



Litium-akustojen jännitteen tasauspiirit ja turvallisuuskomponentit
Lithium-cell voltage balancing and safety equipment

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

Kasper Saarinen

Tarkastaja: Professori Pertti Kauranen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Kasper Saarinen

Litium-akustojen jännitteen tasauspiirit ja turvallisuuskomponentit

2022

Kandidaatintyö.

48 sivua, 20 kuvaa.

Tarkastaja: Professori Pertti Kauranen

Suurissa litium-akustoissa on satoja tai jopa tuhansia sarjaan ja rinnan kytkettyjä akkukennoja. Jos virta jakautuu epätasaisesti, parhaat kennot ylilatautuvat ja huonoimmat kennot tyhjenevät ennen muita. Molemmissa tapauksissa kennot voivat vaurioitua, minkä takia akustoissa käytetään joko passiivisia tai aktiivisia elektronisia komponentteja, suojaamaan kennoja epätoivotuilta olosuhteilta (passiivinen tasaus) tai siirtämään varausta hyvistä kennoista huonoihin (aktiivinen tasaus).

Akkukennon väärinkäyttö tai ikääntyminen voi aiheuttaa akun kuumenemisen, elektrolyytin kiehumisen ja jopa räjähtämisen. Akuston turvallisuuden varmistamiseksi akkukennoihin on suunniteltu turvallisuutta parantavia rakenteita, minkä lisäksi niiden jännitettä ja lämpötilaa valvotaan ulkoisesti elektroniikan avulla (BMS: battery management system). Lisäksi isoissa akustoissa pyritään estämään se, ettei yksi viallinen kenno ylikuumentuessaan aiheuttaisi viereisten kennojen ja koko akuston kuumenemistä ketjureaktiona.

Työssä tehdään kirjallisuuskatsaus litium-akustojen tasauspiireihin ja turvallisuusratkaisuihin sekä niiden toimintaperiaatteisiin.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Kasper Saarinen

Lithium-cell voltage balancing and safety equipment

2022

Bachelor's Thesis

48 pages, 20 pictures.

Examiner: Professor Pertti Kauranen

Large lithium batteries have hundreds or even thousands of battery cells connected in series and parallel. If the current is distributed unevenly, the best cells will overcharge and the worst cells will discharge before the others. In both cases, the cells can be damaged, which is why either passive or active electronic components are used in batteries, to protect the cells from unwanted conditions (passive balancing) or to transfer the charge from good cells to bad ones (active balancing).

Battery cell abuse or aging can cause the battery to heat up, boil the electrolyte and even explode. To ensure the safety of the battery, safety-enhancing structures have been designed into the battery cells, in addition to which their voltage and temperature are monitored externally with the help of electronics (BMS: battery management system). In addition, in large batteries, the aim is to prevent one defective cell from overheating causing adjacent cells and the entire battery to heat up as a chain reaction.

In the work, a literature review is made of lithium battery equalization circuits and safety solutions, as well as their operating principles.

Sisällysluettelo

1	Johdanto	8
1.1	Tausta	8
1.2	Tavoite	8
1.3	Rajaus	9
1.4	Tutkimuksen rakenne	9
1.5	Tutkimusmenetelmät	9
2	Litium-akustot	10
2.1	Terminologiaa	10
2.2	Rakenne	11
2.3	Toimintaperiaate	12
2.4	Akustotyypit	13
2.4.1	Sylinteri	14
2.4.2	Pussi	15
2.4.3	Prismaattinen/särmikäs	16
2.4.4	Muut mallit	16
2.5	Akuston kemiaa	17
3	Tasauspiirit	20
3.1	Tarkoitus	20
3.2	Tasauspiirien toimintaperiaate	23
3.3	Passiivinen tasaus	24
3.3.1	Fixed shunt resistor	25
3.3.2	Switching shunt resistor	25
3.4	Aktiivinen tasaus	26
3.4.1	Lentävä kondensaattori	26
3.4.2	Induktiivinen tasaus	27
3.4.3	Muuntajilla tasaus	28
3.5	Tasaus rinnan	29
3.6	Muita tapoja	29

3.7	Ongelmia	29
4	Turvallisuusratkaisut	31
4.1	Syitä miksi turvallisuuskomponentteja tarvitaan	32
4.2	Sisäiset turvallisuuskomponentit	34
4.2.1	Erotin	34
4.2.2	PTC-termistori	34
4.2.3	Ylipaineventtiili	35
4.2.4	CID	35
4.3	Ulkoiset turvallisuuskomponentit	35
4.3.1	PCM eli Protection circuit module	35
4.3.2	BMS eli Battery management system	36
4.3.3	Lämpömittari	37
4.3.4	Lämpötilan hallintalaitteet	37
4.3.5	Transistorit	38
4.3.6	Kytkin/rele	38
4.3.7	Sulake	38
4.3.8	Diodit	39
4.3.9	Esivarauspiiri	39
4.3.10	Kotelo	40
4.3.11	Muita asiota	41
4.4	Testausmenetelmät	41
4.4.1	Puristustesti	42
4.4.2	Iskutesti	42
4.4.3	Shokkitesti	42
4.4.4	Ulkopuolinen oikosulkutesti	42
4.4.5	Naulalla lävitystesti	42
5	Johtopäätökset	44

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

Lyhenteet

ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene

BMS Battery Management System

CID Current Interrupt Device

DoD Depth of Discharge

EV Electric Vehicle

HDPE High Density Polyethylene

ID Identifier

Li-ion Litiumioni

MOSFET Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor

PCB Protection Circuit Board

PCM Protection Circuit Module

PE Polyeteeni

PP Polypropeeni

PTC Positive Temperature Coefficient

SoC State of Charge

SoH State of Health

Fysiikan vakiot

Ah Ampeeritunti

I Virta[A]

kPa Kilopascal

$m\Omega$ Milliohmi

U Jännite[V]

1 Johdanto

Johdannossa käydään läpi työhön liittyvää taustaa, sekä syitä miksi litiumioniakkuja käytetään. Sen jälkeen käsitellään työn tavoitetta, rajataan työn laajuus, käydään läpi tutkimuksen rakennetta, sekä menetelmät joilla tutkimus on tehty.

1.1 Tausta

Litiumioni akkujen suosio on kasvanut viime vuosina. Tähän on vaikuttanut niiden paremmat ominaisuudet muihin akkuihin nähden. Litiumioniakut latautuvat nopeasti, kestävät kauemmin ja omaavat korkean tehotiheyden.

Litiumioniakkujen kehitys on ollut hyvin nopeaa viimeisen vuosikymmenen aikana useista syistä johtuen. Yksi keskeisimmistä syistä on lainsäädännöllä ohjattu autokannan sähköistyminen. Autotehtaiden investoiminen sähköautojen tuotekehitykseen on tuottanut paljon uusia ratkaisuja markkinoille. Suomessa myytyjen uusien sähköautojen osuus oli 2021 jo 24.2% (Autotie 2022).

Toinen merkittävä tekijä on ollut kannettavien älylaitteiden kehitys ja tekniikan implementointi yhä useampiin laitteisiin. Kuluttajien vaatimukset antavat painetta akkuteknologian kehitykseen.

Litiumioniakustojen kanssa on aina ollut ongelmia. Tiivis pakkaustapa tekee akustoista oikosulun tapahtuessa räjähteen. Litiumin kemialliset reaktiot mahdollistavat paineen kerääntymisen kotelon sisään. Kehitystyön tarkoituksena on ollut minimoida akustojen sekä palamis- että räjähtämisriskiä. Yksi viimeisistä onnettomuuksista on vuodelta 2022, jossa mies kuoli pudotessaan ikkunasta paetessaan palavaa sähköpolkupyörän akkua (CBC 2022).

1.2 Tavoite

Tässä työssä on tavoitteena selvittää litiumioniakustojen jännitteentasauspiirien toimintaperiaatteet ja tehdä niistä tiivistelmä, josta lukija saa tarkan käsityksen mistä on kyse. Työssä käydään läpi olennaiset turvallisuuskomponentit ja niiden toimintaperiaatteet. Tarkoituksena on tehdä kokoelma, johon sähköalan opiskelija voi tukeutua, kun hän etsii tietoa litiumioniakuista.

1.3 Rajaus

Työstä rajataan pois eri kemioiden vaikutukset akkuhin. Työ keskittyy tasauspiireihin ja turvallisuuskomponentteihin. Kemiaan viitataan ainoastaan, jotta lukija ymmärtää litiumioniakkujen keskinäiset erot.

Tasauspiireissä on keskitytty niiden toimintaan ja rajattu sovelluskohteet työn ulkopuolelle.

Turvallisuuskomponenteissa käydään läpi keskeisimmät komponentit ja keskitytään niiden toimintaperiaatteisiin. Käyttökohteet on rajattu työn ulkopuolelle. Turvallisuudessa myös sivutaan hieman akkujen testausmenetelmiä sekä niihin liittyviä standardeja.

1.4 Tutkimuksen rakenne

Toisessa luvussa käydään läpi miten litiumioniakustot rakentuvat ja niiden keskeiset erot.

Kolmannessa luvussa syvennytään tasauspiireihin ja niiden merkitykseen akuston käytön kannalta. Luvussa käydään läpi eri jännitteentasaukseen liittyviä menetelmiä ja niiden toimintaperiaatteita.

Neljännessä luvussa käydään läpi turvallisuusratkaisuja, niissä hyödynnettyjä komponentteja sekä testausmenetelmiä.

Viidennessä luvussa käydään läpi johtopäätöksiä ja tulevaisuudennäkymiä.

1.5 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus toteutetaan kirjallisuustutkimuksena. Lähteinä toimivat useat luotettavat aiheesta kirjoitetut kirjat ja tieteelliset julkaisut. Turvallisuusasioissa viitataan IEC ja UL standardeihin.

2 Litium-akustot

Aloitetaan sillä mikä on litiumakku, miten se on kasattu ja millaista termistöä näiden akkujen kanssa tulee käyttää. Akkuja on hyvin monia erityyppisiä ja välillä ne voivat mennä sekaisin paristojen kanssa. Ne on myös helppo sekoittaa keskenään, joten tämän luvun tarkoituksena on antaa lukijalle pohjatiedot kemiallisista yhdisteistä ja rakenteista myöhempiä kappaleita varten.

2.1 Terminologiaa

Alla on listattuna keskeisiä englanninkielisiä termejä, joita esiintyy hyvin paljon litiumioni ja muista akuista puhuttaessa. Jatkossa myös Litiumionista käytetään lyhennettä Li-ion.

