

Energiavarasto tasajännitteen tutkimuslaitteistossa

Mikko Tillander

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2024

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Automaatiotekniikka/sähkövoimatekniikka

TILLANDER, MIKKO:
Energiavarasto tasajännitteen tutkimuslaitteistossa

Opinnäytetyö 92 sivua, joista liitteitä 10 sivua
Toukokuu 2024

Tampereen ammattikorkeakoulu on rakentamassa sähkövoimatekniikan laboratorioon tasajännitteen tutkimuslaitteistoa. Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin, dokumentoitiin ja rakennettiin tutkimuslaitteiston kaksi akkuvaunua. Energiavarastona toimivat vaunut määritettiin laitevalintojen, kaapeloinnin ja liityntöjen osalta yhteensopivaksi järjestelmän muiden laitteiden kanssa. Järjestelmän määrittelyssä oleellisin vaatimus oli rakentaa laitteisto, jonka DC-kiskon jännite on säädettävissä 200-800V ja energiaa voidaan ohjata kiskolle kahteen suuntaan sekä akkuvaunuilta että invertterivaunulta.

Vaunujen akkukomponentiksi valikoitui ajoneuvoakku, joka on kemialtaan litiumtanaatti-tyyppinen. Akkuja on 7 kpl/vaunu ja ensimmäisessä vaunussa on akkujen lisäksi koko akuston ohjausmoduuli. Akkuvaunujen sarjaan tai rinnankytkennällä saavutetaan riittävä akustojännitteen vaihteluväli, jotta DCDC-muunninta käyttämällä päästään DC-kiskojaännitteelle asetettuun tavoitteeseen.

Akkuvaunujen ensimmäisessä versiossa pääpiirin kaapelointi toteutettiin sarjaankytkentänä ja signaalikaapelointi valmistettiin akkujen osalta lopulliseen muotoonsa. Akkuvaunujen dokumentointi viimeisteltiin yksityiskohtaisesti vaunujen asennusten ja järjestelmän yhteensopivuuden varmistamiseksi. Raporttiin muotoiltiin ohjeistusta akuston käsittelylle mm. latausjännitteistä, purkusyvyydestä, säilytyksestä, esilatauksesta ja käyttölämpötilasta. Ohjeistus perustuu akkuvalmistajan ohjeeseen ja LTO-akkujen yleiseen tietoon. Akuston jäähdytystehon tarve arvioitiin ja jäähdytyksen toteuttamiseksi akkuvaunuille luotiin suunnitelmat ja laitteistoehdotukset.

Laitteiston seuraavassa kehitysvaiheessa toteutetaan akkuvaunujen rinnan-/sarjaankytkennän ohjaus järjestelmästä kontaktoreita käyttämällä. Aina käytettäessä korkeaa virtaa akut väistämättä lämpenevät. Jäähdytysjärjestelmän asennus on tarkoitus toteuttaa projektin seuraavassa vaiheessa yhtäaikaisesti invertterivaunun ja keskuksen kokoonpanon kanssa.

Asiasanat: energiavarasto, tasajännite, akku, litium

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering
Electric Power Engineering

TILLANDER, MIKKO:
Energy Storage in Direct Current Research Equipment

Bachelor's thesis 92 pages, appendices 10 pages
May 2024

The purpose of this thesis was to design, document and construct two battery carts for the direct current testing equipment which is being built in electric power engineering laboratory at Tampere University of Applied Sciences.

The main assignment for the testing equipment was to provide adjustable direct voltage of 200-800V on bus bar, as well as take or give power through the DC bus bar from the battery carts and the inverter cart. All system blocks were designed to be compatible with each other to ensure stability and safety of the system.

The first construction phase of the battery carts was concluded by connecting all the batteries in series. During the design and documentation, all the component selections were evaluated and backed up with calculations when necessary. The documentation also included some guidance for handling batteries, all circuit and layout diagrams and battery cart thermal management assessment.

The next phase of the battery cart construction will consist of a connection box manufacturing and cooling system implementation. The connection box will enable the battery carts to be connected in series or parallel using manual switch. The high current use cases will inevitably heat up batteries and cooling system will be implemented in later phase.

Key words: energy storage, direct current, battery, lithium

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	AKKUTEKNOLOGIAT	9
2.1	Akkujen historiaa lyhyesti	9
2.2	Yleisimmät akkutyypit nykyään	11
2.3	Litiumioniakun toimintaperiaate	12
2.4	Suuret akkujen ominaisuuksien vertailussa	15
2.5	Litiumioniakkutyypit	19
2.6	LTO-akun toimintaperiaate ja ominaisuudet	22
2.7	LTO-akun käsittely	23
2.7.1	LTO-akun yleisiä ominaisuuksia	23
2.7.2	Lataus ja kuormitus	24
2.7.3	Lataussyvyyden vaikutukset	26
2.7.4	Lämpötila	28
2.7.5	Yhteenveto akuston käsittelystä	30
3	JÄRJESTELMÄKUVAUS	31
3.1	Järjestelmäkaavio	31
3.2	Pääpiirikaavio	33
3.3	Oikosulku- ja suojaustarkastelut	35
3.3.1	Suojalaitteet	35
3.3.2	Johtimien ja kaapeleiden mitoitus	37
3.3.3	Oikosulkutilanne	38
3.3.4	Potentiaalintasaus	39
4	AKKUVAUNU	42
4.1	Akut	42
4.1.1	Tekniset tiedot	42
4.1.2	Mittaukset	45
4.1.3	Dynaaminen virranhallinta	46
4.1.4	Turvatilaaan siirtyminen	46
4.2	Esilataus	47
4.2.1	Esilatauksen mitoitus	47
4.2.2	Esilatauspiiri PDU:lla	50
4.3	Pääpiirin kytkentäsekvenssi	51
4.4	Akkuvaunujen rakenne	51
4.5	Kytkenäkotelo	53
4.6	Kytkenät ja piirikaaviot	55
4.7	Akuston jännitteet	60

4.8 Akuston lataaminen.....	62
4.9 Jäähdytyspiiri	67
4.9.1 Jäähdytyspiirin tekniset vaatimukset	67
4.9.2 Akuston hukkalämmön laskenta	67
4.9.3 Lauhdutinmodulin tekniset tiedot	70
4.9.4 Kytkenät	73
4.9.5 Jäähdytysneste.....	74
5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	76
LÄHTEET	79
LIITTEET	83
Liite 1. Piirikaaviot ja kuvat.....	83

LYHENTEET JA TERMIT

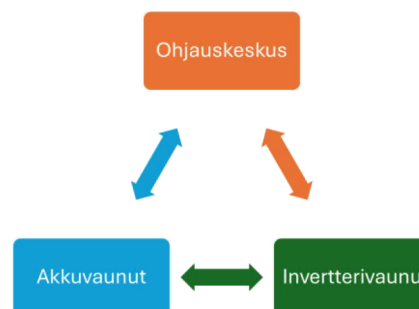
AC, VAC	Vaihtovirta, vaihtovirran jännite
Ah	Ampeeritunti, sähköenergian yksikkö
BMS	Battery management system. Akuston tai kennon ohjain / hallintapiiri.
CCCV	Constant current, constant voltage -lataustapa mm. litiumioniakulle
DC, VDC	Tasavirta, tasajännite
DoD	Depth of discharge, kulutettu varaus/akun nimellinen kapasiteetti (%)
ES	Energy supply, energian lähde
EV	Electrical vehicle, sähköauto
HESS	Hybrid energy supply system. Monituloinen energiajärjestelmä.
HEV	Hybrid electrical vehicle, hybridisähköauto
kWh	kilowattitunti, sähköenergian yksikkö
LCO	Litium-koboltti-oksidi (akkukemia)
LFP	Litium-rauta-fosfaatti (akkukemia)
LMO	Litium-mangaani-oksidi (akkukemia)
LTO	Litium-titanaatti-oksidi (akkukemia)
NCA	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (akkukemia)
NMC	Litium-nikkeli-koboltti-mangaani-oksidi (akkukemia)
PV	Photovoltaic, yleensä aurinkoenergiälähde tai -järjestelmä
SEI	Solid Electrolyte Interphase. Anodin ja elektrolyytin väliin muodostuva passivointikerros
SoC	State of Charge, akussa jäljellä oleva varaus/täyden akun varaus (%)
SoH	State of Health, akun kapasiteetti / uuden akun kapasiteetti (%)

1 JOHDANTO

Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) sähkövoimatekniikan laboratorioon on rakenteilla tasajännitelaitteistojen tutkimusympäristö. Tämän opinnäytetyön tavoite on suunnitella ja rakentaa ajoakkuihin perustuva energiavarasto osana tutkimusympäristöä. Opinnäytetyön tekotapa on toiminnallinen opinnäytetyö, jonka lopputulokset ovat kaksi valmista ja toimivaa akkuvaunua, joiden käyttö ja liitettävyys on suunniteltu muun laitteiston rakenne huomioiden. Työn oleelliset osiot ovat

- Akkuvaunujen laite- ja kaapelivalinnat
- Käytön suunnittelu
- Dokumentointi ja laskennat
- Valmistus
- Akkuvaunujen lisätoiminnot ja muut valinnaiset osat suunnittelutasolla

Käsittelyssä otetaan kantaa myös koko tutkimuslaitteistoon sekä muiden komponenttien rajapintoihin (kuvio 1). Laitteiston kaksi muuta pääkomponenttia ovat ohjauskeskus ja invertterivaunu.



KUVIO 1. Järjestelmälohkot

Tasajännitelaitteistot ovat tällä hetkellä globaalisti ajankohtainen aihe, koska aurinkovoiman, energiavarastojen ja liikenteen sähköistymisen takia tasajännitteen käyttö kasvaa jatkuvasti. Tasajännitelaitteistojen ja energiavarastojen yhteydessä päädytään tyypillisesti tilanteisiin, joissa laitteistojen eri osien DC-potentiaalit täytyy huomioida kytkennöissä ja säätää yhtä suuriksi yhteen liittämistä varten. Akkuvaunujen suunnittelussa huomioidaan potentiaalinsäätö ja muut lohkojen väliset yhteensopivuusvaatimukset.

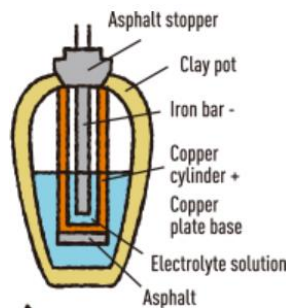
Työn tuloksia voidaan hyödyntää TAMKin ulkoisessa konsultaatiossa tasajännitelaitteiston suunnittelussa ja mahdollisesti liikuteltavan energiavaraston vuokraamisessa. Laitteisto on jatkumoa TAMKin aiemmalle Enervara-projektille.

