



NIKKELIAKUN KENNOJEN KORVAAMINEN LITIUMIONIKENNOILLA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2023

Juuso Häyhä

Tarkastaja: DI Janne Jäppinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Juuso Häyhä

Nikkeliakun kennojen korvaaminen litiumionikennoilla

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2023

Tarkastaja: DI Janne Jäppinen

Toimintakykynsä menettäneen akun korjaaminen tee-se-itse- menetelmin on mahdollista korvaamalla sen kennot uusilla. Litiumionikenojen kasvava kehitys ja yleistyminen voivat saada vanhentuneen nikkeliakun omistajan kiinnostumaan mahdollisuudesta korvata vanhat nikkelikennot litiumionikennoilla. Tämä työ kartoittaa kirjallisuuskatsauksen menetelmin kennotyyppien vaihdoksen taustateoriaa, toteutuksen mahdollisuutta ja oleellisia huomiointotettavia asioita vaihdoksen suunnittelussa.

Tuloksissa nähdään kennotyyppien erojen asettavan lisävaatimuksia uusioakun rakenteelle. Erityisesti litiumionikenojen vaarallisuus vikatilanteissa edellyttää turvallisuuden priorisointia työssä. Samasta syystä akkuun on välttämätöntä lisätä erillinen suojapiiri. Kennotyyppien erisuurten nimellisjännitteiden vuoksi kennotopologiaa on muokattava. Muut sähköiset ominaisuudet kuten maksimivirrat on huomioitava tarkasti akun turvallisen toiminnan varmistamiseksi.

Tulosten perusteella todetaan kennotyyppien vaihdoksen olevan mahdollista edellä mainitut asiat huomioiden. Muunnetun akun ennustetaan vanhaan akkuun verrattuna parantuneita ominaisuuksia, kuten suurempaa kapasiteettia ja pienempää massaa. Vanhan laturin käyttö muunnetun akun kanssa ei ole kennotyyppien yhteensopimattomien latausalgoritmien vuoksi suositeltavaa. Ylipäätään vaihdoksen toteuttamista ei työn perusteella voida suositella ilman riittävää alan osaamista, sillä litiumionikennot muodostavat vikaantuessaan merkittävän turvallisuusriskin.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Juuso Häyhä

Substitution of nickel-based battery cells with lithium-ion cells

Bachelor's thesis

2023

Examiners: M.Sc. (Tech.) Janne Jäppinen

Restoring an expired battery is possible with DIY methods by replacing its constituent cells with new ones. Increasing development and prevalence of lithium-ion cells may lead an owner of an expired nickel-based battery to entertain the possibility of replacing the old nickel cells with lithium-ion ones. By means of a literature review, this work charts the background theory, feasibility, and essential design considerations of such a cell conversion.

The results of the work show that differences in the two cell types set additional requirements for the structure of the converted battery. Danger posed by malfunctioning lithium-ion cells necessitates safety as the top priority over the course of the work. For the same reason, it is obligatory to install a dedicated protection circuit into the converted battery. Difference in the nominal voltages of the cell types necessitate modifications to the battery's cell topology. Other electrical characteristics, such as maximum currents, must be considered carefully to ensure safe operation of the battery.

Based on the results, the cell conversion is deemed possible to implement, provided that the conditions listed above are met. Improved performance, such as higher capacity and lower mass could be expected from the converted battery, relative to the original. Using the original battery charger with the converted battery is deemed infeasible due to the cell types' incompatible charging algorithms. Overall, implementation of this kind of cell conversion without sufficient skills in the field is strongly advised against, due to the severe risk posed by malfunctioning lithium-ion cells.

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	5
2	Tulokset	7
2.1	Turvallisuus.....	7
2.2	Kennojen topologia	8
2.2.1	Sarjakytkentä	9
2.2.2	Rinnankytkentä	10
2.2.3	Sarjaan- ja rinnankytkentöjen yhdistelmä.....	11
2.3	Suojapiirit.....	12
2.3.1	PCM (Protection Circuit Module, suojapiirimoduuli).....	12
2.3.2	BMS (Battery Management System, akunhallintajärjestelmä).....	12
2.4	Kennojen sähköiset ominaisuudet.....	13
2.4.1	Napajännite	15
2.4.2	Purku- ja latausvirrat.....	16
2.5	Kennojen mekaaniset ominaisuudet.....	16
2.5.1	Kennojen mitat ja kotelointi	16
2.5.2	Kennojen kytkeminen toisiinsa.....	17
2.5.3	Jäähdytys.....	17
2.6	Laturi ja lataaminen.....	18
2.6.1	Nikkelikennojen latausalgoritmit.....	18
2.6.2	CC/CV- algoritmi	19
2.6.3	Vanhan laturin soveltuvuus	20
3	Johtopäätökset	22
	Lähteet	24

1 Johdanto

Elektroniikan alati kehittyessä ja monimutkaistuessa on aina ajankohtaista kartoittaa kuluttajan mahdollisuuksia sähkölaitteen omatoimiseen korjaustyöhön, sillä laitteen korjaaminen on yksittäiselle henkilölle käytännöllinen keino hillitä elektroniikkajätteen tarpeetonta syntymä. Viime vuosina sähkölaitteiden korjaaminen uuden ostamisen sijaan on noussut julkiseen keskusteluun, erityisesti ympäristövaikutusten asiayhteydessä (Karismo, 2023). Sähkölaitteen korjausmahdollisuus on myös elintärkeä osa kuluttajan autonomiaa.

Kuluttajan oikeuksia edistämään onkin syntynyt esimerkiksi Right to Repair -liike, jonka tavoitteena on turvata lainsäädännön keinoin kuluttajan mahdollisuuksia korjata ja korjauttaa laitteita kohtuullisella hinnalla ja vaivalla (Klosowski, 2021). Tässä työssä tutkitaan mahdollisuutta käsikokoisen sähkölaitteen akun korjaamiseen ja päivittämiseen vaihtamalla akun kennotyyppiä modernimpaan litiumioniin. Työn kirjoittamishetkellä aiheesta ei löydy aiempaa suomenkielistä kartoitusta, joten selvityksestä olisi hyötyä asiasta kiinnostuneille.

Kun arkikielessä puhutaan ”akusta”, tarkoitetaan kokoonpanoa, joka muodostuu yhdestä tai useammasta peruselementistä, akkukennosta, yhteisessä kotelossa. Kennot on yhdistetty toisiinsa sarja- ja rinnankytkennöillä, kuormalaitteen edellyttämän jännitteen ja virranantokyvyn saavuttamiseksi (Beard & Reddy, 2019). Kennon toiminta perustuu sähkökemiallisiin hapettumis- ja pelkistymisreaktioihin, jotka sitovat ja vapauttavat sähköenergiaa. Vuosien varrella on kehitetty lukuisia eri kemikaaleihin perustuvia kennotyyppejä. Kennotyypit eroavat ominaisuuksiltaan merkittävästi, ja näin ollen eri tyypit soveltuvat parhaiten eri käyttökohteisiin. Litiumioniakut (Li-ion) ovat nykyaikana yleistyneet etenkin kannettavan elektroniikan akkutyypinä. Litiumiin perustuvilla akuilla on ominaista muihin akkutyyppeihin verrattuna korkea energia-massasuhde eli energiatiheys. Tämän ansiosta akku voidaan suunnitella kevyeksi, mikä on toivottava ominaisuus erityisesti kannettavien laitteiden akuissa. Ennen litiumakkujen kehittämistä suosittiin vastaavissa käyttökohteissa nikkelikadmium (NiCd) - ja nikkelimetallihydridiakkuja (NiMH). (Boddula, 2020).