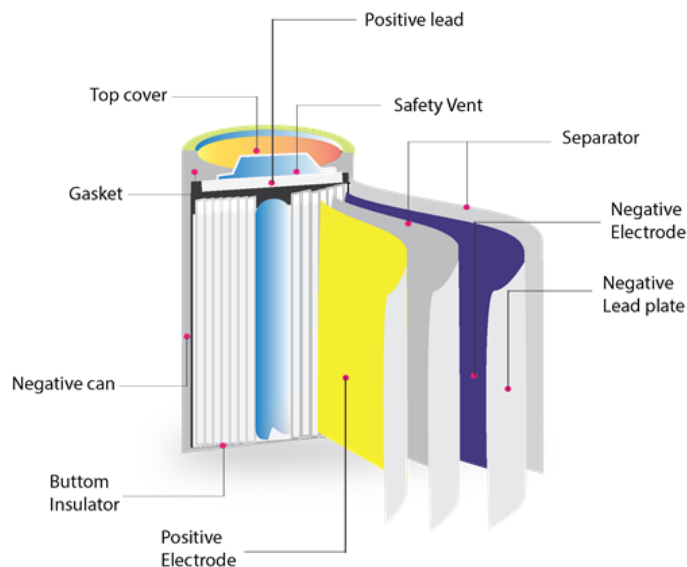
- Akkukenno [Cell] eli yksittäinen akun moduuli ilman mitään lisälaitteita.
- Akku [Battery] yksittäinen akkukenno, joka on varustettu PCM:llä (Protection Circuit Module) tai useampi kenno varustettuna BMS:llä (Battery Management System).
- Akusto, sisältää useita akkuja.
- C-rate, mittaa kuinka nopeasti akku tyhjenee sen kokoon nähden. 1C vastaa sitä, että esim. 100 Ah akku tyhjenee tyhjäksi 1 tunnissa 100 A virralla. Vastaavasti 2C tarkoittaa, että akku tyhjenee tyhjäksi puolessa tunnissa 200 A virralla (Team 2008).
- BMS, Battery Management System. Laitteisto jolla vahditaan ja kontrolloidaan akkua. Tästä lisää myöhemmin.
- PCM, Protection Circuit Module. Laitteisto jolla suojataan akkua yli- tai alivaraukselta.
- SoC, State of Charge eli varauksen taso, tällä mitataan akussa olevaa varauksen tasoa prosentteina 100% ollessa täysi ja 0% ollessa tyhjä.

- DoD, Depth of Discharge [%] eli purkauksen taso, kertoo montako prosenttia varauksesta on käytetty suhteessa täyteen kapasiteettiin. 0% kuvaa täyttä akkua ja 100% on tyhjä, eli SoC:n vastakohta.
- SoH, State of Health [%] kuvaa paljon täydessä akussa on kapasiteettia uuteen akkuun verrattuna.

2.2 Rakenne

Akku voi koostua yhdestä tai useammasta akkukennosta. Käytettäessä yksittäistä Li-ion-akkukennoa on niihin implementoitava PCM mukaan, jotta akkua voidaan turvallisuu- den vuoksi hallita jollain tavalla. Useammasta kennosta kasattu akku vaatii vuo- rostaan BCM:n. Sylinterimallisissa akuissa elektrodit ja niiden välissä oleva erotin on kieputettu rullalle ja pakattu eristeiseen suojakuoren sisään.

- Erotin [Separator] tarkoitus on eristää elektrodit toisistaan, kuva 1. Sen kuu- luu myös johtaa litiumionit elektrodista toiseen mahdollisimman vaivattomasti. Erotin toimii myös turvallisuuskomponenttina ja siitä lisää kohdassa 4.2.1.
- Anodi, negatiivinen elektrodi.
- Katodi, positiivinen elektrodi.
- Elektrolyytti, kuljettaa litium ioneja elektrodilta toiselle. Li-ion-akkujen tapauk- sessa kyseessä on litiumsuolaa orgaanisessa liuottimessa.
- Suojakuori on tarkoitettu pitämään kenno kasassa, suojaamaan sitä ulkopuolisilta tekijöiltä ja estämään oikosulut.
- Ylivuotoventtiili [Safety vent], mikäli akuston sisäpuolelle kertyy painetta ke- miallisen reaktion seurauksena, pääsee paine ylivuotoventtiiliin kautta turvallisest- ti poistumaan, aiheuttamatta räjähdysvaaraa. Ylivuotoventtiili sijaitsee kennon toisessa päässä.
- Eristeen [Insulator] tarkoitus on eristää virralliset osat kuoresta, jotta siitä ei tulisi johtava osa (Deng 2015).



Kuva 1: Sylinterin mallisen Li-ion-akun rakenne (Techsciresearch 2018)

2.3 Toimintaperiaate
















Li-ion-akku koostuu positiivisesta(katodi) ja negatiivisesta(anodi) navasta eli elektrodista. Näiden välissä on erotin mikä mahdollistaa litiumionien liikkumisen elektrolyytin avulla elektrodien välillä. Tämä litiumioninen liike syntyy kemiallisten reaktion aiheuttamana ja luo sähkövirran akun napojen välille. Erotin on todella ohut kerros huokoista polymeeriä kuten polyeteeniä (PE) tai polypropeenaa (PP). Sen tehtävänä on eristää elektrodit toisistaan oikosulun välttämiseksi. Erottimen huokoisuus mahdollistaa elektrolyytin imeytymisen siihen, sekä litiumionien liikkeen sen läpi.

Elektrolyytti koostuu usein ei vesiperäisestä orgaanisesta liuottimesta, joka sisältää litiumsuolaa eli litiumheksafluoria (LiPF_6), yleisimpien elektrolyyttien ollessa etyleenikarbonaatti (EC), dietyleenikarbonaatti (DEC), dimetyleenikarbonaatti (DMC) (Weicker 2014).

Li-ion-akuissa litium ei esiinny sen metallisessa olomuodossa vaan se on interkalaatiossa jommankumman elektrodin materiaalin kanssa. Interkalaatiolla tarkoitetaan ionin lomittumista isäntämolekyylin väliin ilman kovalenttista sidosta. Tämä lisää käyttöturvallisuutta sekä sen käyttöikä.

2.4 Akustotyypit

Li-ion-akkuja esiintyy markkinoilla useissa eri topologioissa ja kuvassa 2 on kuvattu yleisimmät mallit sekä niiden pääpiirteet. Samasta kuvasta myös näkee kemiallisten yhdisteiden ja nimellisjännitteen suhteen, näistä lisää kohdassa 2.5. Yleisimpiä malleja ovat: sylinteri, pussi ja prismaattinen. Näillä on keskenään hyvin paljon eroja mutta toimintaperiaatteet ovat samat. Seuraavissa kohdissa syvennytään enemmän näihin malleihin.

		FORMAT					NOMINAL VOLTAGE
		Small cylindrical	Pouch	Small prismatic	Large prismatic	Large cylindrical	
CHEMISTRY	Titanate (LTO)	 YJ Power	 Altair nano	 Toshiba	 TWE	 YingLong	2.5
	LiFePO ₄ (LFP, nano-phosphate, iron-phosphate)	 K2	 A123	 Calb	 Thundersky	 Lifebatt	3.2
	LiCoO ₂ (LCO) LiMn ₂ (LMO) LiNiCoO ₂ (NMC) LiNiCoAlO ₂ (NCA)	 LG	 XALT Energy	 GMB Power	 Yusasa	 Gaia	3.6, 3.7

Kuva 2: Li-ion-akkuja (Andrea 2020)

2.4.1 Sylinteri



Kuva 3: Sylinterin muotoinen 18650 Li-ion-akku (Spakfun 2022).

Sylinterin muotoinen akku, jonka johdinpinnat ovat molemmissa päissä, muistuttaa hyvin paljon tavallista sormiparistoa, kuva 3.

Yleisin standardoitu malli on 18650 joka tarkoittaa sitä, että sen halkaisija on 18mm ja se on 65mm korkea. Akun nimellisjännite on tyypillisesti 3.7V ja kapasiteetti 1800-3400mAh välillä. Vastaavasti toinen yleinen malli on 26650, joka vuorostaan on halkaisijaltaan 26mm sekä korkeus 65mm. Sen kapasiteetti riittää aina yli 5Ah asti. Sähköautovalmistaja Tesla hyödyntää Model S ja Model X sähköautoissa (EV eli Electric Vehicle) 18650 kokoisia akkuja (Kane 2022).

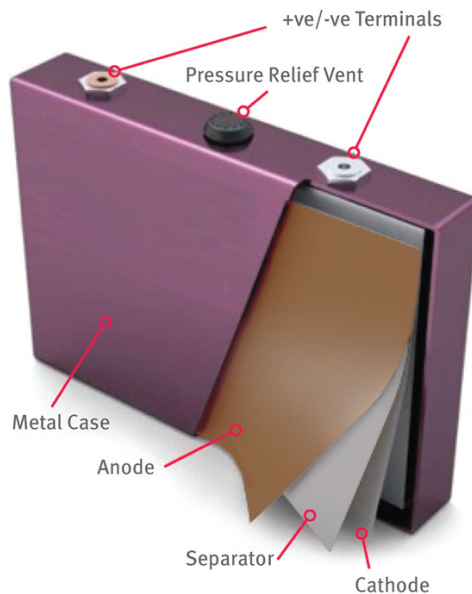
2.4.2 Pussi



Kuva 4: LiFePO₄ A123 20 Ah akkupussi (BatteryUniversity 2022*c*)

Pussimallinen akku rakentuu kahden ulkoreunoilta saumatun muovikalvon väliin, kalvojen väliin jää tällöin ohuista anodista, erottimesta ja katodista koostuva kerros. Tällä tavalla saadaan hyvin litteä rakenne, jota voidaan helposti pinota päällekkäin tai asettaa jonkin rakenteen sisään. Kuten kuvassa 4, pussin reunasta työntyy ulos metalliset elektrodit liitääntää varten, positiivisen navan ollessa alumiinia ja negatiivisen navan kuparia tai nikkeliä.

2.4.3 Prismaattinen/särmikäs



Kuva 5: Prismaattinen Li-ion-akku (Matthias Zschornak 2018)

Tämän tyyppisissä ratkaisuisa akku on sijoitettu laserilla umpeen hitsatun kotelon sisään, kuva 5. Tällä tavalla valmistettu akku vie paljon vähemmän tilaa, kun sen seinien väliin ei jää tyhjää tilaa esim. verrattuna sylinterinmuotoisiin, joiden täyttöaste on 90% luokkaa. Kotelo on pienien akkujen tapauksessa yleensä tehty metallista ja isompien akkujen tapauksessa muovista, joka on kevyempää ja halvempaa kyseiseen käyttö- tarkoitukseen.