2 AKKUTEKNOLOGIAT

2.1 Akkujen historiaa lyhyesti

> 2000 vuotta sitten

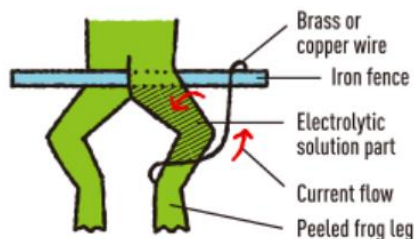
Yksi vanhimmista tiedossa olevista paristoista löydettiin Irakin pääkaupungin Bagdadin lähetyviltä Khu jut Rabu -kylän raunioista (kuva 1). Paristo on yli 2000 vuotta vanha. Sen jännite oli arviolta 1,5-2V ja sitä olettavasti käytettiin mm. metallipinnoitusten tekemiseen. (Panasonic).



KUVA 1. Ensimmäinen tiedossa oleva paristo (Kuva: Panasonic)

1700-luku

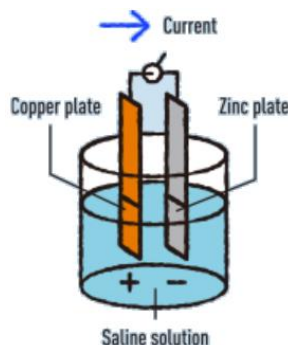
Italialainen *Luigi Galvani* keksi ja kehitti ensimmäisenä sähköparien toimintaperiaatteen 1780 luvulla sammakonjalkakokeen avulla (kuva 2). Hän käytti kokeessa kahta eri metallia ja elektrolyyttiä kuten nykyäänkin. (Panasonic).



KUVA 2. Galvanin sammakonjalkakoe (Kuva: Panasonic)

1800-luku

Kemiallisen pariston (kuva 3) kehitti ensimmäisenä italialainen *Alessandro Volta*. Samaa tekniikkaa käytetään paristoissa nykyäänkin. Voltan paristossa elektrodit olivat mm. kuparia ja sinkkiä. (Panasonic).



KUVA 3. Voltan paristo (Kuva: Panasonic)

Saksalainen *Carl Gassner* kehitti vuonna 1888 kuivapariston, jossa elektrolyytti oli suljetussa säiliössä eikä nestemäinen elektrolyytti enää vuotanut. Tämä paristo oli aikaisempia helpompi käsiteltävä. (Panasonic).

Vuonna 1859 ranskalainen *Gaston Plante* kehitti ensimmäisenä uudelleenladattavan modernin akkuteknologian pohjana olevan **lyijyhappo**akun. Samaa tekniikkaa käytetään edelleen mm. autojen käynnistysakuissa. (Bellis, 2019).

1900-luku

Energiavarastojen pohjana olevan **nikkelikadmium**akun kehitti ruotsalainen *Waldemar Jungner* vuonna 1899. Seuraavana vuonna 1900 amerikkalainen *Thomas Edison* käytti **nikkelirauta**yhdistelmää energiavarastona käytettävän akun kehittämiseksi. (Panasonic).

Litiumioniakun kehitys alkoi 1970-luvun loppupuolella. Tekniikan kehityksessä oli haasteita stabiiliuden kanssa ja ensimmäiset versiot olivat herkkiä syttymään. Sony toi litiumioniakun kaupallisesti markkinoille vasta vuonna 1991 (Liimatainen, 2013, 28). Sonyn akku oli kuitenkin edelleen jokseenkin epästabiili. Myöhemmin 90-luvulla amerikkalainen Goodenough kehitti LiFePO_4 -akuissa käytössä olevan

stabiilin litiumionikatodin (Alarco & Talbot). Litiumioneihin perustuvia kemioita on lukuisia ja kehitystyö jatkuu vilkkaana.

Litiumtitanaattiakku on litiumioniakun yksi kemiallisista varianteista. Tekniikan perustana oleva patentti (US6475673B1) on kirjattu Japanissa vuonna 2000 ja Yhdysvalloissa vuonna 2002. Patentti sisältää LTO-akkujen valmistusprosessissa tarvittavien litiumioniyhdistelmien tuottamisen kuvauksen ainakin litiumkarbonaatille, litiumhydroksidille, litiumoksidille ja litiumnitraatille. (Yamawaki & Eto & Sakai, 2002). Patentti on nyt vanhentunut ja LTO-akkujen kehitystä ja tutkimusta tehdään eri puolilla maailmaa.

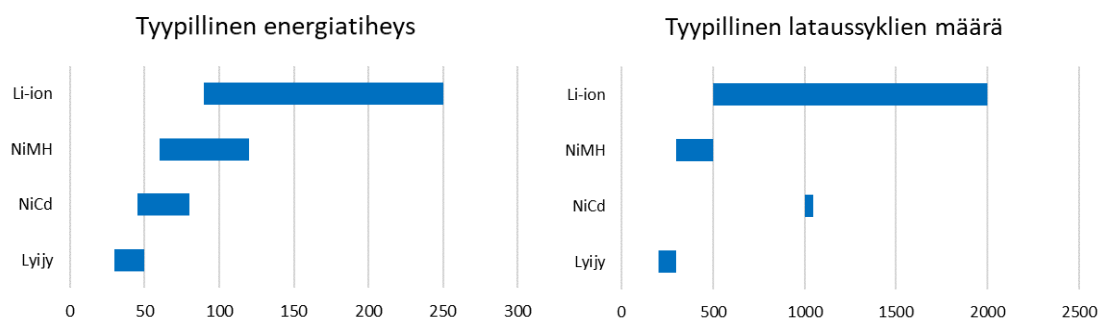
2.2 Yleisimmät akkutyypit nykyään

Nykyisin kaupallisessa käytössä olevista akkutyypeistä yleisimmät ovat lyijy-, nikkelikadmium-, nikkelimetallihybridi- ja litiumioniakut. Näistä vanhin on lyijyhappoakku, jonka ominaisuudet ja valmistusmenetelmät tunnetaan hyvin. Lyijyakut ovat tyypillisesti edullisia, kestäviä, painavia ja kestävät hyvin ylilatausta mutta ovat heikkoja energiatiheydeltään. Akkujen lyijy on ympäristölle haitallista ongelmajätettä. EU-tasolla on säädetty jäteakkujen kierrätyksestä, minkä ansiosta lyijyakkujen kierrätysaste on Suomessakin korkea, noin 82 %. Lyijysisällön kierrätysaste on vielä korkeampi, noin 96 % (Akkukierrätys). Lyijyakkujen ympäristövaikutusta pyritään rajoittamaan ja siinä on onnistuttukin.

Nikkelikadmiumakkujen (NiCd) käyttö on vähentynyt niiden sisältämien myrkyllisten aineiden vuoksi. NiCd-akuilla on korkea lataussyklien sieto ja ne ovat hyvin lämpöä ja muita ympäristön vaikutuksia kestäviä. Nikkelimetallihybridiakut (NiMH) ovat osin korvanneet NiCd-akut pienempien ympäristövaikutusten sekä korkeamman energiatiheyden ansiosta. (BU-107).

Litiumioniakut ovat monin paikoin korvanneet NiMH ja NiCd-akut. Litiumioniakkujen etuja ovat tyypillisesti suuri energiatiheys ja teho, lataussyklien määrä sekä pitkä elinkaari. Litiumioniakut ovat toisaalta usein kalliita, ja niiden ominaisuuksista johtuen tarvitaan useimmiten turvapiiri ja muita menetelmiä epästabiiliuden

sekä palo- ja räjähdysvaaran poistamiseksi. Alla kuviossa 1 on esitetty eri akkutyypin tyypilliset energiatiheddet ja lataussykliin määrät. (BU-107).



KUVIO 1. Tyypilliset energiatiheddet ja lataussykliin määrät akkutyypin mukaan (BU-107, muokattu)

Litiumia voidaan käyttää akussa myös anodissa hiilipohjaisen anodin asemesta, jolloin puhutaan **litiummetalliakusta**. Tämä akkutyyppi ovat vielä tutkimusvaiheessa, koska lähtökohtaisesti litiummetallianodi ei ole stabiili. Dendriittikertymät (epätasainen ionikertymä anodilla) ovat toinen suuri turvallisuusriski litiummetalliakuissa. Dendriitit aiheuttavat oikosulkuja anodin ja katodin välille. Litiummetalliakuilla on toisaalta korkein teoreettisesti saavutettavissa oleva kennokohtainen energiatiheys ja jännite. Tämän takia niistä odotetaan seuraavan sukupolven litiumakkuratkaisua esimerkiksi liikenteen energiavarastotarpeisiin.

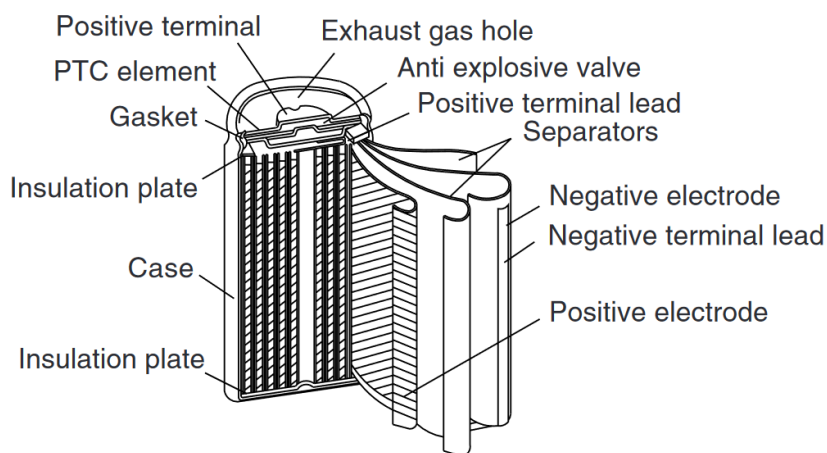
(Bank 2021, 8).

2.3 Litiumioniakun toimintaperiaate

Litiumioniakkujen oleelliset rakenneosat ovat fyysisestä muodosta riippumatta aina samat:

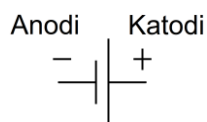
- Anodi (-)
- Katodi (+)
- Elektrolyytti ("separator", erottaa elektrodit toisistaan)
- Virtakollektorit (+ ja -)

Virtakollektorit muodostavat yhdessä anodin ja katodin kanssa + ja – elektrodit. Lieriönmuotoisen litiumioniakun rakenneosat voivat olla esimerkiksi kuvion 2 mukaiset.