Akun kyky varastoida ja luovuttaa energiaa heikkenee iän ja käyttösykliä myötä, tehden lopulta laitteen käytön mahdottomaksi. Usein itse kuormalaite ja mahdollinen akkulaturi pysyvät kuitenkin käyttökelpoisina akkua pidempään, jolloin laitteen käytön jatkamiseksi

edessä on uuden, korvaavan akun ostaminen. Toinen keino laitteen toimintakuntoon palauttamiseksi on korvata tee-se-itse-hengessä ikääntyneen akun kennot uusilla. Uudelleenkennotaminen voi olla houkutteleva vaihtoehto erityisesti silloin, kun kyseessä on vanha sähkölaite ja uuden akun hankinta on vaikkapa hinnan tai saatavuuden vuoksi ongelmallista.

Kuten mainittu, litiumioniakkujen yleistymistä vanhempien sähkölaitteiden akut ovat useimmiten nikkelpohjaisia (NiCd tai NiMH). Tällaisen akun uudelleenkennotamista harkitessa voi herätä ajatus kehittyneempien litiumionikennojen käyttämisestä korvaavina kennoina, jolloin akusta olisi mahdollista tehdä sekä kevyempi, että kapasiteetiltaan suurempi. Koska eri elektrolyytteihin perustuvat kennot kuitenkin eroavat merkittävästi ominaisuuksiltaan, kennotyyppien vaihdoksen onnistuminen ja turvallisuus edellyttävät huolellista taustatutkimusta.

Tämän työn tavoitteena on selvittää kirjallisuustutkimuksen keinoin, mitä esteitä, ongelmia ja huomioita liittyy käsikokoisen, nikkelpohjaisen akun kennojen korvaamiseen litiumionikennoilla. Työ toteutetaan keräämällä tietoa kennotyyppien välisistä eroista kirjallisuudesta ja esimerkkituotteiden datalehdistä. Tulokset kappaleessa tehdään kerätyn tiedon pohjalta päätelmiä, joilla pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Minkälaisia muutoksia akun sähköiseen ja mekaaniseen rakenteeseen NiMH-kennojen korvaaminen Li-ion-kennoilla vaatisi?
- Mitä ongelmia tai huomioonotettavaa kennojen vaihtamisessa ilmenisi?
- Miten kennotyyppien vaihtaminen vaikuttaisi akun lataukseen ja kuormalaitteen käyttöön?
- Onko vanhan nikkelpohjaisen akun laturin käyttäminen mahdollista litiumionikennoista rakennetun akun kanssa?

Lopuksi käydään läpi työn oleellisimmat tulokset ja huomiot, ja tarkastellaan työn sovellettavuutta ja rajoitteita.

2 Tulokset

Nikkelikadmiumakut olivat merkittävä taustatekijä käsikokoisten sähkölaitteiden yleistymiselle, sillä NiCd-kennojen energiatiheys – akun varastoima energia suhteessa sen massaan – on merkittävästi lyijyakkua suurempi (Boddula, 2020). Nikkelikadmiumkennojen sisältämä kadmium on kuitenkin myrkyllinen raskasmetalli, minkä takia NiCd-kennoja pyritään nykyään poistamaan kierrosta. Vuonna 2008 NiCd-akuille asetettiin markkinoillesaattamiskielto, lukuun ottamatta muutamia poikkeuksia, kuten hätä- ja varajärjestelmät (Valtioneuvosto, 2008). NiCd korvaajaksi saatettiin markkinoille vuonna 1989 nikkelimetallihydridikennot, jotka eivät sisällä kadmiumia, mutta ovat ominaisuuksiltaan verrannollisia NiCd-kennoihin (Beard & Reddy, 2019).

Vaikka NiCd- ja NiMH-kennojen ominaisuuksissa on myös pieniä eroja, eroavaisuudet eivät ole merkittäviä tämän työn kannalta. Näin ollen nikkelikennotyyppejä voidaan pitää työn kontekstissa keskenään vaihtokelpoisina. Työssä puhutaan kuitenkin pääasiassa NiMH-kennoista, koska NiCd-akut ovat edellä mainitusta markkinoillesaattamiskiellosta johtuen verrattain harvinaisia. Oleellista on siis huomioida, että kaikki työssä käsitellyt seikat pätevät siis kumpaankin nikkelikennotyyppiin.

2.1 Turvallisuus

Merkittävin ero kennotyyppien välillä on turvallisuus; litium on alkalimetallina erittäin reaktiivinen aine, ja litiumkennot voivat väärinkäytettyinä tai vaurioitettuina aiheuttaa tuhovoimaisia tulipaloja tai räjähdyksiä (Puranen, 2019). Li-ion kennon vikaantuminen johtaa tyypillisesti termiseen karkaamiseen eli lämpökarkaamiseen. Lämpökarkaamisessa kennon sisäisen kemian epävakaudentua sen lämpötila kohoaa, ja kohonnut lämpötila puolestaan kiihdyttää reaktiota entisestään positiivisen takaisinkytkennän tavoin. Lämpökarkaaminen päättyy tulipaloon ja/tai räjähdykseen, ja reaktion karattua akkupalaa ei voida enää estää. Usean kennon kokoonpanossa yhden kennon hallitsematon lämpökarkaaminen leviää vielä mahdollisesti ketjureaktiona ympäröiviin kennoihin, moninkertaistaen akkupalon tuhovoiman (Zhou, et al., 2020). Lämpökarkaamisen alkusyitä ovat:

Sähköinen rasitus:

- Liialliset purku- ja latausvirrat,
- Kennon ylilataaminen,
- Kennon purkaminen liian alhaiseen varaustasoon.

Terminen rasitus:

- Äärimmäiset ympäristön lämpötilat,
- Kennon riittämätön jäähditys.

Litiumin reaktiivisuuden vuoksi myös mekaaninen rasitus, kuten kennon murskautuminen tai puhkeaminen johtaa usein termiseen karkaamiseen. (Pistoia, 2014).

Nikkelikennot ovat vikatilanteessa turvallisempia eivätkä ne räjähdä Li-ionin tavoin. Väärinkäytettyinä ne voivat kylläkin kuumentua merkittävästi, ja kennon kuori voi äärimmäisessä tapauksessa puhjeta. Koska työssä suunnitellaan kennotyypin vaihtamista vikatilanteesta huomattavasti vaarallisempaan Li-ioniin, kennovaihdoksen taustatutkimuksessa ja toteutuksessa on välttämätöntä pitää turvallisuus ensimmäisenä prioriteettina. Käytännön tasolla litiumkennojen vikaantumisoimaisuudet esimerkiksi edellyttävät asentamaan litiumakkuihin erilliset suojapiirit, joita käsitellään enemmän työssä niille omistetussa kappaleessa.