2.4.4 Muut mallit

On olemassa myös kolikon/napin mallisia akkukennoja, joita käytetään todella pieniin kohteisiin, kuva 6.



Kuva 6: Kuva napin mallisesta akusta (Woźnica 2022).

2.5 Akuston kemiaa

Erialaisten akkujen kemioiden vertailut löytyvät taulukosta 1. Lisää vertailuja löytyy kirjasta (Andrea 2020, s.49). Samaisesta kirjasta löytyy sivulta 68 hyvä kuvaaja markkinoilla olevista akuista ja niiden tyypeistä. Tarkempia lähteitä löytyy myös Battery-universityn sivuilta (BatteryUniversity 2022a).

Taulukko 1: Akustojen kemiat ja lyhenteet

Kemialinen yhdiste	Lyhenne	Kuvaus
Litium titanaatti	($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) LTO	Litium titanaatilla on kaikista korkein käyttösyklien määrä, noin 10000 sykliä ennen kuin varaus on pudonnut 80%:iin. Sillä on myös alhainen energiatiheys ja napajännite (2.4V). Toimii anodimateriaalina grafiitin sijasta (BatteryUniversity 2022a).
Litium koboltti-oksidi	(LiCoO_2) LCO	Yksi energiatiheimmistä akuista. Suuri osa kuluttajaelektronikasta hyödyntää tätä yhdistettä.
Litium nikkeli-oksidi	(LiNiO_2) LNO	Noin 15% LCO yhdistelmää energiatiheämpi mutta paljon vaarallisempi. Nissan Leaf EV:n ajoakussa hyödynnetään LNO/LMO kombinaatiota.
Litium mangaani-oksidi	(LiMn_2O_4) LMO	Suurin napajännite yleisimmin tunnetuista litium akuista, sen ollessa 4.2V täydessä latauksessa. Huono kalenteri- ja sykli-ikä.
Litium nikkeli mangaani koboltti-oksidi	(LiNiMnCoO_2) NMC	Hyvä kalenteri-ikä sekä korkea energia ja tehotehiheys, hyödynnetty akkukäyttöisissä sähkötyökaluissa (BatteryUniversity 2022a). Kestää hyvin ääriämpötiloja.

Taulukko 1 (jatkoa): Akustojen kemiat ja lyhenteet

Kemialinen yhdiste	Lyhenne	Kuvaus
Litium rauta-fosfaatti	(LiFeYPO ₄) LFP	Kaikista turvallisin li-ioni yhdistelmä. Napajännite on huomattavan alhainen (3.3V) muihin verrattuna, mutta jännitteen purkautuminen tapahtuu hyvin hitaasti ja tasaisesti. SoC käyrä on hyvin tasainen ja sitä on 50% paikkeilla hyvin hankalaa mitata.
Litium nikkeli koboltti alumiini oksidi	(LiNiCoAlO ₂) NCA	Pienenpi napajännite kuin LCO:ssa. Tesla Model 3:ssa käytetään tätä yhdistettä.

3 Tasauspiirit

Tässä luvussa käydään läpi jännitteen tasauspiirien toimintaperiaatteet sekä miksi ja mihin niitä tarvitaan. Luvussa myös perehdytään tasauksen toimintaan eri topologioissa.

Jännitteen tasauspiirit toimivat yleisesti osana akuston hallintajärjestelmää (BMS), jonka kautta saadaan tietoa siitä kannattaako akkujen jännitettä lähteä ylipäättänsä tasaamaan. Tasaus on järkevää suorittaa samaan aikaan kun akkuja ladataan sillä silloin voidaan hyödyntää akun ulkopuolista virtaa.

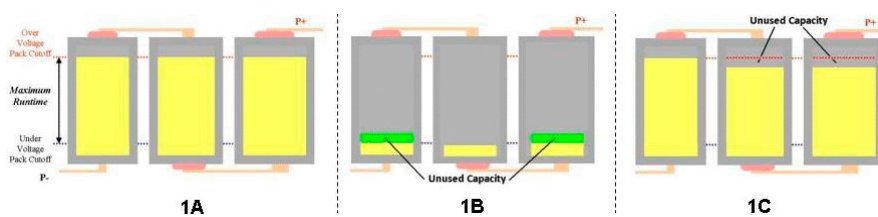
Li-ion-akuilla on korkea coulombin hyötysuhde, joka estää niitä itsestään tasapainottamasta virtaa kuten muissa akuissa. Tämä hyötysuhde on noin 100% mikä tarkoittaa sitä, että akusta saadaan ulos lähes kaikki mikä sinne varataan. Todellisuudessa luku on kuitenkin noin 99.9% ja se vaihtelee kemian perusteella. Tämä pieni ero vaikuttaa siihen, miten akkuja ladataan ja joka latauskerran yhteydessä ero hieman kasvaa, mikä johtaa akkujen väliseen epätasapainoon ja sitä kautta tasauksen tarpeeseen.

3.1 Tarkoitus

Li-ion-akut ja varsinkin isommat akustot tarvitsevat tasauspiirejä korjaamaan kennojen välisiä jännite-eroja. Jännite-erot voivat johtua epätasaisesta lämpökuormasta, huonolaatuisista kennoista, impedanssin muutoksista tai kennojen kemiallisista poikkeavuuksista. Yhteistekijänä nämä vanhentavat kennoja keskenään eri vauhtia mikä vain korostaa eroja.

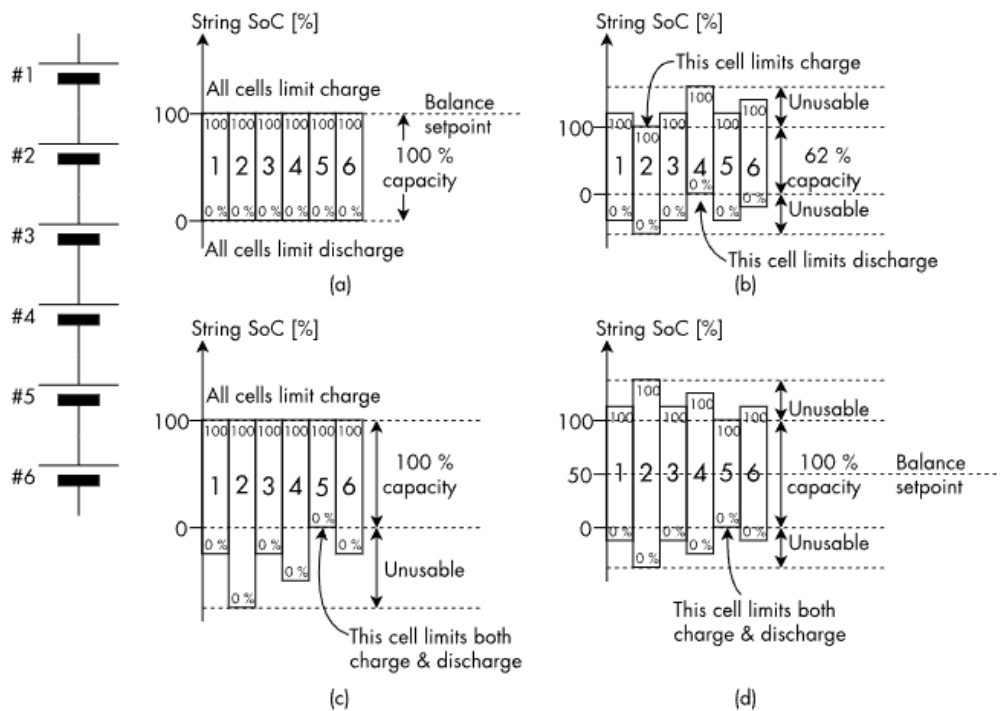
Li-ion-akut eivät pysty luonnollisesti tasapainottamaan itseään niiden korkean coulombin hyötysuhteen ollessa käytännössä 100%, joten tasaus on tehtävä erillisillä piireillä. Jännitteen tasauspiireillä on tarkoituksena maksimoida akusta irti saatava teho ja energia sekä minimoida jännite-erot akkujen välillä. Jos tasausta ei tehdä, jää yksittäisiin akkuihin käyttämätöntä energiaa, jota ei muuten pystytä hyödyntämään. Akusto ei pysty luovuttamaan varausta, jos yksikin yksittäinen akku pääsee tyhjäksi. Samoin yksittäisten akkujen varausten taso vaihtelee (state of charge, SOC) ja se vaikuttaa siihen paljonko akkuja voidaan varata, luoden eroja jännitteeseen sekä impedanssiin.

Pitkässä aikajaksossa katsottuna akut myös vanhenevat eri tahtia ja nämä yksittäiset erot vain kärjistyvät ajan kanssa. Syy akkukennojen keskenään eriävään vanhenemisnopeuteen voi löytyä esimerkiksi lämpötilasta, joka vaihtelee eripuolilla akustoa. Yleisesti ottaen kuumimmat akkukennot vanhenevat muita nopeammin. Kuumuus aiheuttaa hetkellisesti pienen muutoksen, mutta jos korkea lämpötila jatkuu niin se aiheuttaa pitkässä ajanjaksossa isoja muutoksia (Andrea 2020, s.167-168). Lämpötilaerot eri puolilla akustoa aiheutuvat jäähdytyksen poikkeavuuksista, joissakin paikoissa kennojen lämpö pääsee johtumaan helpommin jäähdyttäviin rakenteisiin ja osassa paikoista lämmön siirto onnistuu suurimmalta osin vain viereisiin kennoihin. Lämpötilasta aiheutuvat ongelmat voidaan minimoida hyvällä jäähdytyksen suunnittelulla. Akkujen säilytys myös vanhentaa niitä jonkin verran ajan kanssa ja tämä ilmenee esimerkiksi resistanssin kasvuna ajan suhteen, luku on li-ion-akuilla keksimäärin 1% kuukaudessa normaaleissa olosuhteissa. Kyseiseen lukuun vaikuttaa säilytyslämpötila sekä varauksen taso(SOC).



Kuva 7: Yksittäisten akkukennojen eroja (EDN 2009).

Kuvasta 7 voidaan hyvin todeta ero vanhentuneiden akkukennojen välillä. 1A on esi-merkki uusista käyttämättömistä akkukennoista, joiden välillä ei ole eroja. 1B kuvaa miten vanhentuuessa sarjassa oleviin akkukennoihin jää jäljelle käyttämätöntä kapasiteettia. Vihreällä värillä on korostettu kennojen välisiä kapasiteettieroja. Kennojen väliset kapasiteettierot tulevat esiin kennojen tyhjentyessä. 1C kuvastaa taas sitä miten ladatuissa vanhemmissa täysissä kennoissa on myös eroja maksimi kapasiteetin kanssa. Tasauspiireillä on tarkoitus leikata nämä huiput ja pilkkoa ne kaikkien kennojen käyttöön täten pidentäen koko akuston käyttöikä ja potentiaalia.