KUVIO 2. Litiumioniakun rakenneosat (Panasonic 2007)

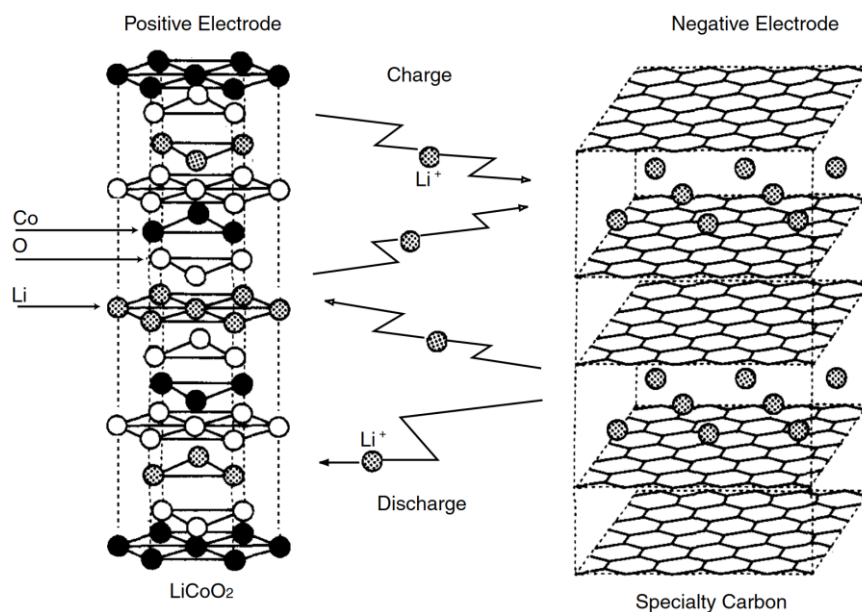
Anodi on akun elektrodi (-), joka luovuttaa elektroneja akkua purettaessa. Katodi (+) vastaanottaa elektroneja akkua purettaessa.



Ladattaessa elektronit liikkuvat katodilta anodille, mutta akun negatiivista napaa kutsutaan virran suunnasta huolimatta anodiksi.

Useimmiten litiumioniakun katodi on litiumoksidia ja anodi hiiliyhdistettä, esimerkiksi grafiittia, mutta esimerkiksi LTO-akussa voi anodi olla myös litiumtitanaattioksidia (Nemeth & Schröer & Kuipers & Sauer 2020,1). Anodin virtakollektori on useimmiten kuparia ja katodin virtakollektori alumiinia, mutta myös nikkeliä ja titaania käytetään.

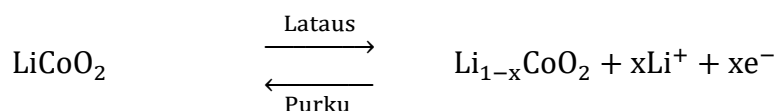
Litiumioniakkujen toimintaperiaate on samanlainen kuin käytännössä kaikilla muillakin akuilla. Akkua purettaessa litiumionit liikkuvat erotuskerroksen läpi anodilta katodille. Latausvaiheessa ionit liikkuvat päinvastaiseen suuntaan (kuvio 3).



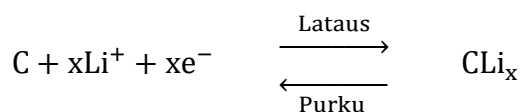
KUVIO 3. Litiumionien liikkuminen elektrodien välillä LCO-akussa (Panasonic 2007).

Alla on esitetty LCO-tyyppisen litiumioniakun katodin ja anodin sekä koko akun reaktioyhtälöt. Yhtälöt esittävät yo. kuvion matemaattisessa muodossa atomin tarkkuudella. Litiumioniakussa on nimensä mukaisesti litiumioneja, eikä litium esiinny ioniakuissa metallisessa muodossa.

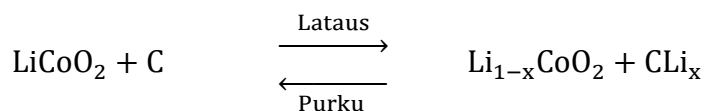
Katodin puolireaktioyhtälö



Anodin puolireaktioyhtälö



Koko akun reaktioyhtälö



(Panasonic, 2007).

Litiumilla on useita kemiallisia ominaisuuksia, jotka tekevät siitä optimaalisen alkalimetallin akkujen valmistukseen. Litiumilla on alkuaineista matalin redox-potentiaali eli se on hyvä pelkistin. Tällöin litiumilla toteutetulla akulla on suurin mah-

dollinen kennon jännite. Litium on kevyin metalli ja litiumionilla on tunnetuista ioneista pienin säde. Tästä seuraa, että litiumakuilla on erinomainen energia- ja tehotiheys. (Nitta & Wu & Lee & Yushin 2015, 1)

2.4 Suuret akkujen ominaisuuksien vertailussa

Erilaisten akkujen ominaisuuksia täytyy vertailla aina, kun ollaan valitsemassa akkua tiettyyn käyttötarkoitukseen. Tyypillisesti akkutyyppejä vertaillessa huomioidaan ainakin seuraavat ominaisuudet

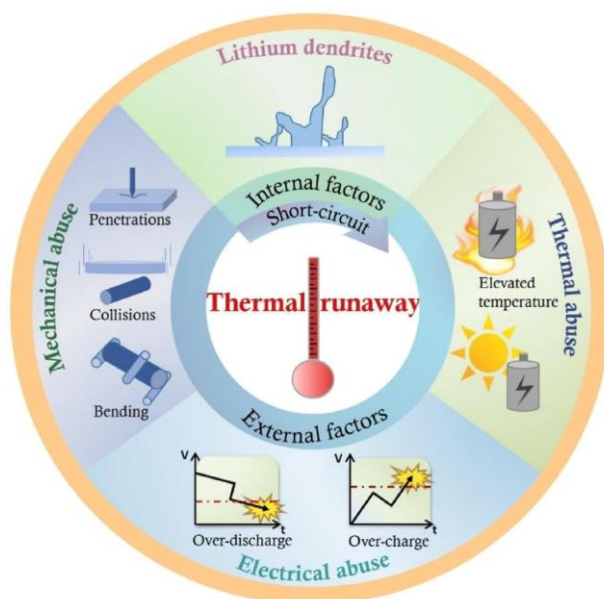
- Energiatiheys (Wh/kg tai Wh/l)
- Tehotiheys (W/kg tai W/l)
- Turvallisuus
- Suorituskyky
- Elinkaari
- Kustannus

Energiatiheys on akun / kennon ominaisuus, joka kertoo kapasiteetin suhteessa joko painoon tai tilavuuteen. Suureen yksikkö on yleisimmin joko Wh/kg tai Wh/l. Akun tehotiheys on akun / kennon ominaisuus, joka kertoo akun tehon suhteessa joko painoon tai tilavuuteen. Suureen yksikkö on yleisimmin W/kg tai W/l.

Näiden kuuden attribuutin lisäksi akun valintaan voi vaikuttaa esimerkiksi kuormasta johtuvan purkukäyrän muoto. Täytyy myös tietää, kuinka akku säilyttää jännitteensä ja virtansa, kun varaus laskee. Eri akkukemioilla on myös hyvin erilaiset suurimmat lataus- ja purkuvirrat, mikä vaikuttaa akun valintaan latausaikojen ja suurimman tehon tuoton kautta. Lataus-/purkuvirta, lämpötila käytön aikana ja purkusyvyyys vaikuttavat ratkaisevasti akun elinkaareen.

Energia- ja tehotiheydet ovat laskettavissa ja mitattavissa olevia suureita. Kemioilla on rakenteesta johtuvat teoreettiset maksimiarvot. Käytännön toteutuksissa arvot vaihtelevat hiukan, mutta eri kemioiden välillä on kuitenkin selvät erot, joiden perusteella sopiva akku voidaan valita. (Nitta ym. 2015, 6).

Litiumioniakkujen turvallisuudesta on aiheellisesti keskusteltu medioissa. Alla kuviossa 4 on esitetty tekijöitä, joiden vaikutuksesta litiumioniakku saattaa muuttua epästabiiliksi ja ylikuumentua tai palaa jopa räjähdysmäisesti.



KUVIO 4. Akkujen turvallisuutta uhkaavia tekijöitä (Zhao & Zhao & Zhou & Liu & Fang & Liang 2023, 3)

Mekaanista rasitusta voi esiintyä monella eri tavalla. Yksi yllättävimmistä rasituksen lähteistä on kuitenkin sisäinen. Tietyt litiumioniakut suurenevat tai kutistuvat lataustilasta riippuen. Akkujen kotelointi pitää suunnitella niin, ettei tilavuuden muutos aiheuta mekaanista jännitystä ja riko akkua. Toinen sisäisesti syntyvä turvallisuusriski on dendriittien kertymä akun anodille. Kertymien kasvaessa pienet sisäiset oikosulut muuttuvat suuremmiksi. Lopulta akku alkaa lämmetä yhä kiihtyvällä tahdilla ja prosessi päättyy hallitsemattomaan lämpenemiseen, engl. thermal runaway. Akkua voidaan rasittaa ulkoisesti käyttämällä tai säilyttämällä sitä liian kuumissa olosuhteissa. Suuri osa litiumioniakuista ei myöskään siedä kovin hyvin yllilatausta tai täysin tyhjäksi purkamista .

Akun turvallisuutta arvioitaessa ei toistaiseksi ole syntynyt yhdenmukaista arviointikäytäntöä. Arvioinnissa on syytä huomioida ainakin kolme seikkaa:

- Kemiallinen ja sähköinen stabiilius
- Mekaaninen kestävyys
- Ympäristön lämpötilan sietoisuus (Zhao ym. 2015)

Zhao ym. ehdottavat turvallisuuskriteereiksi mm. seuraavaa:

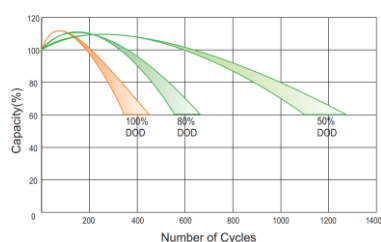
- 5000 lataussyklin jälkeen ei dendriittikertymiä
- Turvallisuus säilyy 1 m pudotuksessa tai jos akkuun tehdään pistoreikä
- Akku ei saa ylikuumentua tai syttyä oikosulussa, syväpurussa tai ylilatauksessa
- Säilytyslämpötila 60C° ei saa aiheuttaa akussa reaktioita

Suorituskykyä arvioidaan yleensä kolmen parametrin avulla

- Kapasiteetti
- Avoimen piirin jännite
- Sisäinen impedanssi

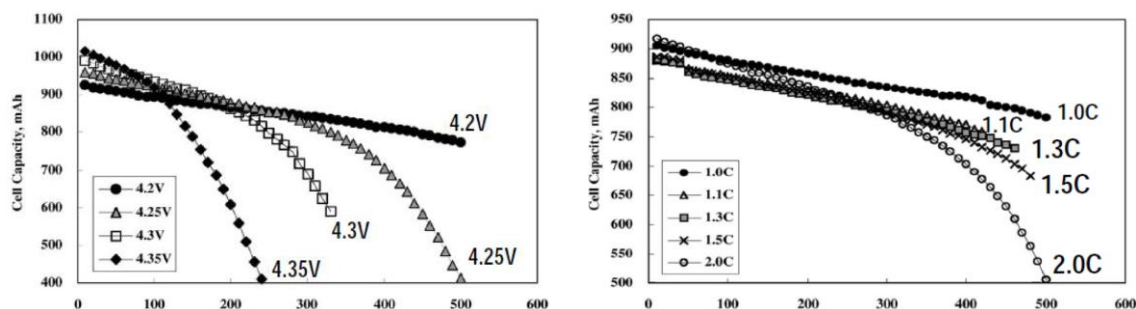
Kapasiteetti on akun sisältämä maksimivaraus. Avoimen piirin jännite on (täyden) akun jännite silloin, kun siihen ei ole kytkettynä kuormia. Sisäinen impedanssi on akun sisäinen napojen välinen impedanssi, joka akkua käytettäessä kuluttaa tehoa ja lämmittää akkua. Sisäinen impedanssi on huomioitava normaalin käyttötilanteen lisäksi myös latausvaiheessa. Näihin kolmeen mittaukseen vaikuttavat lisäksi lämpötila ja käytetyt kuormat eikä mittaustapojen ole toistaiseksi standardoitu. (Harmon, 2019).