Omatoimisesti sähkölaitetta korjattaessa tai muokatessa on lisäksi huomioitava, että sähköturvallisuuslain mukaan sähkölaitteen myyjällä tai lahjoittajalla on aina vastuu laitteen turvallisuudesta ja asiaan kuuluvien tietojen luovuttamisesta eteenpäin (Sähköturvallisuuslaki, 2016). Näin ollen itse rakennetun akun myyminen tai antaminen eteenpäin ei ole missään nimessä suositeltavaa.

2.2 Kennojen topologia

Konversioakkua rakentaessa on luonnollisesti tavoitteena saavuttaa alkuperäistä akkua vastaavat ominaisuudet, jotta uusioakku olisi yhteensopiva kuormalaitteen kanssa. Käytön kannalta akun oleelliset ominaisuudet ovat napajännite, kapasiteetti ja virranantokyky eli suurin sallittu purkuvirta. Näihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa kennotopologialla eli sillä,

kuinka yksittäisiä kennoja on kytketty akun sisällä sarjaan ja rinnan. Lisäksi varsinkin kapasiteettiin ja virranantokykyyn voidaan vaikuttaa kennojen merkin ja mallin valinnalla, sillä valmistajat painottavat eri ominaisuuksia erityyppisiin sovelluksiin tarkoitetuissa kennoissa.

Riippumatta merkin ja mallin valinnasta on kuitenkin ensiarvoisen tärkeää käyttää projektissa ainoastaan samanikäisiä ja sähköisiltä ominaisuuksiltaan vastaavia kennoja. Kennojen epäsymmetria luo turvallisuusriskin aiheuttamalla erityisesti akun ikääntyessä kumuloituvaa, suhteetonta rasiutusta heikoimmille kennoille. (Beard & Reddy, 2019)

2.2.1 Sarjakytkentä

Kun yksittäisiä kennoja kytketään sarjaan, ketjun napajännitteeksi muodostuu yksittäisten kennojen napajännitteiden summa. Akun tavoiteltu napajännite voidaan siis saavuttaa kytkemällä useita kennoja sarjaan. Ketjun kapasiteetti sen sijaan ei summaudu, vaan vastaa yksittäisen kennon kapasiteettia. Kennojen sarjakytkennän ominaisuuksia on havainnollistettu kuvassa 1.

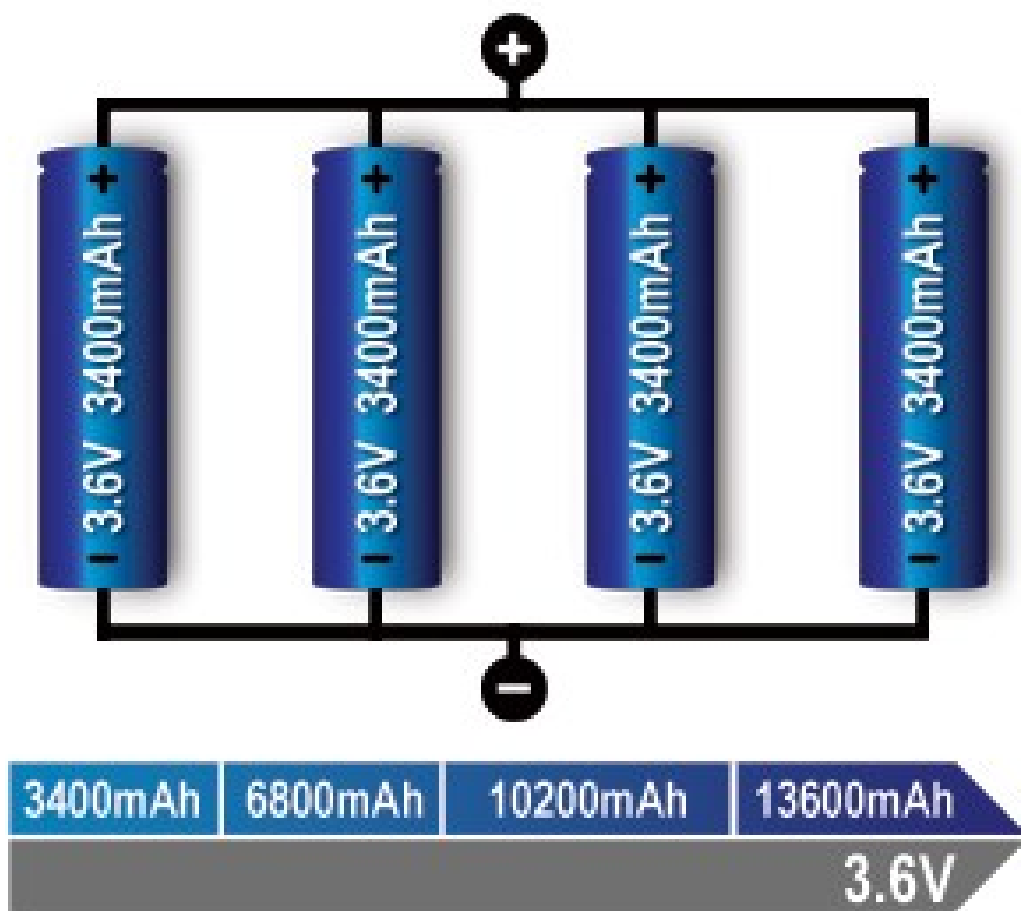


Kuva 1. Havainnekuva neljän kennon sarjakytketystä ketjusta ja sen jännitteestä ja kapasiteetista (BatteryUniversity, 2021a).

Ketjun lävitse kulkeva virta on kennoille yhteinen, joten ketjun virranantokyky on sama kuin yksittäisellä kennolla. Lisäksi on huomattava, että sarjaan kytketyssä ketjussa yhden kennon vikaantuminen saattaa koko ketjun toimintakyvyttömäksi. Turvallisuuden kannalta on tärkeää, ettei yksittäinen kenno pääse purkautumaan muihin kennoihin verrattuna liian alhaiseen varaukseen. Epäsymmetria voi aiheuttaa ylipurkautuvan kennon jännitteen voimakkaan laskemisen ja jopa napaisuuden kääntymisen, jonka seurauksena kenno voi syttyä palamaan tai räjähtää. Symmetria täytyy ylläpitää asentamalla akkuun erillinen suojapiiri, joka tarkkailee ketjun yksittäisten kennojen jännitettä (Beard & Reddy, 2019). Suojapiirejä käsitellään lisää niille omistetussa kappaleessa.

2.2.2 Rinnankytkentä

Rinnankytketyt kennot muodostavat lohkon, joka vastaa sähköisiltä ominaisuuksiltaan ikään kuin yhtä, suurempikapasiteetillista kennoa. Lohkon napajännite on sama kuin yksittäisen kennon napajännite, mutta lohkon kapasiteetti on yksittäisten kennojen kapasiteettien summa. Rinnankytkentää on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Neljän kennon rinnankytkennästä. Kennojen alapuolella esitetty palkki havainnollistaa kapasiteetin summautumista (BatteryUniversity, 2021a).