Kuva 8: Kuuden sarjassa olevan kennon kokonaiskapasiteetin poikkeavuuksia (Andrea 2020).

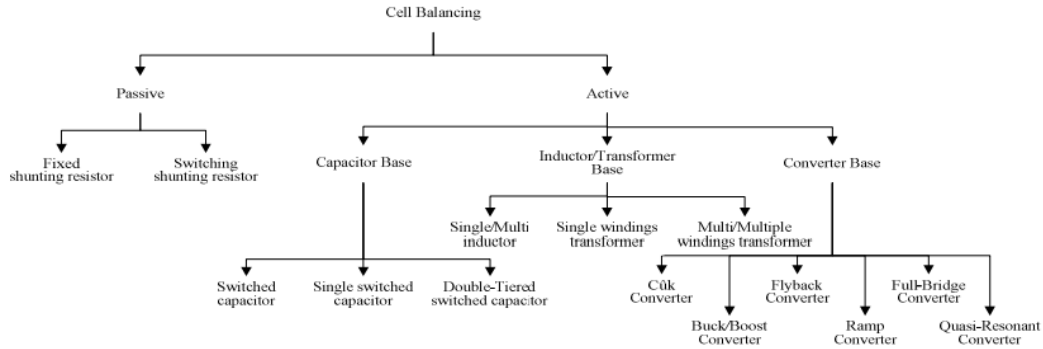
Kuvassa 8 esitellään miten tasaus voidaan suorittaa eri tavoilla. Numeroidut lohkot kuvaavat yksittäisiä kennoja, niiden korkeus kuvaa kapasiteettia ja niiden sijoitus pystyakselilla kuvaa varaustilaa (SoC). (a) Kaikissa kennoissa sama kapasiteetti ja ne on tasattu, (b) sama kapasiteetti mutta kennoja ei ole tasattu, (c) eriävät kapasiteetit ja tasaus on suoritettu huipun mukaan, (d) eriävät kapasiteetit ja tasattu keskelle SoC tasoa.

Eri kemiallisella kombinaatioilla koottujen akkujen varaustaso vaihtelee hyvin paljon, myös niiden SOC käyrät poikkeavat toisistaan, joten tasausta ei voida suorittaa samalla tavalla keskenään erilaisten akkujen kanssa. Esimerkiksi LFP:n jännite-eroa on todella haastava havaita muutoin kuin akun ollessa lähes täysi tai tyhjä (Andrea 2020, s.163-164).

3.2 Tasauspiirien toimintaperiaate

Tasaus voidaan suorittaa kahdella eri tavalla, joko passiivisesti tai aktiivisesti. Passiivisessa tasauksessa energia hukataan lämmöksi ja aktiivisessa sitä siirretään akkukennoon tai sieltä pois. Kuvassa 9 on esitetty millaisia menetelmiä on käytössä. Työssä ei ole käyty kaikkia näitä menetelmiä läpi ja kuvaan tarkoituksena on vain antaa kokonaiskuva menetelmien laajuudesta. Alla on kuvattuna osa näistä tavoista, joilla jännitteentasaus voidaan suorittaa li-ion-akussa. Kirjallisuudessa on alettu käyttämään myös termejä Bypass Balancing ja Charge Transfer Balancing.

Aktiivisten ja passiivisten tasauspiirien toimintaperiaatteesta voidaan tehdä seuraavanlainen analogia helpottamaan hahmottamista. Apuna tähän havainnollistamiseen voidaan käyttää vesilaseja. Vesilasit täytetään jokainen siten, että niissä on eri määrä vettä. Tämän jälkeen tarkoituksena on tasata vesilaseissa olevat vedenpinnat. Aktiivisessa tasauksessa vettä kaadetaan täydemmistä lasista tyhjempiin, kunnes jokaisessa lasissa on saman verran nestettä. Passiivisessa tasauksessa jokaiseen lasiin lasketaan lisää vettä samanaikaisesti, kunnes jokainen lasi tulee täyteen ja niiden nestemäärä tasoittuu. Tämä lasista yli valuva vesi kuvaa sitä, miten energiaa menee hukkaan lämmöksi.



Kuva 9: Passiivisten ja aktiivisten tasauspiiristöjen topologioita (Daowd 2011)

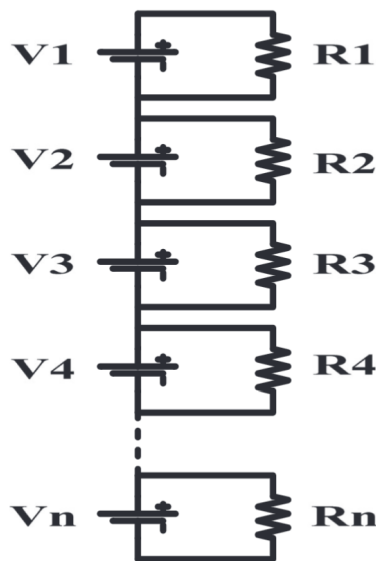
3.3 Passiivinen tasaus

Passiivinen tasaus (Bypass Balancing) suoritetaan dissipatiivisesti kennojen rinnalle asennetuilla vastuksilla, kuva 10. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää yhtä vastusta, joka vuorottelee kennojen välillä (Warner 2015). Latauksen aikana yksittäiset kennot tulevat täyteen (SoC 100%) hieman eri vauhtia. Nopeimmin latautuvat kennot joutuvat ylivaraustilaan ja tämän ehkäisemiseksi virta ohjataan kulkemaan vastusten kautta. Vastuksessa tämä yksittäisen kennon ylimenevän energian osuus hävitetään lämmöksi. Lataus voidaan lopettaa, kun viimeinen kenno on saatu tasattua samaan huipputasoon muiden kennojen kanssa. Passiivisen tasauksen hyvänä puolena on sen edullisuus ja yksinkertaisuus. Haittapuolena on energiaa käyttäminen turhaan lämmittämiseen ja tämä lämpö pitää jotenkin johtaa akustosta pois. Yli 3 A tasaaminen muuttuu epäkäytännölliseksi, sillä syntyvää hukkalämmön määrää on hankala käsitellä (Andrea 2020, s.255). Vastukset on mahdollista korvata millä tahansa kuormalla esimerkiksi transistorilla tai millä tahansa valonlähteellä, sillä tarkoituksena on estää ylimääräisen energian kulkeutuminen kennoihin ja johtaa se lämpönä ulos järjestelmästä.

Tasaus suoritetaan yleensä latauksen aikana koska purkamisen aikana se olisi energian hukkaamista (Santhanagopalan 2014, s.176). Passiivinen tasaus on yleensä halvempaa kuin aktiivinen tasaus mutta se jättää joihinkin yksittäisiin kennoihin varausta.

3.3.1 Fixed shunt resistor

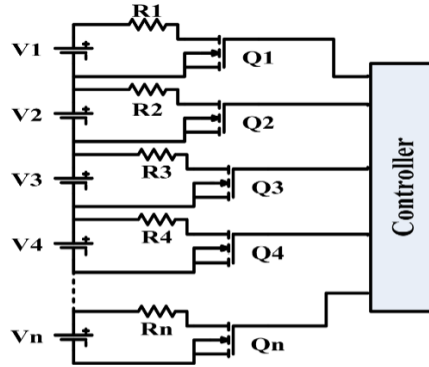
Tässä menetelmässä jokaisen sarjassa olevan kennon rinnalle on asennettu vastus, jossa ylimääräinen virta hävitetään. Tämän tapainen ratkaisu on hyvin yksinkertainen ja vaatii vähän komponentteja. Kuvassa 10 on esitetty, miten kytkentä on helposti skaalattavissa ylöspäin. Haittapuolena tässä menetelmässä on vastuksissa syntyvät energiahäviöt sekä kontrollin puute. Menetelmä soveltuu ainoastaan lyijy- ja nikkeli-pohjaisille akuille, sillä tasaaminen tapahtuu li-ion-akuille haitallisessa ylivaraustilassa.



Kuva 10: Fixed shunt resistor menetelmä (Hemavathi 2021)

3.3.2 Switching shunt resistor

Kehittyneempi versio fixed shunt resistor menetelmästä. Jokaista kennon rinnalla olevaa vastusta voidaan hallita kytkimillä, kuva 11. Kontrolleri pystyy mittaamaan jokaisen kennon jännitettä ja päättämään sen perusteella mikä vastus otetaan käyttöön. Tällä tavalla voidaan tarkasti estää yksittäisten kennojen ylivaraustila ja vahingoittuminen. Vaihtoehtoisesti kaikkia kytkimiä voidaan käyttää samanaikaisesti. Menetelmä on yksinkertainen ja luotettava, sekä sitä pystytään hyödyntämään li-ion-akkujen kanssa. Tällä menetelmällä kytkimillä voidaan estää li-ion-akkujen lataantuminen ylivaraustilaan.



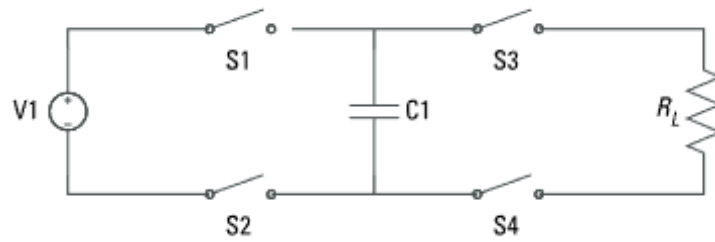
Kuva 11: Fixed shunt resistor menetelmä (Hemavathi 2021)

3.4 Aktiivinen tasaus

Aktiivisen tasauksen (Charge Transfer Balancing) hyvänä puolena on passiiviseen verrattuna se, että siinä pystytään hyödyntämään kaikkien yksittäisten kennojen koko potentiaali sekä lataus- että purkuvaiheessa. Tämä ei kuitenkaan ole kovin yleistä suurissa tuotantomääriä valmistettävissä tuotteissa, sillä hinta voi olla noin 6-kertainen, (Andrea 2020, s.254) ja se lisää akuston kokoa. Tämän tyyppinen tasaus vaatii myös huomattavan jännite-eron kennojen välillä, jotta tasaus olisi mahdollista.