Akun elinkaarella tarkoitetaan yleensä lataussykliä määrää ennen kuin kapasiteetti tai muut ominaisuudet ratkaisevasti heikentyvät. Elinkaaren päättymisen rajana käytetään yleisesti sitä, kun alkuperäisestä kapasiteetista on jäljellä 70–80 % eli SoH on välillä 70–80 %. Elinkaareen vaikuttaa huomattavasti, miten akkua käytetään. Alla olevassa kuviossa 5 on esitetty syväpurkua sietävän AGM-lyijy-akun purkusyvyyden vaikutus elinkaareen ja kapasiteettiin. Elinkaari lyhenee radikaalisti, jos akkua puretaan toistuvasti yli 50 %. Litiumioniakuissa vaikutus ei ole näin suuri, mutta ilmiö on samankaltainen.



KUVIO 5. Deep discharge -tyyppisen AGM-akun kapasiteetti syklien ja purkusyvyyden funktiona (EV12-240, 2)

Litiumioniakkujen elinkaareen vaikuttavat huomattavasti lataus- ja purkuvirrat sekä -jännitteet. Ylijännitteellä tai ylivirralla lataaminen lyhentää litiumioniakkujen elinkaarta ja pienentää kapasiteettia nopeasti. Alla kuviossa 6 on esitetty Richtekin sovellusohjeen mukaan virtojen vaikutus elinkaareen (ei päde LTO-akkuun).



KUVIO 6. Latausjännitteen ja -virran vaikutus litiumioniakun elinkaareen (Richtek 2014, 2)

Kustannuksia ja hintoja vertaillen useimmiten vertaillaan hankintahintaa suhteessa kapasiteettiin ja tehoon eli suureita Wh/€ tai W/€. Greentech renewables -energiayhtiön mukaan yhtä tärkeää on kuitenkin huomioida latausyklin hinta tai energiavaran käytön kustannukset jaettuna tietyllä aikavälillä. LTO-energiavaran antama energia tietyssä aikana voidaan laskea esimerkiksi lausekkeella

$$\text{Varaston energia} = \text{Aika} * \frac{\text{Sykli määrä}}{\text{Aika}} * \frac{\text{Energia}}{\text{Sykli}} * \text{RTE} * \text{DoD} * \frac{100 - \frac{\text{kapasiteettihäviö}}{2}}{100}$$

(Zenaji). RTE tarkoittaa suhdelukua

$$\frac{\text{järjestelmästä ulos saatu energia}}{\text{järjestelmään syötetty energia}}$$

joka ilmoitetaan prosentteina. Käytännössä RTE kertoo, kuinka suuren osan varastoidusta energiasta esimerkiksi akusta voidaan saada takaisin käyttöön.

Energiavaran hinta vaikuttaa käyttötilanteen kautta huomattavasti elinkaareen ja akustosta saatavaan kokonaiskapasiteettiin elinkaaren aikana. Zenajin laskelmien mukaan koko elinkaari huomioiden litiumioniakun kokonaishinta/kWh on noin USD\$ 0.2–0.3, kun LTO-akulla hinta on noin USD\$ 0.05. Laskenta antaa suuruusluokan, mutta absoluuttisina kuluarvioina näitä lukuja ei voi käyttää, vaan laskenta tulee aina tehdä tapauskohtaisesti kuorma ja käyttöolosuhteet huomioiden.

2.5 Litiumioniakkutyypit

Eräässä materiaalitutkimuksessa (Nitta ym. 2015, 6) on tarkasteltu sekä kaupallisessa, että tutkimuskäytössä olevia materiaaleja. Kaupallisessa käytössä ovat mm. taulukon 1 mukaiset kemiatyypit. Tarkastellaan näitä kuutta litiumioniakkujen yleisintä kemiatyyppiä.

TAULUKKO 1. Litiumioniakkutyypit kaupallisessa käytössä

Lyhenne	Oksidin molekyylikaava	Selite
LCO	LiCoO_2	Litium-koboltti-oksidi
LFP	LiFePO_4	Litium-rauta-fosfaatti
LMO	LiMn_2O_4	Litium-mangaani-oksidi
LTO	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	Litium-titanaatti-oksidi
NCA	LiNiCoAlO_2	Litium-nikkeli-koboltti-alumiini-oksidi
NMC	LiNiMnCoO_2	Litium-nikkeli-koboltti-mangaani-oksidi

Eri kemioilla on huomattavasti toisistaan eroavat sähköiset ja toiminnalliset ominaisuudet. Alla olevaan taulukkoon 2 on kerätty eri litiumioniakkujen tyypilliset sähköiset tunnusluvut. Vihreä edustaa poikkeuksellisen hyvää ja oranssi poikkeuksellisen huonoa arvoa muihin litiumioniakkuihin verrattuna.

TAULUKKO 2. Litiumioniakkujen tyypilliset sähköiset arvot (Data: BU-205)

	LCO	LFP	LMO	LTO	NCA	NMC
Nimellinen jännite (V)	3,6	3,2	3,7	2,4	3,6	3,6
Jännitteen vaihteluväli (V)	3,0 - 4,2	2,5 - 3,65	3,0 - 4,2	1,8 - 2,85	3,0 - 4,2	3,0 - 4,2
Energiatiheys (Wh/kg)	150-200	90 - 120	100 - 150	50 - 80	200 - 260	150 - 220
Latauksen C-arvo	0,7 - 1C	1C	0,7 - 1C	1-5C	0,7C	0,7 - 1C
Purun C-arvo	1C	1C	1C	10C	1C	1C
Minimijännite, purku (V)	2,5	2,5	2,5	1,8	3	2,5
Lataussyklien määrä	500-1000	>2000	300-700	3000-7000	500	1000-2000
Lämpökarkaamisraja (°C)	150	270	250	-	150	210

Akun C-arvo ilmoitetaan muodossa nC ja se kertoo, kuinka nopeasti akkua voi ladata tai purkaa. Akun C-arvo voi olla eri lataukselle ja purkamiselle. Kertoimen

n ja akun kapasiteetin E avulla lasketaan maksimi lataus-/purkuvirta lausekkeesta nE . Jos esimerkiksi akun kapasiteetti on 35Ah ja C-arvo 2C, niin akun maksimi virta on 70A.

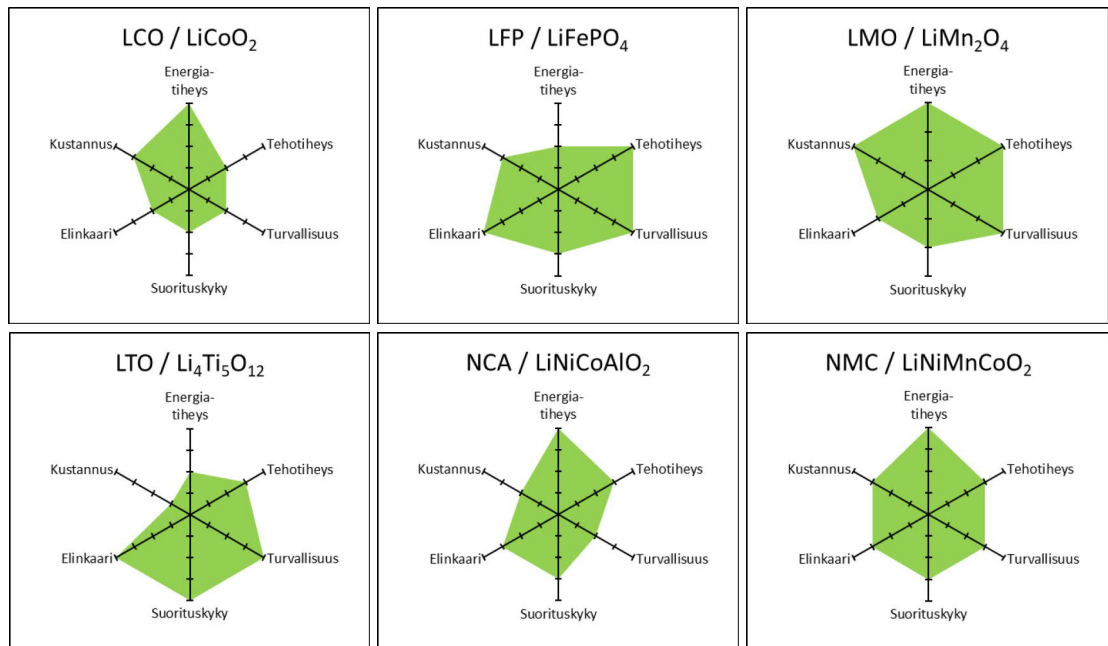
Taulukosta nähdään, että LTO akku on virta-arvoiltaan ja lataussyklien osalta ylivoimainen muihin nähden. Muita kuin LTO akkuja ei poikkeuksia lukuun ottamatta kannata ladata yli 1C virralla, koska elinkaari lyhenee. Energiatiheydessä taas sähköajoneuvoissa käytetyt NCA- ja NMC-akut ovat erittäin hyviä.

Sähköisistä ominaisuuksista johtuen akkutyypit ovat päätyneet hiukan eri käyttöön kuluttajalaitteissa, teollisuudessa ja liikenteessä. Alla olevaan taulukkoon 3 on tehty yhteenveto, miten eri akkutyyppejä käytetään.