Rinnankytkennän tapauksessa lohkon läpi kulkeva virta jakautuu yksittäisten kennojen läpi, joten lohkon nimellinen virranantokyky on yksittäisten kennojen maksimivirtojen summa. Rinnankytkennöillä voidaan siis nostaa akun kokonaisvirranantokykyä. Turvallisuuden kannalta virran jakautuminen tarkoittaa myös sitä, että yksittäisen kennon päätyessä vikaantuttuaan oikosulkitilaan, pääsevät rinnakkaiset kennot purkautumaan sen lävitse aiheuttaen

2.3 Suojapiirit

Kuten aikaisemmissa kappaleissa on mainittu, Li-ion- akku vaatii poikkeuksetta erillisen suojapiirin henkilö- ja materiaalivahinkojen välttämiseksi. Kennoon voi olla sen mallista ja geometriasta riippuen integroitu erilaisia passiivisia suojalaitteita, joiden tehtävänä on vika-tilassa erottaa kenno ympäröivästä virtapiiristä lämpökarkaamisen estämiseksi. Tällaisia suojalaitteita ovat esimerkiksi PTC-termistorit (eng. Positive Thermal Coefficient, positiivinen lämpökerroin) ja erilaiset painesulakkeet. Suunnittelun kannalta oleellista on huomata, että nämä laitteet on tarkoitettu nimenomaan viimeiseksi keinoksi katastrofaalista vikaantumista vastaan, eivätkä ne näin ollen korvaa tai täydennä varsinaista ulkoista suojapiiriä. (Pistoia, 2014).

2.3.1 PCM (Protection Circuit Module, suojapiirimoduuli)

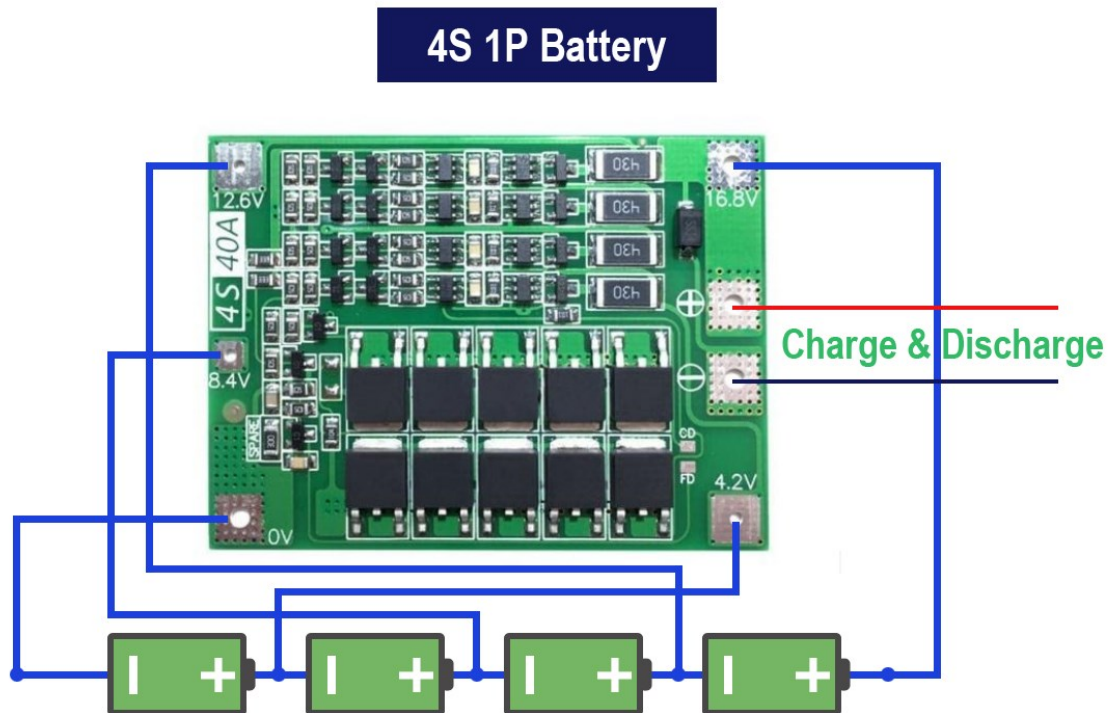
Vähimmäisvaatimuksena litiumioniakulle on yksinkertaisen perussuojauksen toteuttava PCM (eng. Protection Circuit Module, suojapiirimoduuli). PCM on suojaa kennoja ylilataukselta, ylipurkamiselta ja ylikuormitus- ja oikosulkuvirralla. Edistyksellisempi PCM voi myös sisältää lämpötila-antureita ylikuumentumisen hallintaan. Markkinoilla on useita tuotevaihtoehtoja ja valinta on tehtävä kunkin sovelluksen mukaisesti.

Valintakriteerinä PCM:lle on tietenkin, että suojapiirin sähköiset ominaisuudet kuten virtarajat soveltuvat valituille kennoille. Topologian kanssa on pelivaraa; voidaan esimerkiksi asentaa jokaiselle kennolle erillinen pieni moduuli, tai kaikille kennoille yhteinen, suurempi piiri. Yksittäiset moduulit eivät usean kennon kokoonpanossa kuitenkaan kommunikoi keskenään. Siispä etenkin suurempien kokoonpanojen kanssa on suositeltavampaa valita kennojen topologialle ja määrälle sopiva, laajempi moduuli.

2.3.2 BMS (Battery Management System, akunhallintajärjestelmä)

BMS on edistyksellisempi akun hallintapiiri, joka sisältää sekä PCM:n suojaustoiminnallisuuden, että monia lisäominaisuuksia, jotka optimoivat akun suorituskykyä ja käyttöikä. Oleellisin lisäominaisuus on varaustason tasapainotus yksittäisten kennojen välillä. Tässäkin tapauksessa sopivan piirin valintaan vaikuttaa akun kennotopologia ja tavoitellut sähköiset

ominaisuudet. Suorituskykyä ja käyttöikää parantavien toimintojensa ansiosta BMS:n valitseminen suppeamman suojapiirin sijaan on suositeltavaa etenkin suuremmille akuille. (Pistoia 2014). Alla on esimerkkikuva neljän kennon BMS-piiristä.



Kuva 4. Havainnekuva neljän sarjakytketyn kennon BMS-piiristä, johon on piirretty kennojen symbolit ja kytkennät vastaaville paikoilleen (Bhowmick, 2022).

Kuten kuvasta käy ilmi, BMS-piiri asettuu kytkennässä akun ja kuormalaitteen tai laturin väliin. Akun kotelon kannalta on huomioitava, että piiri vaatii tilaa, mikä asettaa lisävaatimuksia akun kotelon suunnittelulle.

2.4 Kennojen sähköiset ominaisuudet

Uusien kennojen tarvittavan määrän ja topologian selvittämiseksi on vertailtava kennotyyppien sähköisten ominaisuuksien eroja. Uuden kokoonpanon pääasialliset määrittävät ominaisuudet ovat kennon nimellinen napajännite ja virranantokyky, mutta on hyödyllistä tarkastella myös muita ominaisuuksia, esimerkiksi valmiin akun suorituskyvyn arvioimiseksi.