3.4.1 Lentävä kondensaattori

Lentävä kondensaattori (Flying Capacitor) menetelmällä akusta siirretään varaus ensimmäiseksi kytkimillä kondensaattoriin, jonka jälkeen kondensaattorista puretaan jännite kytkimillä toiseen akkuun. Tämä mahdollistaa varauksen siirron täydemmästä akusta tyhjempään. Tällä menetelmällä pystytään tarvittaessa siirtämään varausta galvaanisien eristeen yli. Kuvassa 12 R_L kuvaa yleisesti varausta vastaanottavaa komponenttia. R_L voidaan korvata akkukennolla, jolloin varausta voidaan siirtää suuremmasta SoC pienempään. Menetelmä on edullinen valmistaa mutta tasaus ei ole kovin tehokasta, silloin kun akkujen jännite-erot ovat pieniä. Järjestelmä vaatii myös hyvän ohjauksen kytkimille, että ei synny tarpeetonta oikosulkuja.

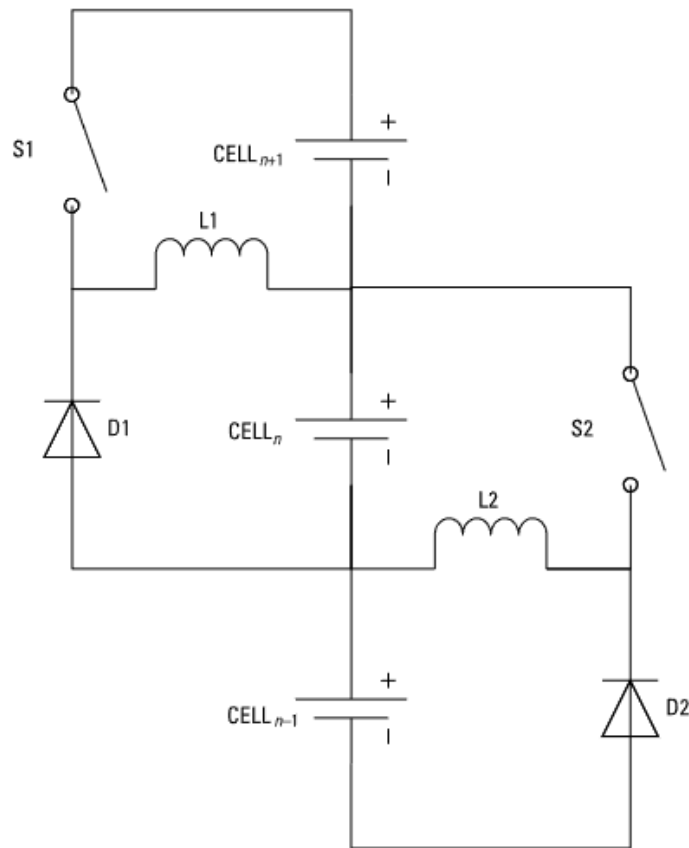


Kuva 12: Lentävä kondensaattori (Weicker 2014)

3.4.2 Induktiivinen tasaus

Induktiivinen balansointi tapahtuu keloilla, jotka kytkimien ja diodien avulla pystyvät siirtämään varausta kennojen välillä, kuva 13. Tällä menetelmällä pystytään siirtämään varausta paremmin jännite-erojen ollessa pieniä verrattuna kondensaattoreilla tehtyyn siirtoon. Menetelmässä varataan kelan magneettikenttään sen verran energiaa jota halutaan siirtää toiseen akkukennoon. Kytkimien avulla tämä keloihin varastoitu energia johdetaan viereiseen akkukennoon.

Tämä on tehokas tapa tasata vierekkäisten akkujen jännitettä. Haittapuolena järjestelmä muuttuu nopeasti monimutkaiseksi, jos sitä lähdetään skaalamaan isompiin akustoihin. Tehohäviöitä rupeaa esiintymään nopeasti, jos välimatkat kasvavat liian isoiksi.

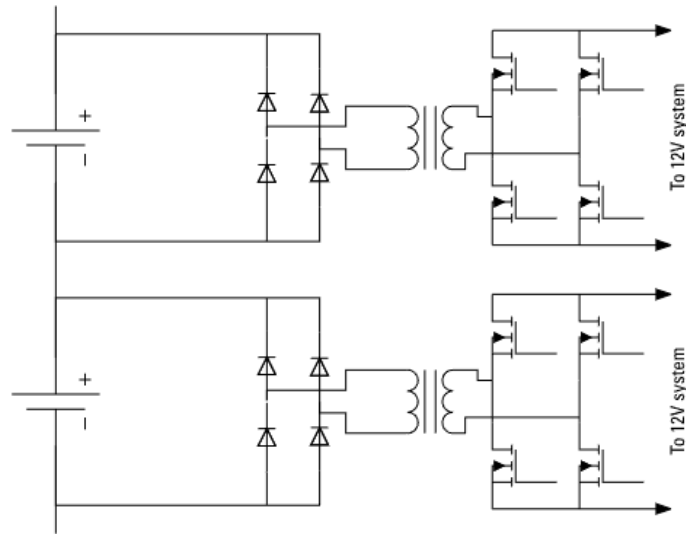


Kuva 13: Induktiivinen tasaus (Weicker 2014)

3.4.3 Muuntajilla tasaus

Kun induktiivisen tasauksen periaatetta viedään eteenpäin voidaan kelat vaihtaa muuntajiksi, kuva 14. Menetelmässä muuntajilla voidaan siirtää varausta mistä tahansa kennosta toiseen. On myös mahdollista siirtää varausta akustosta toiseen, tällä menetelmällä kennojen välimatkaa ei ole suoranaisesti rajattu. DC-DC muuntajalla on mahdollista myös siirtää varausta toiseen energialähteeseen. Kyseinen menetelmä sisältää paljon komponentteja ja on sen takia hyvin kallis valmistaa.

Vaatii rinnalle kytkinpiirin, jotta voidaan luoda aikariippuvainen sähkövirta ja magneettivuo. Keloja voi olla jokaiselle akkukennolle oma tai yksi yhteinen.



Kuva 14: Muuntajilla tasaus (Weicker 2014)

3.5 Tasaus rinnan

Jos kyseessä on yksittäinen n määrän akkukennoja sisältävä rinnankytketty piiri niin silloin ei ole tarvetta jännitteen tasaukselle vaan tasaus tapahtuu itsestään. Tämä tosin tapahtuu silloin kun akkua ei käytetä.

3.6 Muita tapoja

Tasaus on mahdollista suorittaa myös latureilla siten että jokaiselle kennolle on olemassa oma laturi, näin yksittäiset kennot voidaan ladata täyteen huolimatta siitä mikä SoC muissa kennoissa on. Muita tapoja joita ei ole listattuna tähän työhön löytyy lähteestä (Daowd 2011).

3.7 Ongelmia

Tasauksessa käytetyt kytkimet voivat pettää väärään asentoon, joka voi aiheuttaa joko oikosulun tai tilan, jossa tasausta ei tapahdu. On myös mahdollista, että kytkimet pettävät sellaiseen asentoon, jossa yksi yksittäinen akku pääsee purkamaan varausta esim. vastuksen kautta lämmöksi. Tällöin on mahdollista, että kyseinen akku pääsee alivaraustilaan.

Akuissa voi esiintyä kennojen keskeistä virtaa, joka aiheuttaa ajan saatossa epätasapainoa. Joissain tapauksissa kennojen välinen virta voi olla niinkin suuri, että BMS ei pysty tasaamaan tulleita jännite-eroja sille annettuina ajanjaksoina.

4 Turvallisuusratkaisut



Kuva 15: Tesla-merkinen palanut EV (Johansen 2016).

Litium-akustot ovat yleistyneet markkinoilla räjähdysmäisesti viime vuosina niiden positiivisten ominaisuuksien kuten energiatihedysten ja korkean kennojännitteen takia. Tekniikan kehittyessä vauhdilla on turvallisuus jäänyt hieman taka-alalle, ja turvallisuusratkaisuissa on esiintynyt satunnaisesti joitain puutteita. Viime vuosina useat valmistajat ovat joutuneet kutsumaan tuotteitaan takaisin niiden ollessa käyttäjälle vaarallisia tai muuten viallisia, ja pahimmillaan jotkin akut ovat syttyneet itsestään tuleen luoden kuluttajille kuvan, että kyseinen tekniikka olisi käyttäjälle vaarallista. Jatkuva mediahuomio on pakottanut valmistajia kehittämään turvallisuutta eteenpäin sillä pahimmillaan akuston spontaani itsesytyminen voi pahimmillaan viedä useamman hengen, jos vaikka kyseessä on sähköauton palaminen, kuva 15.

Akkuihin liittyviä standardeja on paljon ympäri maailmaa ja jokainen valmistaja käyttää omiaan (Intertek 2013). Tässä kappaleessa monessa kohdassa voidaan nojata ISO 26262 standardiin, joka käsittelee ajoneuvojen turvallisuusratkaisuja, sillä ne ovat hyvin yleispäteviä käsittelemään tätä aihetta. Standardissa kuvataan kolmea riskin osa-aluetta: vakavuutta, ilmaantuvuutta ja hallittavuutta

Vakavuus: käsittää suurimman mahdollisen vahingon, jonka akku pystyy oikosu-
lussa tai muussa tapauksessa aiheuttamaan.

Ilmaantuvuus: Kertoo miten usein ja millä todennäköisyydellä akussa voi sattua jokin vika.

Hallittavuus: Millä asteella pystytään välttämään suurin mahdollinen vahinko ja rajaamaan sitä.

Kirjallisuudessa käsitellään paljon muitakin standardeja, joita laitevalmistajat joutuvat noudattamaan tuotteitaan suunnitellessa. Kirjassa *A Systems Approach to Lithium-ion Battery Management* (s.122) avataan IEC 60950 ja IEC 60664 standardeja, jotka antavat ohjeistuksen komponenttien välisille eristeille, välimatkoille (Clearance) sekä pintavälille (Creepage). Muita tärkeitä turvallisuuteen nojaavia standardeja esiintyy kirjassa: *Fire Hazard Assessment of Lithium Ion Battery Energy Storage Systems: IEC 62619, IEC 62897* (Blum 2016).

Laiteturvallisuudelle on tärkeää ottaa huomioon myös sähkömagneettiset häiriöt muista laitteista ja tähän voidaan soveltaa ISO7636-1 standardia. (*Characteristics of Battery Management Systems of Electric Vehicles with Consideration of the Active and Passive Cell Balancing Process*)

Akkujen globaalissa rahtaamisessa yksi tärkeimmistä standardeista on IEC 62133 jota tulee noudattaa kuluttajaelektroniikan ja muiden pienien akkujen kanssa.