TAULUKKO 3. Eri Litiumioniakkutyypin käyttökohteita ja erityispiirteitä (Data: BU-205)

Kemia	Käyttökohteita	Erikoispiirteet
LCO	Puhelimet, kannettavat tietokoneet, kamerat	Hyvä energiatiheys Kallis Vähän syklejä
LFP	Käynnistysakku, energiavarastot	Tasainen jännitekäyrä Turvallinen Kestävä
LMO	EV (Leaf, Volt, i3)	Yleensä yhdistetty NMC-typin kanssa Suuri hetkellinen teho
LTO	EV, e-pyörä, UPS, aurinkosähköjärjestelmät	Nopea lataus, Suuri lataussyklien määrä Turvallinen
NCA	Energiavarasto Panasonic, EV, mm. Tesla	Samankaltainen kuin LCO Hyvä energiatiheys Vähän syklejä
NMC	Työkalut, e-pyörät, EV	Co on kallista, yleensä mukana Mn ja Ni Hyvä energia- ja tehotiheys

Alla kuviossa 7 on esitetty visuaalisessa muodossa eri akkutyypin vahvuudet ja heikkoudet. Mitä suurempi on vihreä alue, sitä enemmän akkutyypillä on hyviä puolia.

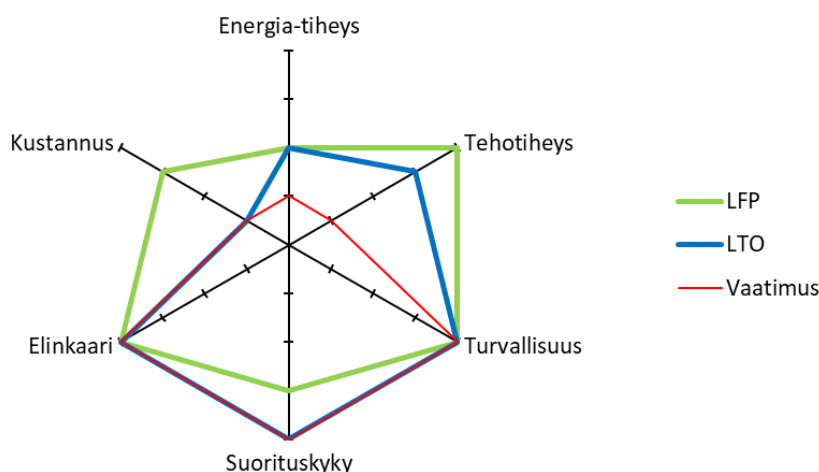


KUVIO 7. Litiumioniakkujen ominaisuudet (Data: BU-205)

Tämän työn aiheena olevan tutkimuslaitteiston akuston olisi hyvä täyttää seuraavat vaatimukset:

- Pitkä käyttöikä
- Sähköisesti turvallinen
- Mekaanisesti turvallinen (laitteistoa liikutellaan)
- Hyvä suorituskyky eli suuri piikkiteho/-virta (ei rajoita tutkimuskohteita)

Jos nämä vaatimukset sijoitetaan ominaisuuskuvaan, niin akkuvaihtoehdot ovat käytännössä LFP ja LTO (kuvio 8). Näistä kahdesta LFP:llä on hiukan ylimäärisiäkin ominaisuuksia: se on edullinen ja sillä on suuri tehotiheys, kun taas suorituskyky jää toivotusta. Edullisuus ei ole merkityksellistä, koska akkuja on pieni määrä (14kpl).



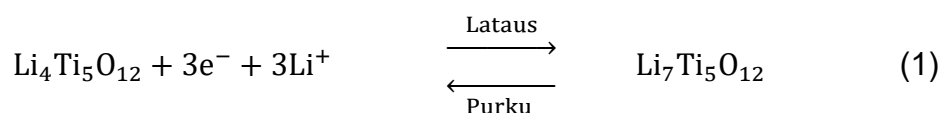
KUVIO 8. LFP- ja LTO-akkujen ominaisuusvertailu laitteiston vaatimuksia vasten

Voidaan siis todeta, että tutkimuskäyttöön hankitut LTO-tyypin ajoneuvoakut ovat sopivat tutkimuslaitteistoon.

2.6 LTO-akun toimintaperiaate ja ominaisuudet

LTO-akku on toimintaperiaatteeltaan samanlainen kuin muutkin litiumioniakut. Ladattaessa ja purkaessa litiumionit toimivat varauksen välittäjinä kahden elektrodin välillä. Elektrodit toimivat 'hyllypaikkana' tai matriisina litiumioneille, jotka lähtevät tai saapuvat anodille ja katodille. Akun tulkitaan olevan täyteen varattu, kun anodin matriisi on täynnä tai katodilta ei enää irtoa enempää litiumioneja. (Bank 2021, 19).

Grafiitti on yleisesti käytetty materiaali litiumioniakun anodilla, koska se on stabiili, eikä sen rakenne osallistu prosessiin kemiallisesti (Bank 2021, 21). LTO-akussa anodilla käytetään kuitenkin litiumtitanaattia. Koko akun reaktioyhtälö voidaan esittää kaavalla 1:



(Nemeth ym. 2020, 2).

LTO-anodin kynnysjännite on noin 1,55V vs. Li/Li⁺ (grafiitilla kynnysjännite 0,2V), mikä aiheuttaa LTO-kennon muita litiumionikenoja matalamman jännitteen

(Bank, 2021, 24). LTO-anodin teoreettinen gravimetrinen kapasiteetti on 175 mAh/g. Tämä on paljon matalampi kuin grafiittianodilla 372 mAh/g (Nemeth ym. 2020, 3). LTO-akun matala toimintajännite ja melko matala energiatiheys johtuvat suoraan näistä sähkökemiallisista ominaisuuksista.

LTO-anodin rakenteen mekaaninen koko muuttuu hyvin vähän varaustilan myötä (vaihtelu <0,1 %), jolloin akun sisälle ei synny jännitteitä, mikä parantaa elinkaarta ja stabiiliutta. Anodin kynnysjännitteestä johtuen LTO-anodille ei juurikaan synny estävää SEI-kerrosta eikä dendriittejä. Tämä tekee LTO-akusta pitkäikäisen, turvallisen ja kestävän isoille latausvirroille myös matalissa lämpötiloissa. (Bank 2020, 24). Taulukkoon 4 on koottu LTO-kennon hyvät ja huonot puolet.

TAULUKKO 4. LTO-akun ominaisuudet

Plussat	Miinukset
Korkeat lataus- ja purkuvirrat	Pieni akkujännite, noin 2,4V
Pitkä elinkaari	Pieni energiatiheys, 50-80 Wh/kg
Stabiili, turvallinen	Kallis
Suuri käyttö-/latauslämpötila-alue, -30°C - 60°C	
Matala dendriitinmuodostus	

2.7 LTO-akun käsittely

2.7.1 LTO-akun yleisiä ominaisuuksia

Käyttölämpötila, lataus- ja purkuvirrat vaikuttavat huomattavasti litiumioniakkujen toimintakykyyn ja elinkaareen. LTO-akussa ympäristön ja käyttötapojen vaikutus ei kuitenkaan ole lähimainkaan yhtä suuri kuin muilla litiumioniakuilla. Kaupallisesti saatavilla olevien LTO-akkujen välilläkin on datalehtien mukaan merkittäviä eroja (taulukko 5).

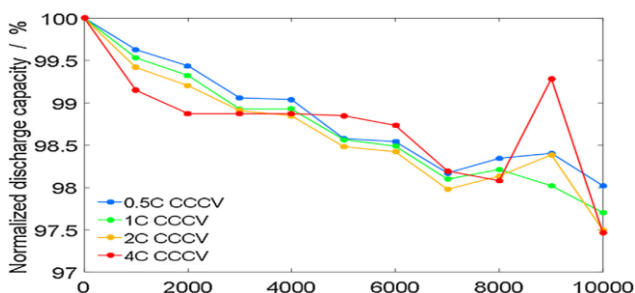
TAULUKKO 5. LTO-akkujen ominaisuuksia (valmistajien datalehdet)

	GWL	YinLong LTO	Toshiba	ELB	LTO Battery Co	LTO Battery Co	Huahui energy
	YL-LTO-40-AH	66160H, 2.3V 40Ah	23Ah cell	LTO 66060	LTO 35120	LTO 18650	HTC1330
Capacity (Ah)	40	40	23	40	7	1,3	0,22
Nominal voltage (V)	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4
Internal resistance (mOhm)	<0,1	0,7		1			
Max charging current (C)	10C	10C		6C	2C	5C	20C
Max charging current (A)		400		240	14	6,5	
Max discharging current (C)		10C		6C	3C	10C	20C
Max discharging current (A)		400		240	21	13	
Max pulse chg/dschg current (A)		800		400			
Max charging voltage (V)	2,8	2,9		2,9	2,8	2,8	
Discharge cutoff voltage (V)	1,5	1,5		1,5	1,6	1,5	
Cycle lifetime	30000	25000		20000	7000	7000	5000
Ambient temperature (chg)	-50-65	-50-65		-40-65	-20-50	0-45	-35-75
Ambient temperature (dschg)	-50-65	-50-65		-40-65	-35-80	-40-75	-35-75

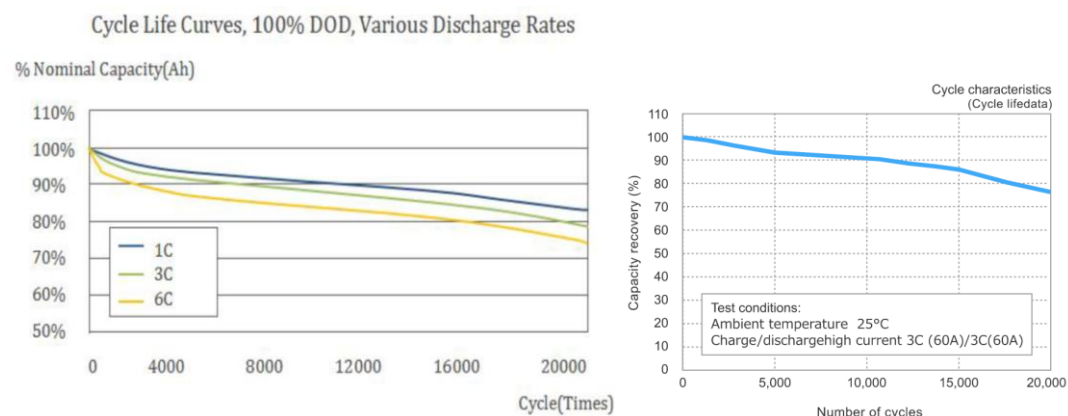
Datalehdistä voidaan yleisesti havaita, että maksimivirrat ovat suuria ja käyttölämpötila-alue on laaja. Kemiasta johtuvat jänniterajat ovat käytännössä samat kaikissa datalehdissä. LTO-akkujen osalta elinkaaritietoja ei ole kattavasti vielä saatavilla osittain siitä yllättävästä syystä, että markkinoilla olevien LTO-akkujen elinkaari ei useinkaan ole vielä tullut päätökseen.

2.7.2 Lataus ja kuormitus

Suurten lataus- ja purkuvirtojen vaikutus elinkaareen on LTO-akuilla paljon pienempi kuin muilla litiumioniakuilla. Alla kuvioissa 9 ja 10 on esitetty kolmen eri LTO-akun kapasiteetin heikentyminen, kun latausvirrat olivat 0,5C – 6C.