Taulukkoon 1 on kerätty NiMH- ja Li-ion-kennojen työn kannalta oleellisia sähköisiä ominaisuuksia.

Taulukko 1. Esimerkkikennojen sähköiset ominaisuudet valmistajien datalehdiltä. Kolmella viimeisellä rivillä on nikkelimetallihydridi- ja litiumionikennojen muita yleisiä kiinnostavia ominaisuuksia (Beard & Reddy, 2019).

Ominaisuus	Panasonic BK450A (NiMH)	Molicel P28A (Li-ion)
Jännite, nimellinen [V]	1,2	3,6
Jännite, lataus [V]	1,4	4,2
Jännite, loppu [V]	1,0	2,5
Kapasiteetti [mAh]	4200	2600
Sisäinen resistanssi [$m\Omega$]	25	20
Purkuvirta, maksimi [A]	Ei suoraan ilmoitettu	35
Latausvirta, standardi [mA]	420	2800
Latausvirta, maksimi [mA]	2000	6000
Energiatiheys [Wh/kg]	82,6	220
Itsepurkautuvuus [%/kk] *	15 - 25	2
Käyttöikä lataussykleinä *	300 - 1000	500 - 10000
Muita huomioita *	Muisti-ilmiö, jos toistuvia osittaisia purku-lataussyklejä	Huomattavasti jyrkemmät turvallisuusvaatimukset

Taulukon 1 tietojen pohjalta voidaan tehdä päätelmiä konversioakun tarvittavasta kennotopologiasta ja arvioida akun mahdollista suorituskykyä entiseen verrattuna. Li-ion-kennon nimellinen napajännite on tasan kolminkertainen NiMH-kennoon verrattuna. Saman jännitteen saavuttamiseksi tarvitaan sarjakytkettyjä Li-ion-kennoja siis kolmasosa. Litiumionikennojen energiatiheys on noin kaksinkertainen, mikä mahdollistaa kevyemmän akun vastaavalla kapasiteetilla.

Myös litiumioniakun käyttöikä voi olla pidempi, tosin kennojen mallilla ja lataus- ja kuormitusprofiileilla on tähän suuri vaikutus. Li-ionilla saavutetaan myös vähäinen itsepurkautuvuus. Tämä on edullinen ominaisuus erityisesti silloin, kun akkua käytetään ja ladataan harvakseltaan, kuten monelle kodin sähkölaiteelle ja sähkötyökalulle on tyypillistä. Myöskään osittaisilla käyttösykleillä syntyvää, kapasiteettia alentavaa muisti-ilmiötä ei litiumkennoilla esiinny.

On syytä huomioida, että tässä kappaleessa käytetään vertailuun nimenomaan modernien nikkelimetallihydridikemien tietoja. NiMH-kennot ilmestyivät markkinoille 1980-luvun lopussa, ja ovat luonnollisesti tähän päivään mennessä kehittyneet suorituskyvyltään. Esimerkiksi energiatiheys on nykyaikaisessa NiMH-kennossa jopa kaksinkertainen verrattuna aikaisiin malleihin (Beard & Reddy, 2019). Muunnostyön suunnittelun kannalta tällä ei ole muuta merkitystä, kuin että valmis konversioakku voi olla ominaisuuksiltaan alkuperäiseen verrattuna vielä suotuisampi, kuin modernien kemien tietoja vertaamalla voitaisiin olettaa.

Myös suurin sallittu latausvirta on litiumionikennolla moninkertainen; tämän merkitystä vanhan laturin soveltuvuudelle tarkastellaan lisää kappaleessa 2.6. Huomattava seikka on, ettei NiMH-kennolle ole erikseen ilmoitettua purkuvirran maksimiarvoa. Nikkelikemien suhteellinen turvallisuus vikatilanteessa ei aseta samanlaisia ”kovia” vaatimuksia kemien maksimipurkuvirralla kuin litiumionikennolle, vaan rajoittaviksi tekijöiksi muodostuu NiMH:in osalta sisäresistanssin aiheuttama napajännitteen putoaminen ja lämpötilan nousu, sekä käyttöiän lyheneminen liiallisessa kuormituksessa ja käyttölämpötilassa. Mikäli haluaa tarkkaa tietoa maksimivirrasta, on paras menettely varmasti ottaa yhteyttä suoraan valmistajaan. Kaiken kaikkiaan edellä käsiteltyjen seikkojen valossa kemityypin vaihtaminen Li-ioniin vaikuttaa varsin houkuttelevalta, sillä vaihdoksella olisi saavutettavissa huomattavaa lisäsuorituskykyä.

2.4.1 Napajännite

Li-ion- kemien kolminkertaisen nimellijännitteen vuoksi nikkelikemien korvaaminen litiumkemien kanssa suoraan entiseen topologiaan ei selvästikään onnistu. Samasta syystä alle 3,6 voltin napajännitteen akku ei ole toteutettavissa ilman jännitteen alentamista erikseen. Kuitenkin litiumkemien jännite vastaa juuri sopivasti kolmea sarjaan kytkettyä nikkelikemien, eli jännitteen kannalta vaihto voidaan tehdä helposti, jos vanha akku koostuu yhdestä tai useammasta nikkelikemien ketjusta siten, että kussakin ketjussa sarjaan kytkettyjen kemien määrä on kolmella jaollinen. Toisin muotoiltuna parhaiten vaihtotyöhön sopivat akun nimellijännitteet ovat 3,6 V, 7,2 V, 10,8 V, 14,4 V, 18 V ja niin edespäin.

Nikkelipohjaisten akkujen jännitteet eivät tietenkään aina osu tasan ylempänä mainittuihin arvoihin, joten on mahdollista, ettei vanhaa akkua vastaavaa napajännitettä kyetä saavuttamaan. Tällöin on mahdollisuuksien mukaan selvitettävä, voisivatko lähimmät toteutettavissa

olevat arvot soveltua kuormalaitteelle. Esimerkiksi 12 V nikkeliakun kuormalaite saattaisi toimia moitteetta 14,4 V konversioakun kanssa. Tämäkin seikka on laitekohtainen, eikä sille tämän työn puitteissa voida ilmoittaa yleispätevää sääntöä.

2.4.2 Purku- ja latausvirrat

Vanhan akun kennojen virranantokyvystä voi olla vaikeaa varmistua. Suositeltavin tapa varmistua virranantokyvyn riittävydestä on selvittää maksimivirta kuormalaitteen tiedoista, tai jopa mittaamalla suoraan laitteesta. Käyttämällä uudessa akussa vanhaa vastaavaa määrää rinnankytkettyjä kennoja saavutetaan todennäköisesti turvallinen ja toimiva topologia, muttei tätäkään voida pitää yleispätevänä sääntönä. Sopivasta virtojen mitoituksesta on joka tapauksessa varmistuttava, sillä kennojen väärinkäyttö luo vakavan turvallisuusriskin.

2.5 Kennojen mekaaniset ominaisuudet

Kun kennojen määrä ja topologia on tavoiteltujen sähköisten ominaisuuksien saavuttamiseksi suunniteltu, täytyy vielä tarkastella mekaaniseen toteutukseen vaikuttavia tekijöitä.