4.1 Syitä miksi turvallisuuskomponentteja tarvitaan

Suurimmat vaarantekijät akustoille väärinkäytön lisäksi ovat vahinko, onnettomuus ja väärin suunniteltu ohjausjärjestelmä. Vaara voi syntyä, jos kennoihin kohdistuu mekaanista vahinkoa, korkeita/matalia lämpötiloja tai sähköisiä ongelmia. Väärinkäyttöä harvoin tapahtuu tahallisesti muuten kuin laboratorio-olosuhteissa, joissa testataan akkujen turvallisuutta. Muulloin kyseessä on yleisesti ottaen inhimillinen virhe tai puhdas sattuma joko käytössä tai suunnittelussa.

Litium-akustoissa suurin vaarantekijä on ylilataus ja sen aiheuttama ylikuumeneminen sekä mahdollinen tulipalo. Kennolla on suuri mahdollisuus syttyä palamaan, kun erottimeen syntyy lämpötilan vaikutuksesta reikä ja elektrodit pääsevät kosketamaan toisiaan. Ylilatauksen välttämistä varten Litium-akustot tarvitsevat hallintajärjestelmän akun ympärille.

Pieniltä mekaanisilta vahingoilta on helppo välttyä hyvällä kotelon suunnittelulla. Jos kyseessä on isompi akusto kuten sähköautoissa, on otettava huomioon onnettomuustilanteissa akustoon kohdistuvat suuret voimat. Akusto voi joutua jatkuvasti alttiiksi g-voimille sekä siihen voi kohdistua onnettomuustilanteessa äkillinen puristus tai lävistys. Näiden testaamisesta kerrotaan lisää kohdassa 4.4.

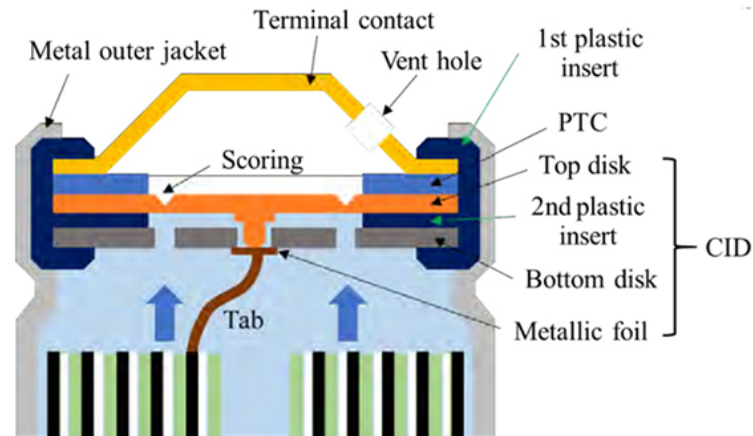
Lämpötilan ääri vaihteluita tapahtuu, kun akkuja käytetään ulkokäyttöön suunnitelluissa kohteissa. Näissäkin sähköautot ovat hyviä esimerkkejä, esimerkiksi Suomessa lämpötila voi vuodenaikojen mukaan vaihdella $-30^{\circ}\text{C}/+30^{\circ}\text{C}$ välillä. Li-ion-akut kestävät hyvin Suomen kesää, sillä lämpötilat eivät nouse liian korkeiksi, mutta talvella pakkanen aiheuttaa ongelmia lataamisen kanssa. Kylmällä lataus aiheuttaa litiumin platingia ja näin ollen aiheuttaa hiljalleen vahinkoa kennoille. Lithium platingilla tarkoitetaan litium partikkelien muodostamaa kerrostumaa elektrodin pinnalla. Kerrostumat muodostuvat alueille, joissa anodimateriaali ei pysty vastaanottamaan enempää ioneja (Zimmerman 2010). Paikoittain nämä kerrokset voivat luoda oikosulun aiheuttavia erotinkerroksen läpäiseviä stalagmiitteja. Akkujen kapasiteetti laskee ajan kanssa enemmän, jos sillä on korkea SOC tai säilytyslämpötila on korkea, akkuja tulisi säilyttää viileässä ja mielellään siten että SOC on puolet tai vähemmän.

Latauksen yhteydessä yksikennoisilla akuilla kuten kännyköissä ennen latausta varmistetaan, että akku on toimintakuntoinen ja kytketty oikein kiinni. Tämä on toteutettu yhdellä spesifillä vastuksella, jonka arvo mitataan ennen latauksen alkua. Isommilla monesta akusta koostuvissa akustoissa kuten sähköautossa taas jokaiselle akkukennolle on annettu oma tunniste eli ID (identifier). Tällä tavalla voidaan hyödyntää yhtä hallintalaitetta useassa akussa.

Lisää turvallisuuskomponentteja käsittelevästä aiheesta löytyy tästä artikkelista (Chen 2021).

4.2 Sisäiset turvallisuuskomponentit

Tässä kappaleessa käydään läpi akkukennojen sisäisiä turvallisuuskomponentteja.



Kuva 16: Kuva sylinterinmuotoisen akun päässä olevista komponenteista (BatteryUniversity 2022b).

4.2.1 Erotin

Elektrodien välissä oleva polymeeristä valmistettu erotinkalvo eli ”separaattori” voi toimia elektrodien eristämisen lisäksi turvallisuuskomponenttina. Kun erottimen lämpötila nousee tarpeeksi korkeaksi sen huokokset sulavat ja sen kyky päästää ioneita huokosten läpi häviää. Erottimen rakenne koostuu monessa kaupallisessa ratkaisussa joko kaksiki- tai kolmikerroksisesta polymeerirakenteesta (PP/PE tai PP/PE/PP). Erottimen toiminta perustuu näiden polymeerien sulamislämpötilaeroihin (PE, 135°C ja PP, 165°C). Kun PE sulaa niin PP pitää rakenteen kasassa siihen asti, kunnes sekin pääsee sulaamaan tarpeeksi korkeassa lämpötilassa. Virran kulku loppuu välillä 135-165°C jolloin ionit eivät pääse kulkemaan PE kerroksen läpi. Kun molemmat polymeerit ovat sulaneet, elektrodit pääsevät koskettamaan toisiaan ja syntyy oikosulku (Fang 2021).

4.2.2 PTC-termistori

PTC device, (Positive Temperature Coefficient Switch) toimii sisäisenä turvallisuuskomponenttina, jos akku pääsee lämpenemään liian suuren virran vaikutuksesta. Lämpötilan noustessa PTC-termistori nostaa sen resistanssia, mikä taas rajoittaa virran kul-

kua akun läpi. Jäähtyessään PTC:n resistanssi palaa normaaliksi, joten sitä voidaan käyttää useasti (BatteryJunction 2022). Tosin jatkuva käyttö kuluttaa sitä ja vaikuttaa akun suorituskykyyn. Komponentti itsessään on renkaan muotoinen levy navan ja ylipaineventtiilin välissä, kuva 16.

4.2.3 Ylipaineventtiili

Sylinterin mallisissa akuissa on kennon toiseen päähän sijoitettu ylipaineventtiili, joka reagoi kennon sisälle kertyvän liialliseen paineeseen. Ylipaineventtiili on suunniteltu siten, että se on rakenteeltaan akun heikoin kohta. Sen tarkoituksena on pettää ensimmäisenä sisäisen paineen takia. Ilman tätä komponentti akulla on vikatilanteessa huomattava räjähdysvaara (BatteryUniversity 2022b).

4.2.4 CID

CID (Current Interrupt Device) on sulakkeen tapainen komponentti, joka katkaisee virran pysyvästi akusta. Aktivoituu kun paine kennon sisällä kasvaa liian suureksi. Akun sisälle kertyvä paine voi olla peräisin ylilatauksesta tai liian korkeasta lämpötilasta. Liian suuri paine (1000 kPa (BatteryUniversity 2022b)) erottaa ”painelevyn” ja johdinliitoksen (kuvassa 16 oranssi ja ruskea osa irtoavat) toisistaan (BatteryJunction 2022).

4.3 Ulkoiset turvallisuuskomponentit

Alla on kuvattuna mitä turvallisuuskomponentteja li-ion-akuissa on ja mihin niitä käytetään.

4.3.1 PCM eli Protection circuit module

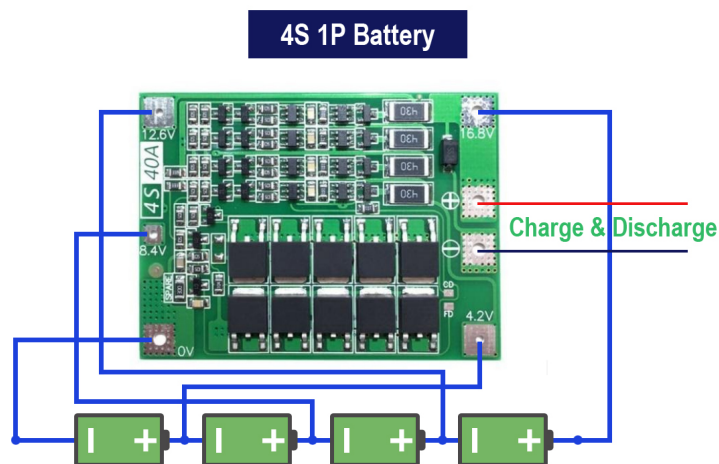
Pienelektronikassa käytetty komponentti, voidaan myös kutsua nimellä PCB (Protection Circuit Board) Vahtii jännitteen tasoa analogisesti, ettei akku pääse yli- tai alivaraustilaan. PCM pysäyttää latauksen, kun havaitsee että akun yksittäinen kenno on tullut täyteen, ja näin estää yksittäisten kennojen ylivarauksen. Samoin se myös vahtii, että akusta ei pureta liikaa varausta, jotta mikään yksittäinen kenno ei joudu alivaraustilaan.

4.3.2 BMS eli Battery management system

PCM ja PCB erona BMS:ä käytetään isommissa akustoissa. Huolehtii akun kunnosta mittaamalla jännitettä, lämpötilaa, jne. Jokainen li-ion-akku tarvitsee sitä hallitsevan komponentin koska sillä ehkäistään yli- tai alijännitetilaa, joka rikkoo akun. Jotta BMS:llä on kyky huolehtia turvallisuudesta, sillä pitää olla kyky katkaista virta koko akustosta ilman ulkopuolisia tekijöitä. Tätä ei voi korvata millään ja sen on oltava oletus, kun suojataan akkua.

BMS voi mitata asioita monella eri tavalla sekä eri resoluutiolla. Mittaus voi tapahtua joko analogisesti (PCM) tai digitaalisesti. Analoginen järjestelmä on halpa ja pieni, mutta sillä on paljon rajoitteita ja se pystyy toimimaan vaan rajatulla alueella. Digitaalinen järjestelmä on taas vuorostaan kalliimpi, mutta se pystyy tekemään paljon enemmän kuin analoginen.