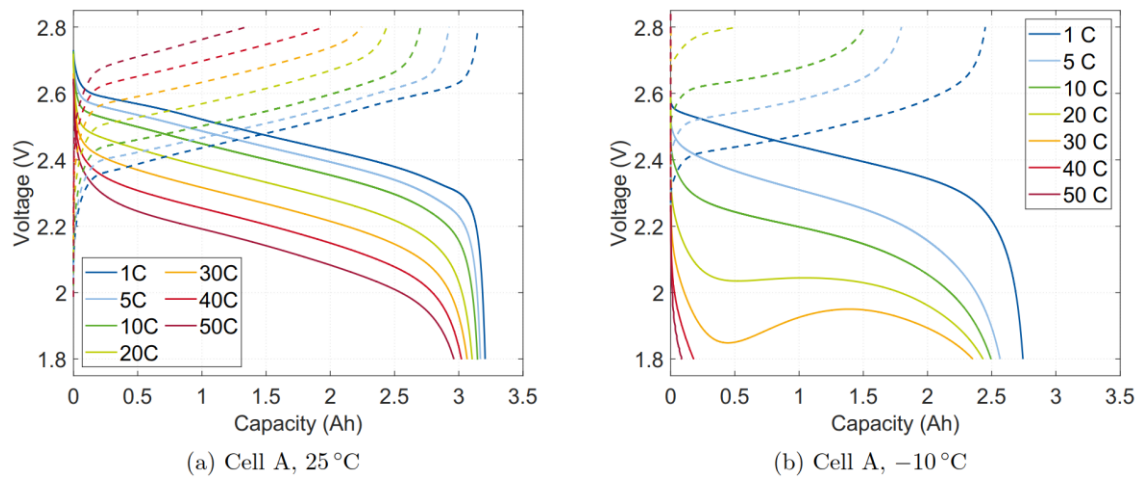
KUVIO 9. Latausvirran vaikutus LTO-akun kapasiteettiin CCCV-latausprofiililla (Hall & Touzria & Wußler & Buqa & Bessler 2018, 5)



KUVIO 10. Latausvirran vaikutus LTO-akun kapasiteettiin (oik. ELB Energy Group 2021; vas. Ev lithium limited).

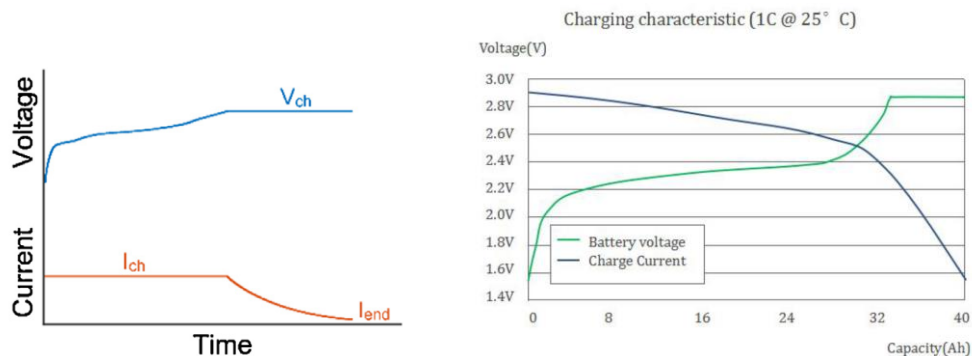
Kuvien perusteella voidaan todeta, että lataussykliä määrällä on kapasiteetin heikentymiseen suurempi vaikutus kuin latausvirralla. Tutkimuslaitteiston akkujen nimellinen lataus- ja purkuvirta 200A vastaa kerrointa $200A/46Ah = 4,3C$ eli näitä akkuja voidaan purkaa ja ladata isollakin virralla. Jos voidaan käyttää hidasta latausvirtaa, niin se on akun käyttöön kannalta yleensä hyvä ratkaisu. Yhdessä tutkimuksessa tosin todettiin, että hidas lataus (alle 1C) itse asiassa huonontaa LTO-akun elinkaarta (Stroe & Stroe & Knap & Maciej & Teodorescu 2018), mutta muissa tutkimuksissa ei ollut välittömästi vastaavia tuloksia tämän tueksi.

Lataus- ja purkuvirroilla on myös suora välitön vaikutus akun käytettävissä olevaan kapasiteettiin. Nopealla latauksella ja purkamisella kapasiteettiä ei saada täydellisesti käyttöön (kuvio 11). LTO-akku selviää kuitenkin suurista virroista melko hyvin. Kapasiteetin lasku suurilla purkuvirroilla johtuu kennon jännitteen laskemisesta, jolloin myös ulos saatava energia eli Wh-määrä laskee, vaikka kapasiteetti Ah ei juurikaan muutu.



KUVIO 11. Latausvirran ja ympäristön lämpötilan vaikutus erään LTO-akun kapasiteettiin. Kiinteä viiva: purku, katkoviiva: lataus (Nemeth ym. 2020, 5).

Edellisestä kuviosta nähdään myös, että suurilla latausvirroilla akku ei lataudu täyteen kapasiteettiin. Tämän takia litiumioniakuilla käytetään yleensä CCCV-latausprofiilia (kuvio 12), missä latausvirta laskee akun ollessa melkein täysi.

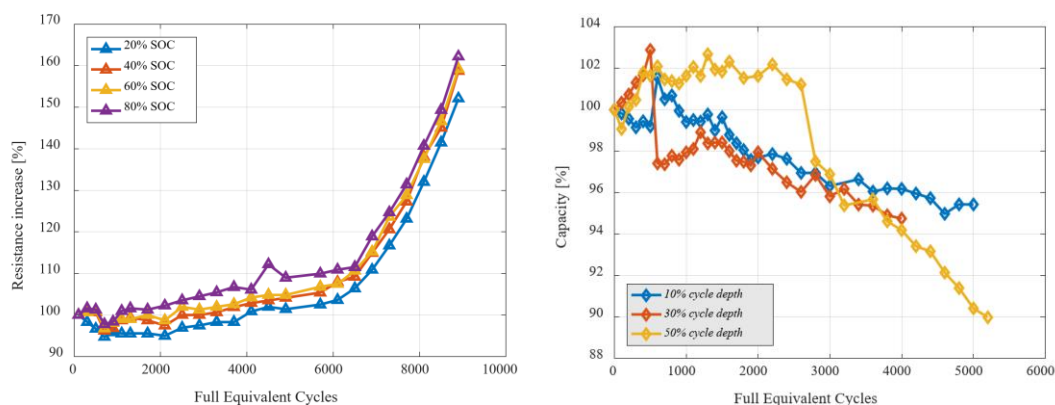


KUVIO 12. CCCV-latausprofiili vasemmalla (Keil & Jossen 2016, 2). Tyypillinen LTO-kennon jännite-/virtäkäyrä latauksessa oikealla (ELB Energy Group 2021).

2.7.3 Lataussyvyyden vaikutukset

Lataus- ja purkusyvyyden vaikutuksia akun elinkaareen ja kapasiteettiin ei usein esitetä akkujen datalehdissä. Monissa lähteissä asia kuitataan yksinkertaisesti toteamalla, että LTO-akut eivät vaurioidu syväpurkamisesta (esimerkiksi Zenaji Pty Ltd). Purkusyvyyden vaikutuksesta on joitain tutkimuksia, mutta useimmiten asiaa sivutaan muiden asioiden yhteydessä. Näyttää siltä, että LTO-akkujen osalta lataus-/purkusyvyyden vaikutuksia ei vielä täysin tunneta. Alla kuviossa 13

on esitetty tanskalaisten tutkijoiden tuloksia purkusyvyyden vaikutuksesta kennon sisäiseen impedanssiin ja kapasiteettiin.



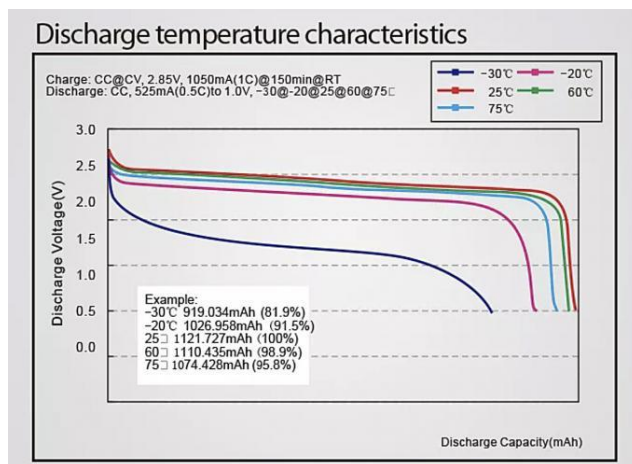
KUVIO 13. Purkusyvyyden vaikutus sisäiseen resistanssiin ja kapasiteettiin (Stroe & Stroe & Knap & Maciej & Teodorescu 2018, 6).

Vasemmanpuoleisesta kuviosta voidaan päätellä, ettei purkusyvyydellä ole sanottavaa merkitystä sisäiseen vastukseen, kun purkusyvyyys on välillä 20–80 %. Oikeanpuoleisesta kuviosta voidaan lukea, että purkusyvyydellä olisi vaikutus kapasiteettiin ja sitä kautta elinkaareen. Tämän työn kannalta voidaan melko turvallisesti olettaa, että purkusyvyydellä ei ole sanottavaa vaikutusta elinkaareen, mutta akkuja ei kannata kuitenkaan purkaa täysin tyhjäksi.

LTO-akun ikääntymisestä johtuvia vaikutuksia on tutkinut syvällisesti Bank vuonna 2021. Yksi tutkimuksen oleellisia havaintoja oli, että LTO-akkujen pitkäaikaisessa säilytyksessä kannattaa akkujen varaustila olla melko matala. Tutkimuksessa havaittiin jo alle sadan päivän varastointiajan jälkeen kapasiteetissa usean prosenttiyksikön heikentyminen, jos varaustila oli yli 90 %. Vastaavasti LTO-akun säilytys alle 20 % varaustilassa ei heikentänyt kapasiteettia ollenkaan vuoden tarkastelujaksolla. (Bank 2021, 92).