2.5.1 Kennojen mitat ja kotelointi

Kennoja on saatavilla erimuotoisina, mikä antaa joustavuutta akun mekaaniseen suunnitteluun. Sylinterimäiset, sormiparistoa muistuttavat kennot ovat varsin yleisiä käsikokoisissa akuissa. Vanhat nikkeliakut koostuvat tyypillisesti sylinterimallisista kennoista, joiden mitat vastaavat usein yleisiä paristokokoja (Beard & Reddy, 2019). Litiumkennon yleinen muoto on 18650- sylinterimalli (18 mm halkaisija, 650 mm korkeus).

Oleellista on huomata, että sylinterimäisten kennomallien kokoerojen takia vaihtaminen ei todennäköisesti onnistu suoraan, vaan koteloa voi joutua muokkaamaan. Kennoja on saatavana myös suorakulmion muotoisissa eli prismaattisissa purkki- ja pussimuodoissa. Prismaattisten kennojen tilankäyttö - etenkin ohuiden ja pussimaisten tapauksessa - voisi olla sylinterimäisiin kennoihin verrattuna tehokkaampaa.

Etenkin suurehkoa akkua rakentaessa on todennäköisesti tarpeen muokata koteloa, jotta uudet kennot ja mahdollisen BMS-moduulin saa mahtumaan. Myös kokonaan uuden kotelon rakentaminen voi tulla eteen, esimerkiksi jos vanhaa koteloa ei saa purettua ehjänä. Kotelon suunnittelu ja toteutus on tapauskohtaista ja riippuu tekijän taidoista ja mieltymyksistä, eikä siihen ole tarkoitus syventyä tässä työssä sen yksityiskohtaisemmin. Koteloinnin kannalta prismaattiset tai pussimaiset kennot voivat olla houkuttelevin vaihtoehto konversioprojektiin, sillä ne mahdollistavat tehokkaan tilankäytön muotonsa puolesta.

2.5.2 Kennojen kytkeminen toisiinsa

Kennojen määrän ja topologian suunnittelun lisäksi on tietenkin harkittava, kuinka kennot kytketään toisiinsa fyysisesti. Kuten koteloinninkin kanssa, tekijällä on useita vaihtoehtoja, joiden soveltuvuutta täytyy punnita tapauskohtaisesti.

Sylinterimäisille kennoille on olemassa adaptereja, joiden sisälle voidaan asentaa useampi kenno rinnankytkentään ilman lopullista kiinnitystä. Adapteriratkaisu mahdollistaisi ns. puolikiinteän asennuksen, josta voisi irrottaa yksittäisiä kennoja jälkeinpäin pienellä vaivalla. Haittapuolena adapterit vievät ylimääräistä tilaa kotelon sisältä. Lisäksi normaalivoimaan ja kitkaan perustuva kontakti on kiinteään asennukseen verrattuna epävarma.

Toimintavarmin ja pysyvin tapa on yhdistää kennot kiinteästi nikkelikaistaleilla pistehitsaamalla. Kääntöpuolena tällainen toteutus vaatii asiaan kuuluvat työkalut ja tarvikkeet. Toinen, ehkäpä helpompi tapa tehdä kiinteä asennus on hankkia kennot, joissa on valmiina erilliset korvakkeet juottamista varten. Tällaisella ratkaisulla voidaan välttää pistehitsauksen tarve, sillä kytkeminen onnistuu juotostyökaluilla. (Beard & Reddy, 2019).

2.5.3 Jäähdytys

Käsikokoisten laitteiden akuissa ei tyypillisesti käytetä aktiivista jäähdytystä. Akkupalot etenevät tyypillisesti termisen karkaamisen seurauksena kennosta toiseen ketjureaktiona, joten riskien minimoimiseksi on jäähdytyksen riittävydestä kuitenkin syytä varmistua. Kennojen lämmöntuottoa voi arvioida tapauskohtaisesti valmistajien antamien tietojen perusteella, kun akun kokoonpano, käyttöolosuhteet ja kuormitus- ja latausvirrat tunnetaan.

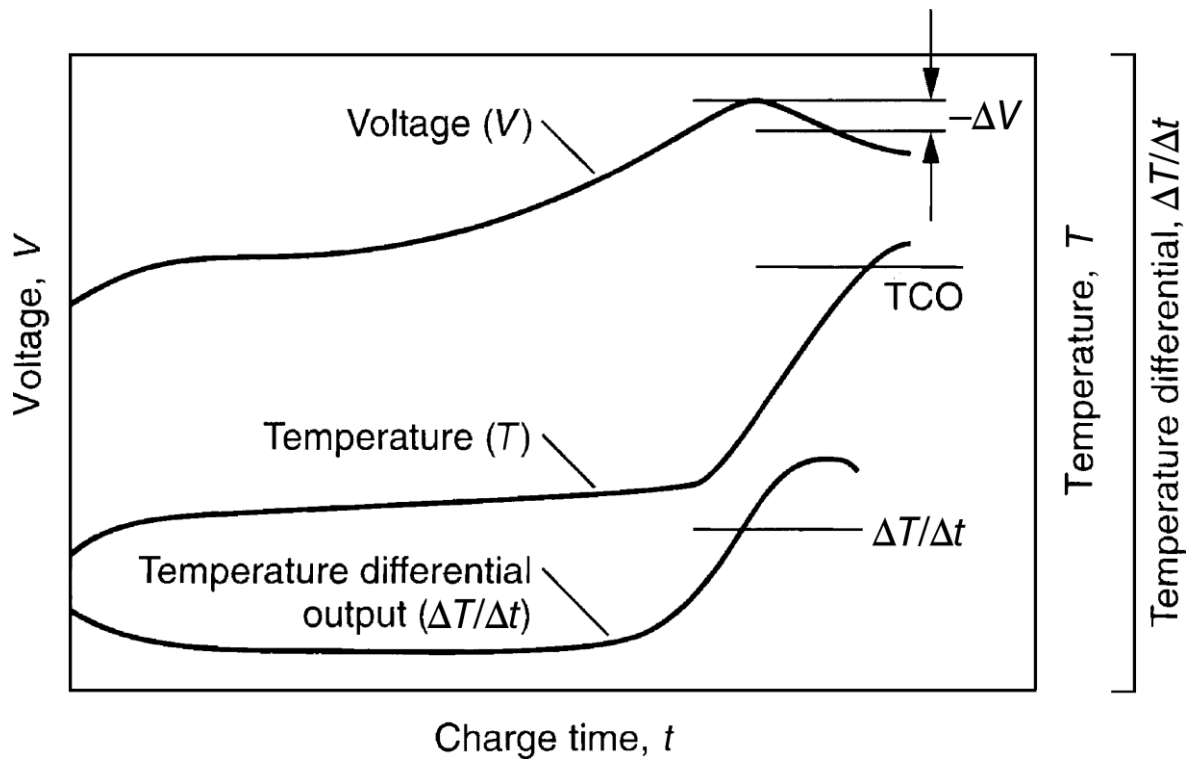
Riittävän alhaisen käyttölämpötilan ylläpitämiseksi on syytä välttää liian lämpöeristävän materiaalin käyttöä kotelorakenteissa. Lisäksi kennojen pakkaaminen koteloon liian tiiviisti voi haitata jäähtymistä, erityisesti kun käytetään prismaattisia tai pussimaisia kennoja. Suurten akkukokoonpanojen ja kuormavirtojen tapauksessa voisi tulla kyseeseen harkita jäähdytystä pakotetulla konvektiolla, kuten yhdellä tai useammalla koteloon asennettavalla tuulettimella. Lisäturvallisuutta voitaisiin saavuttaa kapseloimalla kennot sopivalla rakenteella siten, ettei kennon terminen karkaaminen leviäisi vikatilanteessa ympäröiviin kennoihin (Beard & Reddy, 2019). Tällainen ratkaisu vaatii kuitenkin jo tarkempaa taustatietoa ja suunnittelua, eikä varsinaisesti kuulu tämän työn rajaukseen. Mikäli kennojen lämpeneminen käytössä huolestuttaa, olisi paikallaan harkita rinnankytkettyjen kennojen määrän lisäämistä kokoonpanossa, yksittäisen kennon termisen rasituksen vähentämiseksi. (Warner, 2015).