Esimerkkinä BMS:tä on kuvassa 17 esiintyvä tasauspiiristöllä varustettu neljää sarjassa olevaa kennoa vahtiva BMS. 4S 1P tarkoittaa 4 sarjassa (series) ja 1 rinnan (parallel). Puolet virtapiiristä vievät 10 isoa mustaa neliötä ovat MOSFET transistoreja josta enemmän kohdassa 4.3.5. Näiden tarkoitus on estää kennojen yli- tai alivaraustilaa. Oikeassa yläreunassa on komponentit aktiivista tasausta varten. Vasemman yläreunan komponentit vastaavat kennojen turvallisuudesta.



Kuva 17: 4S 40A Battery Management System (BMS) (Bhowmick 2022).

4.3.3 Lämpömittari

Lämpötilan mittaaminen on akuston kannalta elintärkeää, sillä liian korkeassa lämpötilassa on mahdollista, että akku syttyy palamaan ja liian pienessä lämpötilassa $\leq 0^{\circ}\text{C}$ li-ion-akun lataaminen aiheuttaa litium platingia, joka tiputtaa akun kapasiteettia ja elinikää sekä mahdollistaa pitkässä juoksussa sisäisen oikosulun. Lämpötila vaihtelee eri puolella akkua ja siksi olisi toivottavaa, että mittaus suoritettaisiin mahdollisimman laajasti kuten mittaamalla jokaisen kennon oman lämpötilan. Akut vanhenevat eri tahtiin näiden eriävien lämpötilojen johdosta ja BMS hyötyy paljon tarkasta mittauksesta, sillä se pystyy reagoimaan näihin muutoksiin. Tarvittaessa BMS kytkee lämpötilojen ääripisteissä akuston pois käytöstä, jottei se pääsisi vahingoittumaan pysyvästi.

Akustoa voidaan myös lämmittää tai jäähdyttää tarvittavaan lämpötilaan, jotta vältetään vahingoilta tai että akustosta saadaan optimaalinen hyöty irti. Tästä on paljon hyötyä esim. sähköautoissa, joiden akkuja voidaan hetki lämmittää pakkasella ennen kuin niitä ruvetaan lataamaan.

4.3.4 Lämpötilan hallintalaitteet

Kuten aikaisemmassa kohdassa todettiin, niin lämpötilan hallinta on akustolle todella tärkeää. Lämpötilaa voidaan säätää monella termodynaamisella tavalla, joko tuomalla lämpöä systeemiin tai viemällä sitä pois.

Akuston ylimääräinen lämpö on helpointa johtaa rakenteisiin ja tämä onkin yleisin tapa, jolla sisäinen lämpötila pidetään kurissa pienissä sovelluksissa. Isommissa kohteissa lämpö ei enää pääsekään johtumaan niin helpolla akuston sisältä pois ja se vaatii erillistä jäähdyttämistä.

Jäähdytys voidaan myös toteuttaa kierrättämällä jotain väliainetta, johon lämpö pääsee siirtymään esim. ilmaa tai jäähdytysnestettä (vesi, glykoli). Nesteet kierrätetään pumpulla, ja niiden jäähdytys tapahtuu jäähdytyskennossa. Ilman kanssa riittää, että viileämpi korvausilma pääsee virtaamaan rakenteiden tai lämpönielun läpi.

Lämpötilan stabiloimiseksi käytetään usein myös eristeitä suojaamaan akustoa ulkopuoliselta lämpötilalta tai suojaamaan käyttäjää kuumilta pinnoilta. Akusto on esimerkiksi hyvä suojata pitkäaikaiselta suoralta auringonvalolta tai kovalta pakkaselta.

4.3.5 Transistorit

MOSFET (The Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor(Solid-State)) Käytetään turvakytkiminä matalajännitteisissä akuissa, kontrolloinnin hoitaa suojaava BMS. Esiintyy usein sarjassa toisen kanssa siten että molempien rinnalla on diodi, tällöin voidaan antaa virran kulkea haluttuihin suuntiin ja vikatilanteessa kytkeä kokonaan pois. Käyttö aina 50A asti ja sen jälkeen tulee käyttää releitä.

4.3.6 Kytkin/rele

Turvakytkimillä voidaan katkaista BMS:n toimesta virta systeemistä tai halutuista paikoista, jos näissä havaitaan joitain ongelmia. MOSFET vahingoittuu yli 50A virrasta, joten turvakytkimiä/releitä pyritään käyttämään näissä tilanteissa. Näiden avulla voidaan myös hallita akun ulkopuolisia apulaitteita esim. lämmityslaitetta akun lämmittämiseen.

Releiden kanssa pitää olla tarkkana minkälaisia (normaalisti auki/normaalisti kiinni) laittaa mihinkin. Kun akun SoC laskee liian alas releiden operointia varten voi mahdollisesti piiri jäädä jännitteelliseksi. Jos tähän ei reagoita mitenkään voi akku päästä ajan myötä tyhjenemään alivaraustilaan, joka vahingoittaa li-ion-akkua pysyvästi.

4.3.7 Sulake



Kuva 18: Akuissa käytettyjä sulakkeita (SCHOTT 2022).

Sulakkeilla (kuva 18) estetään vikatilanteissa komponenttien vahingoittuminen. Li-ion-akuilla sulake irrottaa vikaantuneen akkukennon ennen sen lämpenemisen aiheuttamaa itsesyttymistä kriittisen pisteen ylittyessä. Mikäli jokaiselle kennolle asennetaan oma sulake, saattaa ketjureaktiona tapahtuva kaikkien sulakkeiden irtoaminen aiheuttaa tulipalovaaran (Andrea 2020, s.192). Joissakin PCM:ssä on kemiallinen sulake, jonka BMS voi laukaista, mikäli virtakytkimiä ei kyetä kontrolloimaan (Andrea 2020, s.232).

Pääsulake on hyvä sijoittaa keskelle akkukennojen virtapiiriä, jolloin siitä saadaan parhaiten hyötyä. Jos käytössä on useampaa akustoa olisi hyvä laittaa jokaiselle akustolle oma sulake, joka kestää enemmän kuin pääsulake, jotta se laukeaisi ensin (Andrea 2020, s.372).

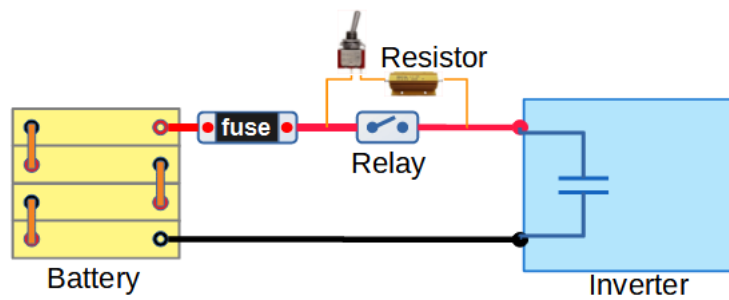
Sulakkeiden kanssa on huomioitava tarkkaan niiden mitoitus, jotta ne kestävät käyttökohteen virtoja ja laukeavat vasta tarpeen vaatiessa. Huomioon pitää ottaa maksimi latausvirta ja akusta otettava virta sekä kaikki akustoon mukaan kuuluvien komponenttien virran kesto.

4.3.8 Diodit

Diodi komponenttina antaa virran kulkea sen läpi vain toiseen suuntaan ja tästä on muutamia käytännön hyötyjä akustoissa. Suojakytkin voidaan korvata pienissä akustoissa diodeilla, jotka jakaa virran usealle kennolle. (Andrea 2020, s.437) Diodeilla voidaan myös estää haitallisten virtojen paluu akulle.

4.3.9 Esivarauspiiri

Esivarauspiiri suojelee akun ympärillä olevia komponentteja kuten johtimia, liittimiä ja sulakkeita suurelta kytkentävirralla. Kytkentävirran suuruus on 500 - 1000 A riippuen kuorman kapasitanssista. Esivarauspiirissä on rinnan kaksi kytkintä sekä toisen kytkimen kanssa sarjassa oleva vastus, jolla rajoitetaan kytkentävirtaa. BMS kontrolloi kytkimillä virran kulkemaan vastuksen ohi, kunnes esivaraus on suoritettu 19.



Kuva 19: Esivarauspiiri (Philtao 2021)

4.3.10 Kotelo

Akusto tulee suojata hyvin ulkoisilta vahingoilta, joita voi esiintyä halutussa käyttökohteessa. Pienetkin näkyvät vahingot voivat olla kennon sisällä paljon isompia ja aiheuttaa oikosulun. Kotelo voidaan tehdä mistä tahansa aineesta mitä on tarjolla, kunhan se täyttää siltä vaaditut ominaisuudet. Koteloissa käytetään usein jotain metallia (teräs tai alumiini) kuten kuvassa 20 tai muovia (ABS, HDPE, jne.). Suunnittelussa tulee ottaa huomioon käyttökohde, että kotelosta ei tule liian painavaa tai liian kallista haluttuun sovellukseen (Chen 2021).



Kuva 20: Nissan leafissa käytettävä kotelorakenne (Nissan 2022).

4.3.11 Muita asiota

BMS mittaa vikoja jännitteen ja lämpötilan muutosten avulla, ja näiden tietojen avulla voi ehkäistä mahdolliset akkujen elinkaaren loppupäässä olevat häiriöt ilmoittamalla tarkasti SoH arvon. BMS myös vastaa siitä miten paljon akkuja voi ladata tai purkaa ehkäisten näin mahdollisesti yli- tai alijännitetilat.

BMS voisi myös mitata turvallisuuden vuoksi myös seuraavia asioita:

- Pussien paksuutta
- Vuotavia kaasuja
- Kosteutta kennoston sisällä
- Korkeataajuisia ääniä akustosta
- Jäähdyttävää ilmavirtaa

Näitä ei kuitenkaan ole vielä sovellettu mihinkään markkinoilla oleviin kohteisiin (Andrea 2020, s.246).

Turvallisuudessa on myös otettava huomioon millainen ohjelma BMS:n sisällä on. Sillä pienikin virhe ohjelmoinnissa voi saada koko järjestelmän hajalle tai se pitkässä juoksussa vahingoittaa akustoa esimerkiksi jännitteentasauksen yhteydessä. Tästä syystä on oltava huomattavan tarkkoja BMS valitessa, että mihin käyttökohteeseen sitä voi käyttää ja miten se on ohjelmoitu.