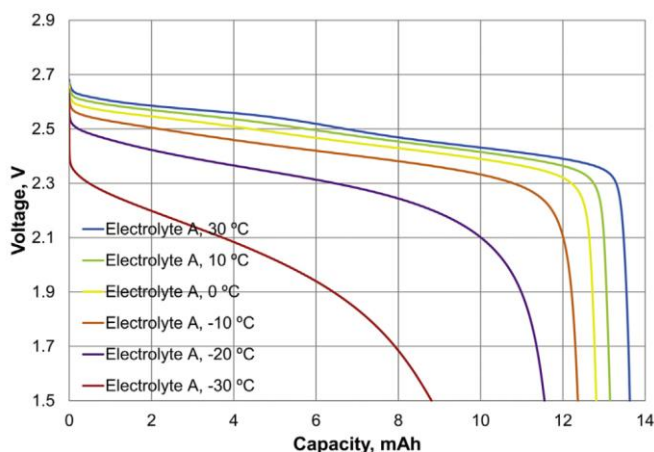
2.7.4 Lämpötila

Akkujen datalehdistä nähdään, että LTO-akkujen toimintalämpötila saa olla hyvin matala tai kohtuullisen korkeakin (taulukko 5). Datalehdet eivät kuitenkaan usein kerro lämpötilan todellisia vaikutuksia toimintakykyyn. Kuviosta 11 yläpuolella nähdään, että erään LTO-akun jännitteessä nähdään suuria muutoksia jo -10°C lämpötilassa varsinkin, jos käytetään suuria lataus- ja purkuvirtoja. Alla kuviossa 14 on esitetty toisen LTO-akun lämpötilan vaikutus akun jännitteeseen. Tällä akulla toimintakyvyn romahtaminen tapahtuu välillä $-20 - -30^{\circ}\text{C}$.



KUVIO 14. Lämpötilan vaikutus akkujännitteeseen (Huahui energy, HTC1330 datalehti).

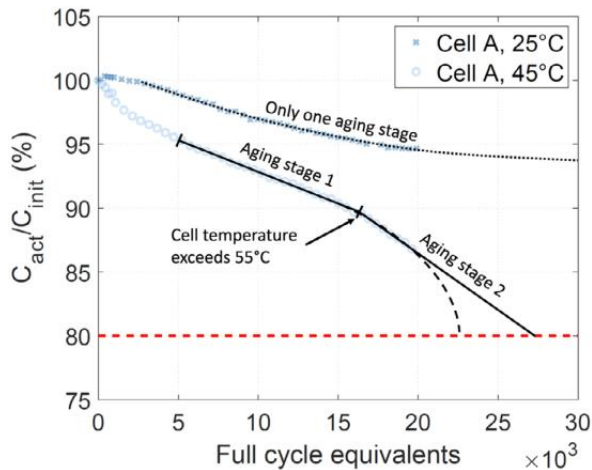
Elektrolyytin vaikutuksia LTO-akun toimintakykyyn matalissa lämpötiloissa tutkivat Chen & Yu & Deng & Wu & Zou ja Zeng vuonna 2015. Tulokset olivat samansuuntaiset kaikilla elektrolyyteilla. Alla kuviossa 15 on esitetty yhden testikappaleen toimintakyky lämpötilan suhteen.



KUVIO 15. Lämpötilan vaikutus akkujännitteeseen (Chen ym. 2015, 4).

Tässä järjestelmässä olevien akkujen datalehti ei tarkkaan kerro, mitä matala lämpötila tekee suorituskyvylle, mutta voidaan olettaa, että samankaltaiset ominaisuudet toistuvat. Akkua voidaan käyttää esitteessä ilmoitetulla lämpötilavälillä $-30 - +55^{\circ}\text{C}$, mutta mahdollisesti ei kuitenkaan täydellä suorituskyvillä koko lämpötila-alueella. Akkujen lataus kannattaa tehdä mieluummin korkeassa kuin matalassa lämpötilassa.

Tutkimuksissa on todettu, että LTO-anodin suorituskky paranee lämpötilan noustessa jopa $60-70^{\circ}\text{C}$ saakka. Erään kokeellisen LTO-anodin suorituskky heikkenee vasta yli 80°C lämpötilassa ja 130°C lämpötilassa toimintakyky romahtaa täysin. LTO-akun suorituskky siis paranee, jos ollaan huonelämpötilaa korkeammassa lämpötiloissa. Korkeilla lämpötiloilla on kuitenkin akun elinkaarta lyhentävä vaikutus ja riski lämpötilan hallitsemattomaan karkaamiseen kasvaa. (Acharya & Pathak & Pati 2023, 1). Kuviossa 16 on esitetty lämpötilan vaikutus LTO-akun ikääntymiseen.



KUVIO 16. Korkean lämpötilan vaikutus ikääntymiseen (Nemeth ym. 2020, 9)

2.7.5 Yhteenveto akuston käsittelystä

Edellisiin kappaleisiin perustuen voidaan linjata tutkimuslaitteiston akuston käsittelystä ja säilytyksestä seuraavaa

- Akustoa voidaan hyvin ladata ja purkaa virroilla $\leq 1C - 4,3C$
- Hitaalla latauksella tai CCCV-profiililla saadaan akusto ladattua tarvittaessa mahdollisimman täyteen
- Jos akuston lämpötila on liian matala tai korkea (tehdasohjelmoitavat parametrit), niin PDU pienentää järjestelmälle ilmoitettavia suurimpia lataus- ja purkuvirtoja (Akkuvalmistaja 2023, 24)
- Kun tarvitaan suurinta mahdollista suorituskykyä / kapasiteettia, niin akuston lämpötila kannattaa olla hiukan huonelämpötilaa korkeampi
- Elinkaaren kannalta akuston optimilämpötila on $10-30^{\circ}C$ (Akkuvalmistaja 2023, 27)
- Akuston syväpurkua $SoC < 10\%$ kannattaa välttää
- Akuston varaustila pitkäaikaisessa säilytyksessä kannattaa olla korkeintaan $20-50\%$ (Bank 2021, 93)
- Akuston virtarajoja rajoitetaan hyvin matalissa lämpötiloissa (rajoitukset aseteltavissa tehtaalla)

3 JÄRJESTELMÄKUVAUS

3.1 Järjestelmäkaavio

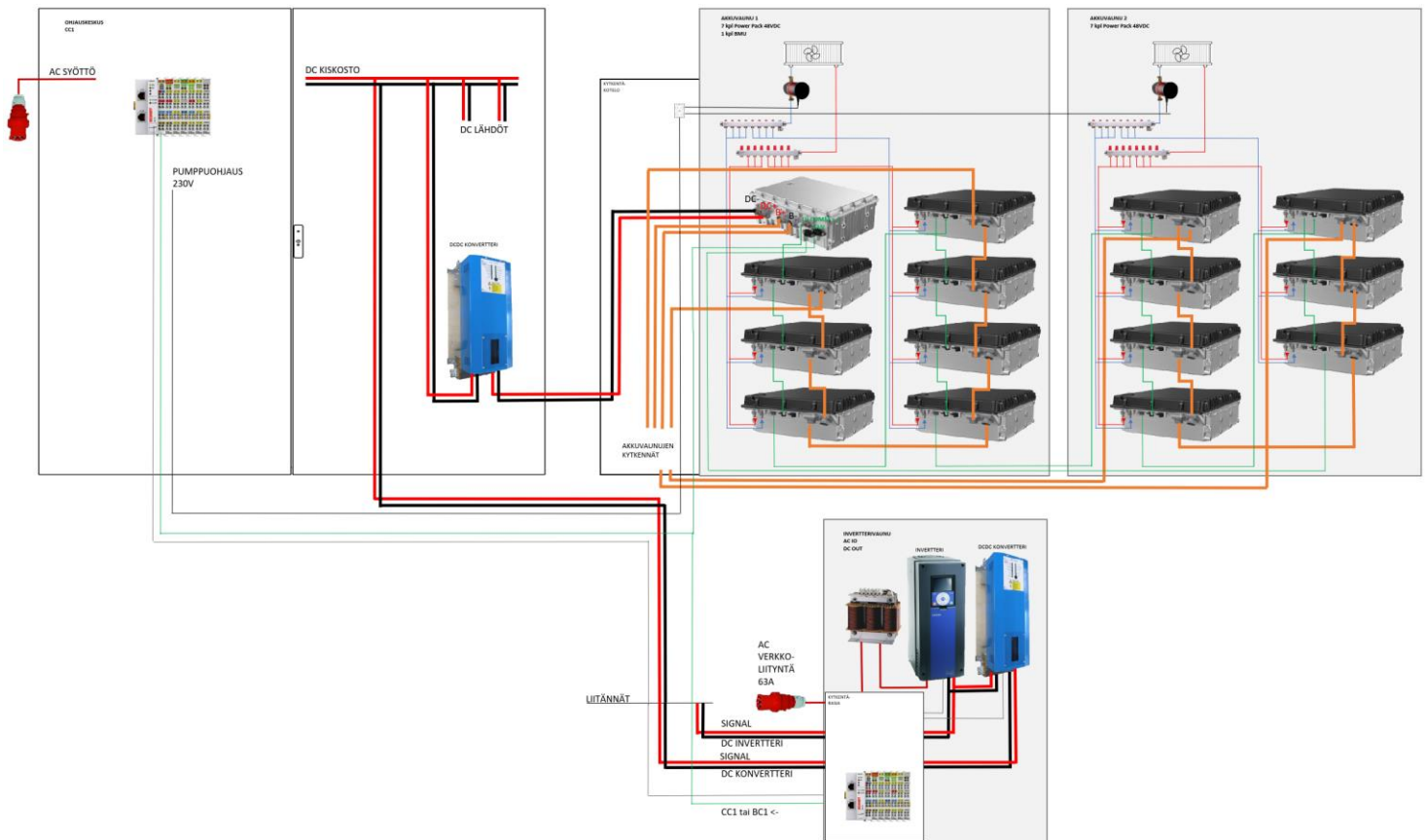
Tasasähköjärjestelmän tutkimuslaitteiston tarve kumpuaa viime vuosien aikana tapahtuneen energian tuotanto- ja kulutusrakenteen muutoksesta. Aurinkosähkövoimalat, paikalliset energiavarastot ja esimerkiksi sähköauton akusto ovat lähikohtaisesti tasajännitelaitteistoja. Tästä syystä tietoa tasajännitelaitteiden suunnittelusta, asennuksesta ja huollosta tarvitaan aiempaa enemmän. Tutkimuslaitteiston tarkoituksena on tarjota ympäristö energiavaraston ja erilaisten tasajännitekomponenttien tutkimukselle ja yhteensovittamiselle.

Tutkimushankkeen laitteisto koostuu oleellisesti kolmesta yksiköstä:

- Ohjauskeskus
- Invertterivaunu
- Akkuvaunut 2kpl

Tämän työn aiheena on suunnitella ja rakentaa akkuvaunut eli ajoneuvon ajoakuihin perustuva energiavarasto. Akkuvaunujen käyttö ja liitettävyyys on suunniteltu muun laitteiston rakenne huomioiden. Vaunujen suunnittelu myötä on otettu kantaa myös laitteiston muihin osiin, joita on raportissa esitetty oleellisin osin.