2.6 Laturi ja lataaminen

Vanhan laturin yhteensopivuutta konversioakun kanssa voidaan arvioida tarkastelemalla NiMH- ja Li-ion- kennoille tyypillisiä latauskäyriä ja niihin yleisimmin sovellettavia lataus-algoritmeja.

2.6.1 Nikkelikennojen latausalgoritmit

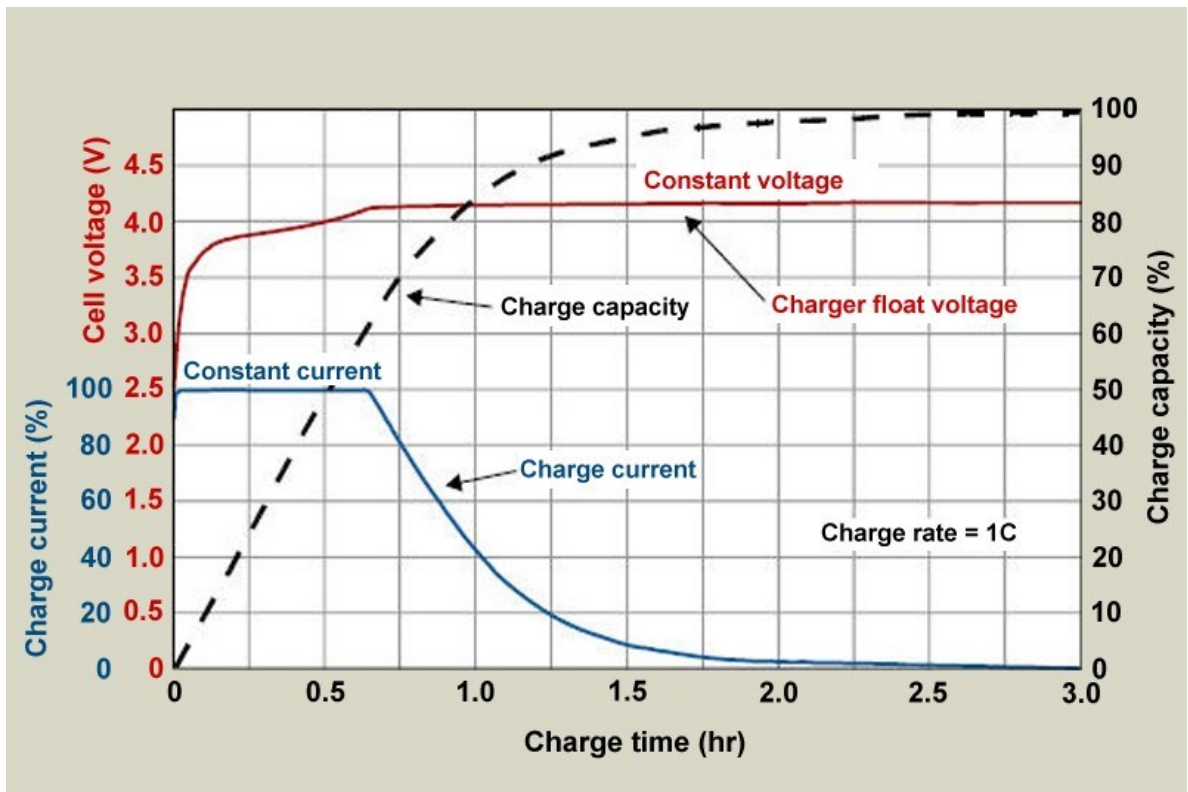
Nikkelikennoille on ominaista latauksen loppuvaiheessa tapahtuva lämpötilan nousu. Lämpötilan noususta seuraa napajännitteen äkillinen kohoaminen huippuarvoon ja sen jälkeinen jyrkkä lasku. NiCd- ja NiMH- kennojen latureissa käytetään tyypillisesti latausalgoritmeja, jotka hyödyntävät tätä ilmiötä ylilatauksen estämiseksi. Laturi tarkkailee algoritmista riippuen napajännitettä tai lämpötilaa ja pysäyttää latauksen havaitessaan tarkkailtavassa suuressa nopean muutoksen. Nikkeliakun tyypillistä latauskäyrää ja algoritmeja on havainnollistettu Kuva 5.



Kuva 5. Tyypillinen nikkelikennon latauskäyrä, jossa lämpötilan ja napajännitteen lisäksi on kuvattuna lämpötilan muutosnopeus. Kuvaajasta voidaan nähdä latauksen lopussa tapahtuva nopea nousu kussakin suureessa. (Beard & Reddy, 2019).

2.6.2 CC/CV- algoritmi

Litiumionikenoilla ei esiinny jännitteen muutosilmiötä, joten niitä ladataan CC/CV- algoritmilla (*constant current/constant voltage*). Laturi syöttää latauksen alkuvaiheessa akkuun vakiovirtaa, kunnes akun latautuessa sen napajännite ylittää ennalta asetetun raja-arvon. Tällöin laturi vaihtaa vakiojännitetilaan, eli pitää laturin lähtöjännitteen ennalta asetetussa vakioarvossa. Akun latautuessa loppuun latausjännitteen ja akun napajännitteen ero kuroutuu umpeen, jolloin latausvirta tyrehtyy häviävän pieneksi ja ylilatautuminen vältetään. Alla on esitetty litiumioniakun tyypillinen latauskäyrä CC/CV- latausalgoritmilla.



Kuva 6. Tyypillinen litiumioniakun latauskäyrä, josta voidaan nähdä virran ja jännitteen käyttäytyminen latauksen vakiovirta- ja vakiojännitealueilla. Huomattavaa on, että nikkeli-kennoille tyypillistä äkillistä nousuilmiötä ei esiinny Li-ion-kennoilla. (Beard & Reddy, 2019).