4.4 Testausmenetelmät

Testausmenetelmissä tulee ottaa huomioon yleisimmät syyt, jonka takia akku voi vahingoittua. Yleisimpiä syitä ovat: fyysinen vahinko, sähkötekkinen vika tai väärä käyttölämpötila.

Fyysisiä vahinkoja voivat olla: pudotus, tärähdys, tärinä, puristus, taivutus tai lävistys. Sähkötekniisiä vahinkoja: ylilataus, alilataus, ylijännite, alijännite ja oikosulku. Käyttölämpötila: liian korkea tai matala säilytys/käyttölämpötila (Arora 2019).

Standardeissa IEC 62133 ja UL 2054 kuvataan miten testaukset tulee suorittaa ja ne täydentävät toisiaan. UL 2054 vaatii että akkukennot täyttävät standardin UL 1642. UL 1642 vaatii että useimmat testit suoritetaan viidellä näytteellä.

4.4.1 Puristustesti

Puristustestissä akkua puristetaan prässillä kahden tasaisen levyn välissä 13 ± 1.0 kN voimalla, UL 2054. Tarkoituksena on testata, ettei akku räjähdä tai syty palamaan.

4.4.2 Iskutesti

Iskutestissä testataan akun kestoä iskutilanteessa, testi suoritetaan standardin mukaisesti tietyn kokoisella painolla (9.1 ± 0.46 kg) tiputettuna 61 cm korkeudelta, UL 2054. Testin tavoitteena on, ettei akku räjähdä tai syty palamaan.

4.4.3 Shokkitesti

Shokkitestissä testataan akun kykyä selviytyä yllättävistä hetkellisistä voimista kuten g-voimista. Testaus suoritetaan testipenkissä, jossa kappale ei pääse liikkumaan ja siihen kohdistetaan hetkellisesti tietyn akselin suuntaisia voimia. Tavoitteena ettei akku vahingoitu, räjähdä tai syty palamaan. Testissä huippukiihtyvyyttä vaihtelee välillä 135-170g, ja testi suoritetaan symmetrisesti joka akselin suuntaan. Testissä lämpötilan tulee olla $20 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$, UL 2054.

4.4.4 Ulkopuolinen oikosulku testi

Testissä testataan miten akku kestää, kun sen navat lyödään yhteen aiheuttaen akun ulkopuolisen oikosulun. Oikosulku on standardien mukaisesti tehtävä mahdollisimman pienellä resistanssilla (yleisesti vähemmän kuin $100\text{m}\Omega$) jolloin saadaan aikaiseksi mahdollisimman iso oikosulkuvirta. Testi suoritetaan 20 °C ja 55 °C lämpötiloissa 24 tunnin ajan, IEC 62133. Tarkoituksena testata, ettei akku räjähdä tai syty palamaan.

4.4.5 Naulalla lävitystesti

Testissä lävistetään akku sähköjohtavalla sauvalla (naula) tavoitteena selvittää miten herkästi se aiheuttaa oikosulun akussa. Yksittäisissä kennoissa sauvan paksuus on 3 mm

ja 20 mm silloin kun testaan akustoja. Testausmenetelmille on olemassa oma standardi UL 1642 ja UL 2054 sekä IEC62133-2 jossa kerrotaan miten testaus tehdään ja mikä on oltava lopputulos (Arora 2019).

5 Johtopäätökset

Akuston kannalta jännitteen tasaaminen on tarpeellista silloin, kun akustolta odotetaan pitkää käyttöikää ja paljon käyttösyklejä. Näissä sovelluksissa hinnan lisäys ja suurempi tilantarve ei ole niin merkitsevää.

Pienelektronikassa, jonka kuluttaja vaihtaa uuteen ennen elinkaaren päättymistä, tasauspiirin tarpeellisuus on kyseenalaista. Kuluttajille tasauspiiristön tuottama elinkaaren lisäys ei välttämättä anna lisäarvoa. Tästä syystä valmistajan ei kannata käyttää akun valmistuksessa ylimääräisiä komponentteja. Tasauspiirien implementointi lisää kustannuksia ja mahdollisesti laitteen ulkomittoja. Toisaalta EV markkinoilla akustoilta vaaditaan pitkää elinikää ja mahdollisimman pitkää akunkestoa. Tasauspiirien tuoma lisäkustannus ei näy valmiiksi suurissa sähköautojen hinnoissa. Kuluttajat arvostavat sähköautoissa pitkää ajomatkaa ja tasauspiirit mahdollistavat tämän.

Sekä kuluttajaturvallisuuslaki että sähköturvallisuuslaki edellyttävät, että tuotteista ei aiheudu vaaraa. Li-ion-akkujen tulee käyttää ainakin PCM komponenttia jotta tämä toteutuu. Muiden turvallisuuskomponenttien tarpeellisuus riippuu täysin akuston käyttökohteesta. Laitevalmistajan tulee varmistaa että akusto täyttää käyttökohteen vaatimukset. Li-ion-akku on vaarallinen ja voi aiheuttaa aineellisia ja/tai henkilövahinkoja ilman oikeita turvallisuuskomponentteja.

Li-ion-akuissa on edelleen paljon kehitettävää. Markkinat vaativat koko ajan halvempia, pienempiä, kevyempiä ja kestävämpiä akkuja aina vaan useampiin kuluttajakohteisiin. Lainsäädännöllä vaadittu liikenteen sähköistäminen edesauttaa akkuteknologian, tasauspiirien ja turvallisuuskomponenttien kehitystä. Sähköautoihin ja kuluttajaelektronikkaan investoiminen vie jatkuvasti tekniikan kehitystä eteenpäin.

Viitteet

Andrea, D. (2020), *Lithium-Ion Batteries and Applications: A Practical and Comprehensive Guide to Lithium-Ion Batteries and Arrays, from Toys to Towns, Volume 1, Batteries*, Artech House.

Arora, Ashish, e. a. (2019), *Lithium-Ion Battery Failures in Consumer Electronics*, Artech House.

Autotie (2022), 'Sähköautojen osuus jopa 24,2% uusien autojen ensirekisteröinneistä joulukuussa 2021!'.

URL: <https://www.autotie.fi/tien-sivusta/sahkoautoileva-motoristi/sahkoautojen-osuus-jopa-24-2-uusien-autojen-ensirekisteroinneista-joulukuussa-2021>

BatteryJunction (2022), 'Keep your batteries safe'.

URL: <https://www.batteryjunction.com/understanding-battery-protection.html>

BatteryUniversity (2022a), 'Bu-205: Types of lithium-ion'.

URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>

BatteryUniversity (2022b), 'Bu-205: Types of lithium-ion'.

URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-304-why-are-protection-circuits-needed>

BatteryUniversity (2022c), 'Bu-301a: Types of battery cells'.

URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells>

Bhowmick, S. (2022), 'Lithium ion battery management and protection module (bms) teardown - schematics, parts list and working'.

URL: <https://circuitdigest.com/electronic-circuits/lithium-ion-battery-management-and-protection-module-bms-teardown-schematics-parts-list-and-working>

- Blum, A. F. . L. J. (2016), *Fire Hazard Assessment of Lithium Ion Battery Energy Storage Systems*, NY: Springer New York.
- CBC (2022), ‘Memorial grows for victim of fatal battery explosion in vancouver as officials warn of risks’.
URL: <https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/lithium-ion-battery-risks-1.6487603>
- Chen, Y. e. a. (2021), ‘A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards.’, *Journal of Energy Chemistry* **59**(1), 83–99.
- Daowd, M. e. a. (2011), ‘Passive and active battery balancing comparison based on matlab simulation’, in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* pp. 1–7.
- Deng, D. (2015), ‘Li-ion batteries: basics, progress, and challenges’, *Energy Science Engineering* **3**.
- EDN (2009), ‘Increasing large li-ion battery pack energy delivery with active cell balancing’.
URL: <https://www.edn.com/increasing-large-li-ion-battery-pack-energy-delivery-with-active-cell-balancing/>
- Fang, H., W. R. Y. T. . Y. Y. (2021), ‘The high-performance separators in the power lithium-ion batteries’, *E3S Web of Conferences*. **308**.
- Hemavathi, S. (2021), ‘Overview of cell balancing methods for li-ion battery technology’, *Energy storage (Hoboken, N.J.: 2019)* **3**(2).
- Intertek (2013), ‘Navigating the regulatory maze of lithium battery safety’.
URL: http://batterypoweronline.com/wp-content/uploads/2013/11/Intertek_Regulatory-Maze-WP.pdf
- Johansen, E. L. (2016), ‘Aust-agder: Tesla tok fyr under lading’.
URL: <https://www.vg.no/forbruker/bil-baat-og-motor/i/K5b66/aust-agder-tesla-tok-fyr-under-lading>

Kane, M. (2022), ‘What batteries are tesla using in its electric cars?’.

URL: <https://insideevs.com/news/587455/batteries-tesla-using-electric-cars/#:~:text=Tesla%20simply%20decided%20to%20use,quality%20and%20in%20high%20volume.>

Matthias Zschornak, Falk Meutzner, J. L. A. L. T. L. J. H. M. N. J. Z. P. B. B. (2018), ‘Fundamental principles of battery design’, *Physical Sciences Reviews* **3**(11).

Nissan (2022), ‘Electric vehicle lithium-ion battery’.

URL: https://www.nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/LI_ION_EV/

Philtao (2021), ‘What is pre-charge and how it works...’.

URL: <https://www.taoperf.com/2021/09/02/pre-charge/>

Santhanagopalan, S. e. a. (2014), *Design and analysis of large lithium-Ion battery systems*, Boston: Artech House.

SCHOTT (2022), ‘Lithium ion battery protectors’.

URL: <https://www.schott.com/en-lu/products/lithium-ion-battery-protectors>

Spakfun (2022), ‘Lithium ion battery - 18650 cell (2600mah)’.

URL: <https://www.sparkfun.com/products/12895>

Team, M. E. V. (2008), ‘A guide to understanding battery specifications’.

URL: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf

Techsciresearch (2018), ‘Manufacturing lithium-ion batteries’.

URL: <https://www.techsciresearch.com/blog/manufacturing-lithium-ion-batteries/29.html>

Warner, J. (2015), *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology*, Elsevier Inc.

Weicker, P. (2014), *A Systems Approach to Lithium-Ion Battery Management*, Artech House.

Woźnica, K. (2022), 'Lithium battery cr2032'.

URL: *<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Battery-lithium-cr2032.jpg>*

Zimmerman, A. H. Quinzio, M. V. (2010), 'Lithium plating in lithium-ion cells'.

URL: *https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/1-lithium_plating_azimmerman.pdf*