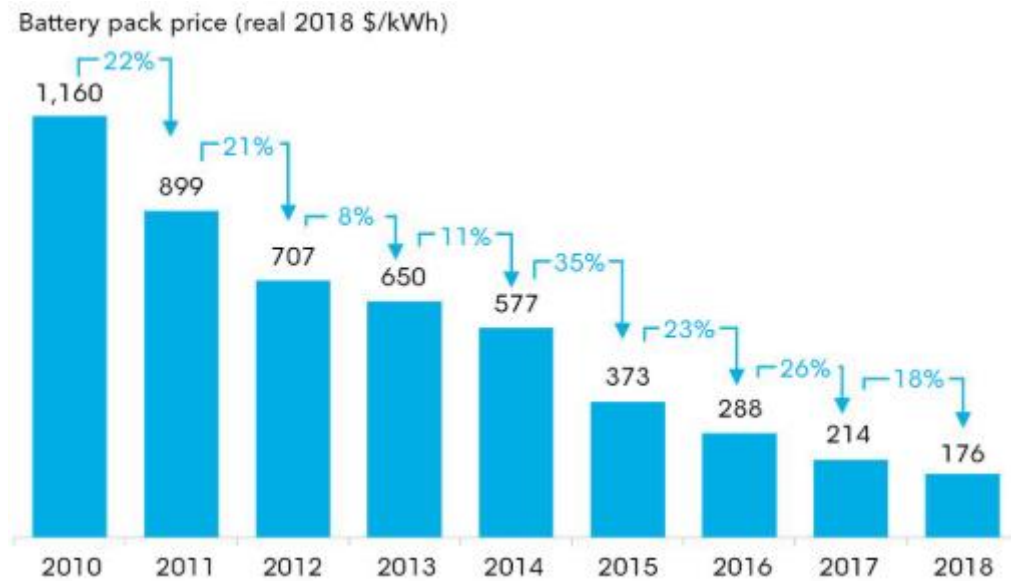
enää niin riippuvainen tiheästä latausverkostosta, mikä kannustaa siirtymisen sähköautoihin.

Akkujen nopea lataus on myös tärkeä tekijä. Sähkö- ja hybridautojen yleistymisen myötä akkujen latausaika on saatava mahdollisimman lyhyeksi. Verrattuna perinteiseen ajoneuvoon sähköauton lataus vie huomattavasti pidemmän ajan. Akkujen lataukselle on tehty kokeita, joilla on saavutettu litiumioniakun lataus 80 %:n varaukseen 10 minuutissa ilman akun vaurioitumista.

Litiumioniakkujen käyttö ylettyy myös ilmailualan sovelluksiin, niin droneihin kuin satelliitteihin. Israelilainen yritys Eviation työskentelee prototyyppisähkölma-aluksen parissa, joka pystyy kantamaan yhdeksän matkustajaa 1000 km:n päähän 3000 m:n korkeudessa nopeudella 440 km/h.

Litiumioniakut ovat myös yksi ilmastonmuutoksen torjuntatyökalu. Litiumioniakkujen avulla pystytään käyttämään uusiutuvaa energiaa niin autoissa kuin omakotitaloissakin. Uusiutuva energia on kuitenkin riippuvainen ympäristötekijöistä. On kuitenkin vielä kehitteillä, kuinka saataisiin kustannus tehokas ratkaisu korvaamaan fossiilisia voimalaitoksia. (12.)

Akkujen tuotanto uusissa tehtaissa Kiinassa, Yhdysvalloissa, Thaimaassa ja muualla on laskenut hintoja huomattavasti. Litiumioniakkujen hinta on laskenut 85 % vuodesta 2010 vuoteen 2018 (kuva 21). Jos tämä trendi jatkuu, on mahdollista, että tulevaisuuden sähköverkkoa tuetaan litiumioniakkuihin perustuvilla energian varastointijärjestelmillä. (13.)



Kuva 21. Litiumioniakkujen hinta \$/kWh eri vuosina (13).

Vuoden 2030 jälkeen käytetyistä litiumioniakuista voi tulla merkityksellinen markkinakomponentti. Käytetyt sähköautojen akut voidaan mahdollisesti uusiokäyttää energian säilömiseen. Kun sähköauton akun kapasiteetti putoaa alle 80 % ominaiskapasiteetistaan, akkuja pidetään vanhentuneena. Kuitenkin akkuja voidaan uudelleenkäyttää kiinteinä energiavarastoina. Tästä voi tulla merkittävä tekijä vuoden 2030 jälkeen, kun pois tieliikenteestä siirtyneiden sähköautojen määrä kasvaa huomattavasti. (14.)

Lähteet

1. Liikennekäytössä olevat sähköautot. 2020. Verkkoaineisto. aut.fi. <http://www.aut.fi/tilastot/autokannan_kehitys/sahkoautojen_maaran_kehitys>. Luettu 7.4.2020.
2. Korthauer, Reiner. 2018. Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications. E-kirja. Springer Berlin Heidelberg.
3. BU-002: Introduction. 2019. Verkkoaineisto. <Batteryuniversity.com https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_002_introduction>. Luettu 7.4.2020.
4. Warner, John T. 2019. Lithium-Ion Battery Chemistries A Primer. E-kirja. Elsevier.
5. BU-205: Types of lithium-ion. 2019. Verkkoaineisto. Batteryuniversity.com. <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion>. Luettu 26.3.2020.
6. BU-301a: Types of Battery Cells. 2019. Verkkoaineisto. Batteryuniversity.com. <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells>. Luettu 2.4.2020.
7. Pistoia, Gianfranco. 2014. Lithium-Ion Batteries Advances and Applications. E-kirja. Elsevier.
8. Andrea, Davide. 2010. Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs. E-kirja. Artech House.
9. Maughan, Ryan. 2017. What is the best electric vehicle battery cooling system?. Verkkomateriaali. Avidtp.com. <<https://avidtp.com/what-is-the-best-cooling-system-for-electric-vehicle-battery-packs/>>. Luettu 9.4.2020.
10. Adair, Desmond; Ismailov, Kairat & Bakenov, Zhumabay. Thermal Management of Lithium-ion Battery Packs. Verkkomateriaali. Comsol.com.

<https://www.comsol.com/paper/download/200515/adair_presentation.pdf>.

Luettu 13.4.2020.

11. Liu, Kai; Liu, Yayuan; Lin, Dingchang; Pei, Allen & Cui, Yi. 2018. Materials for lithium-ion battery safety. Verkkomateriaali. [Advances.sciencemag.org](https://advances.sciencemag.org) <<https://advances.sciencemag.org/content/4/6/eaas9820>>. Luettu 13.4.2020.
12. Puiu, Tibi. 2020. The future is bright for lithium-ion batteries. <<https://www.lindau-nobel.org/blog-the-future-is-bright-for-lithium-ion-batteries/>>. Luettu 14.4.2020.
13. Goldie-Scot, Logan. 2019. A Behind the Scenes take on Lithium-ion Battery Prices. Verkkomateriaali. [About.bnef.com](https://about.bnef.com). <<https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>>. Luettu 15.4.2020.
14. Zubi, Ghassan; Dufo-Lopez, Rodolfo; Garvalho, Monica & Pasaoglu, Guzay. 2018. Verkkomateriaali. [Sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com) <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300728#s0025>> . Luettu 16.4.2020.