2.6.3 Vanhan laturin soveltuvuus

Koska kennotyyppien latauskäyrät ja niille soveltuvat latausalgoritmit eroavat merkittävästi, ei yleisessä tapauksessa vanhan nikkeliakun laturin käyttöä uusioakun kanssa voida suositella. Teoriassa konversioakun lataaminen voisi kyllä onnistua, mutta laturi ei saisi latauksen lopussa Li-ion-kennoilta tarvittavaa keskeytyssignaalia. Näin ollen akun räjähtämättömyys olisi täysin sen varassa, keskeyttääkö BMS tai PCM latauksen laturin puolesta. Suojapiirejä ei ole lähtökohtaisesti suunniteltu tällaiseen jatkuvaan katkomiseen, eikä tällaista menettelyä voida näin ollen pitää turvallisena.

Latausvirran suuruus ei välttämättä olisi este vanhan laturin käytölle, mutta asiasta tulisi varmistua asianmukaisilla mittauksilla. Lataaminen olisi todennäköisesti vanhalla laturilla toivottua hitaampaa pienemmän latausvirran takia. Toisaalta hidas lataus on yleisesti ottaen akun käyttöiän kannalta optimaalisempaa (Pistoia, 2014). Moderneja latureita erilaisilla

lisäominaisuuksilla on kuitenkin nykypäivänä runsaasti markkinoilla, eikä konversioprojekti näin ollen kaadu vanhan laturin hylkäämiseen.

3 Johtopäätökset

Yhteenvedona voidaan työn löydösten valossa todeta akun kennotyyppin vaihdoksen olevan mahdollista, muttei turvallisuuden vuoksi suositeltavaa. Mikäli vaihdoksen haluaa toteuttaa, on otettava huomioon seuraavat työssä käsitellyt asiat:

Turvallisuuden on oltava vaihdostyössä pääprioriteetti, sillä Li-ion- kennot aiheuttavat vika-tilanteessa suuren paloturvallisuusriskin. Turvallisuuden vuoksi akkuun on lisäksi välttämättä asentaa erillinen suojapiiri; vähimmäisvaatimuksena on pidettävä yksinkertaisimmat suojatoiminnallisuudet toteuttava PCM, suuremmille akuille on suositeltavaa asentaa monipuolisempi BMS, joka optimoi kennojen suorituskykyä ja käyttöikä. Lisäturvallisuutta toisi rinnankytketyille kennoille asennetut sulakkeet.

Kennotopologiaa on muokattava entiseen akkuun verrattuna, koska litiumkennojen nimellinen napajännite on nikkeli-kennoja korkeampi. Käytettävien osien ominaisuudet on mitoitettava huolellisesti, mieluiten perustuen kuormalaitteesta mitattuihin arvoihin. Akun kotelon rakentamisessa on syytä välttää liiallista lämpöeristystä riittävän jäähdytyksen turvaamiseksi.

Vanhan laturin käyttäminen on sopimattoman latausalgoritmin vuoksi riskialtista, eikä sitä voida suositella. Teoriassa se olisi kuitenkin mahdollista, mikäli suojapiiri on valittu asianmukaisesti. Turvallisuuden varmistamiseksi suositellaan ylipäätään maalaisjärkeä ja hyviä käytäntöjä; esimerkiksi valmiin konversioakun merkitseminen sellaiseksi on paikallaan. Itse rakennetun akun luovuttaminen tai myyminen eteenpäin ei ole suositeltavaa, sillä sähköturvallisuuslain mukaisesti vastuu laitteen turvallisuudesta on sen luovuttajalla.

Työn löydösten valossa voidaan odottaa konversioakulta alkuperäiseen verrattuna parempia ominaisuuksia ja suorituskykyä. Moninkertaisen energiatiheuden ansiosta akku olisi aikaisempaa kevyempi, mutta kapasiteetiltaan suurempi. Akun itsepurkautuvuus olisi merkittävästi entistä pienempi, eikä siinä ilmenisi nikkeli-kennoille ominaista muisti-ilmiötä. Mikäli akun kanssa käytettäisiin vanhan laturin sijaan uusille kennoille optimaalisempaa, modernia laturia, voisi muunnetun akun latausaika olla entiseen akkuun verrattuna lyhyt.

Kokonaisuutena työ tarjoaa kennotyyppin vaihdokseen karkean taustoituksen ja listan oleellisista huomioon otettavista asioista, ja näin ollen voi toimia siltana teorian ja käytännön

toteutuksen välillä. Vaihdoistyön suunnittelu vanhaan akkuun on täynnä tapauskohtaisia ongelmia ja valintoja. Lähemmäksi käytännön tasoa voitaisiin päästä syventymällä yksityiskohtaisemmin komponenttien valintaan ja mitoitukseen. Yksityiskohtaisemmassa tutkimuksessa voitaisiin esimerkiksi koota ohjeita ja nyrkkisääntöjä vaihdostyön toteutukseen henkilöille, joilla on entuudestaan alan tietotaitoa.

Lähteet

BatteryUniversity, 2021a. *BU-302: Series and Parallel Battery Configurations*.
<https://batteryuniversity.com/article/bu-302-series-and-parallel-battery-configurations>
Viitattu 22.5.2023.

BatteryUniversity, 2021b. *BU-409: Charging Lithium-ion*.
<https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>
Viitattu 22.5.2023.

Beard, K. W. & Reddy, B. T., 2019. *Linden's Handbook of batteries*. 5th ed. s.l.:McGraw-Hill Education.

Bhowmick, S., 2022. *Lithium ion battery management and protection module (bms) teardown - schematics, parts list and working*.
<https://circuitdigest.com/electronic-circuits/lithium-ion-battery-management-and-protection-module-bms-teardown-schematics-parts-list-and-working>
Viitattu 22.5.2023.

Boddula, R. e. a., 2020. *Rechargeable Batteries: History, Progress and Applications*. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated.

Pistoia, G., 2014. *Lithium-Ion Batteries Advances and Applications*. 1st ed. s.l.:Elsevier.

Puranen, K., 2019. *Sähköauto syttyi kolmesti – akkupalo on arvaamaton ja vaikea sammuttaa*.
<https://pelastustieto.fi/pelastustoiminta/operatiivinen-toiminta/sahkoauto-syttyi-kolmesti-akkupalo-on-arvaamaton-ja-vaikea-sammuttaa/>
Viitattu 22.5.2023.

Sätköturvallisuuslaki, 2016.
Available at: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2016/20161135#L2P7>
Viitattu 22.5.2023.

Tukes, 2013. *Myös käytetyn sähkötuotteen myyjä ja lahjoittaja on aina vastuussa sähkötuotteen turvallisuudesta*.
<https://tukes.fi/-/myos-kaytetyn-sahkotuotteen-myyja-ja-lahjoittaja-on-aina-vastuussa-sahkotuotteen-turvallisuudes-1>
Viitattu 22.5.2023.

Valtioneuvosto, 2008. *Valtioneuvoston asetus paristoista ja akuista*.
Available at: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2008/20080422>
Viitattu 22.5.2023.

Warner, J. T., 2015. *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design*. s.l.:Elsevier Science & Technology.

Zhou, X. et al., 2020. Research on Lithium-ion Battery Safety Risk Assessment Based on Measured Information. *2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, pp. 2047-2052.