Alla kuviossa 17 on esitetty pääpiirteissään järjestelmän komponentit. Akkuvaunuissa on esitettyä akut 7+7kpl ja niiden ohjausyksikkö PDU sekä jäähdytysjärjestelmä. Akkuvaunujen jäähdytysjärjestelmä suunnitellaan, mutta sitä ei toteuteta tässä vaiheessa. Käyttötilanteesta riippuen akkuvaunut ja invertterivaunu saattavat toimia itsenäisesti ilman keskusta, mutta kuviossa on esitetty tilanne, jossa ohjauskeskus on käytettävissä. Akkujen kytkentä on esitetty sarjaankytkentänä, mutta akut on mahdollista kytkeä myös rinnakkain. Akkuvaunu 1:llä on kytkentäkotelo, jossa on vaunujen sarjaan-/rinnankytkentäkontaktorit sekä signaalien tulo- ja lähtöliittimet.



KUVIO 17. Järjestelmän yleiskuvaus

Ohjauskeskus (kuvassa vasemmalla) sisältää apujännitteiden verkkoliitynnän, Beckhoff-ohjauslogiikan, DCDC-konvertterin sekä DC-kiskoston tasajännitteen ulosottoa tai syöttöä varten. Akkuvaunun ja ohjauskeskuksen väliset linkit ovat

- DC+ ja DC- tasajännitekaapelit (pääpiiri)
- 24-johdiminen signaalikaapeli (ohjaus- ja diagnostiikkatiedot, mm. CAN-väylä)
- Jäähdytysjärjestelmän syöttökaapeli (230VAC)

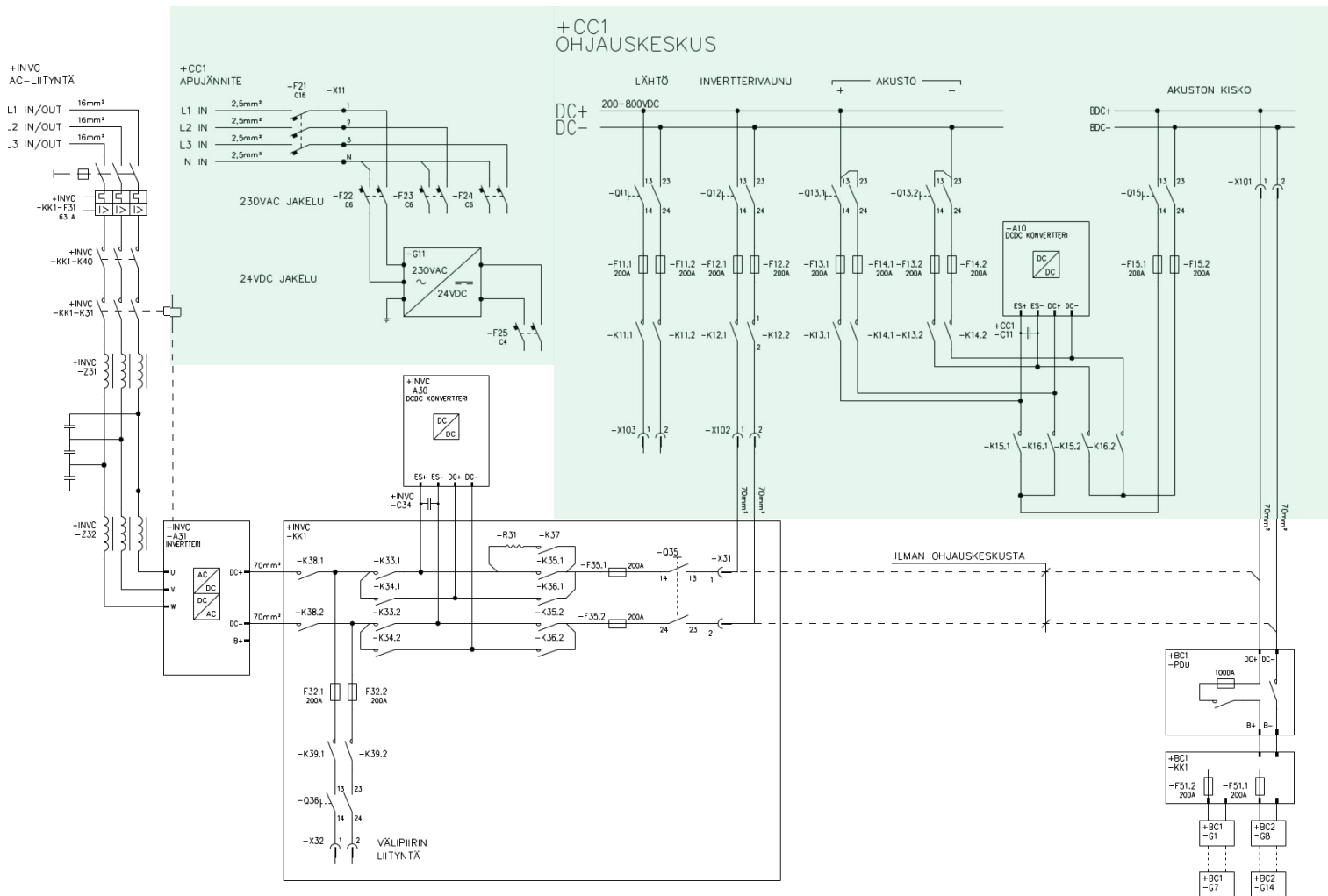
Ohjauskeskuksen AC-liityntä on vain apujännitteen syöttöä varten, eikä sitä ole suunniteltu käytettäväksi akkujen lataukseen tai DC-kiskoston tehonsyöttöön.

Järjestelmä suunnitellaan toimimaan myös ilman ohjauskeskusta, jolloin yllä mainitut akkuvaunun kaapelit viedään invertterivaunulle eikä ohjauskeskukselle. Invertterivaunu sisältää invertterin ja verkkoliitynnän, konvertterin, yliaaltojen suodattimet, Beckhoff-ohjauslogiikan sekä kytkentäkotelon. Invertterivaunun verkkoliityntä on 63 A 3-vaihepistotulppa, jolta saadaan riittävästi tehoa myös akuston

lataamiseen. Verkkoliityntää voidaan käyttää myös sähkön siirtoon verkon suuntaan. Invertterivaunu ei kuitenkaan toimi täysin ilman verkkoa (off grid) eli invertterivaunu tarvitsee aina sähköverkkoliitynnän.

3.2 Pääpiirikaavio

Alla kuviossa 18 on esitetty järjestelmän pääpiirikaavio. Akkuvaunujen piirikaaviot ja kuvat on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1. Järjestelmän keskeisin osa on ohjauskeskuksen DC-kiskosto, jolta ladataan tai puretaan akkua, annetaan tai otetaan tasavirtaa invertterivaunulta tai otetaan tasajännitettä ulos kiskoston lähdistä. Vihreällä pohjalla olevat laitteet ovat ohjauskeskuksessa +CC1.

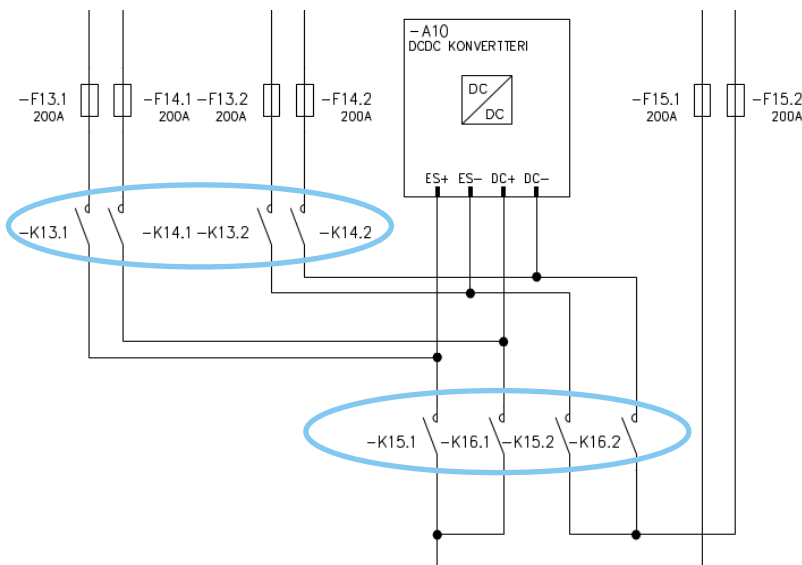


KUVIO 18. Pääpiirikaavio, ohjauskeskuksen +CC1 laitteet vihreällä

Ohjauskeskuksen DCDC-konvertterin tarkoituksena on antaa mahdollisuus säätää kiskoston tasajännite halutulle tasolle riippumatta siitä, mikä on akuston jännite. Ohjauskeskuksen kontaktoreilla K13 – K16 on kaksi tarkoitusta

1. DCDC-konvertteri on mahdollista erottaa joko DC-kiskon tai akustokiskon puolelta
2. DCDC-konvertteri on mahdollista kääntää siten, että ES- ja DC-tuloihin kytketyt laitteet vaihtavat paikkaansa.

Konvertterin tulojen vaihtaminen pitää olla mahdollista, jos halutaan säätää kiskoston jännite välillä 200–800 VDC. Akkuvaunujen kytkentätavasta ja varaustilasta riippuen koko akuston jännite voi vaihdella välillä 270–780 V (Akkuvalmistajan esitelehtinen). Jos akuston jännite on korkea ja halutaan kiskostolle sitä matalampi jännite, niin DCDC-konvertterin ES-tuloon pitääkin kytkeä kiskosto eikä akusto. Jos taas akuston jännite on matala ja sitä halutaan konvertterilla nostaa, niin silloin ES-liittimiin kytketään akusto ja DC-liittimiin kiskosto. Alla kuviossa 19 on esitetty konvertterin kääntävät kontaktorit. DC-kiskoa matalammalla akkujännitteellä kytketään K14.1, K14.2, K15.1 ja K15.2. Kun halutaan, että DC-kisko on akkujännitettä alempana, niin kytketään K13.1, K13.2, K16.1 ja K16.2. Samanlainen napaisuuden vaihto on invertterivaunun konvertterille tehty kontaktoreilla K33–K36.



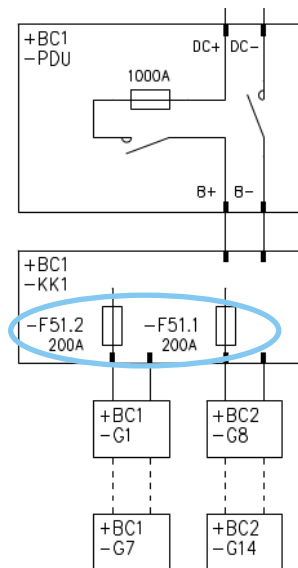
KUVIO 19. Konvertterin napaisuuden kääntö

Konvertterin käyttö- ja huolto-ohjeen mukaan (MSc 2016, 13) ES- ja DC-link-liittimien välillä pitää olla vähintään 100 V jännite-ero. Valmistaja on kuitenkin erikseen ohjeistanut, että jännite-ero 30 V on jo turvallinen. Jännite-eron säilyminen riittävänä on pidettävä mielessä, kun akuston kytkentää muutetaan.

3.3 Oikosulku- ja suojaustarkastelut

3.3.1 Suojalaitteet

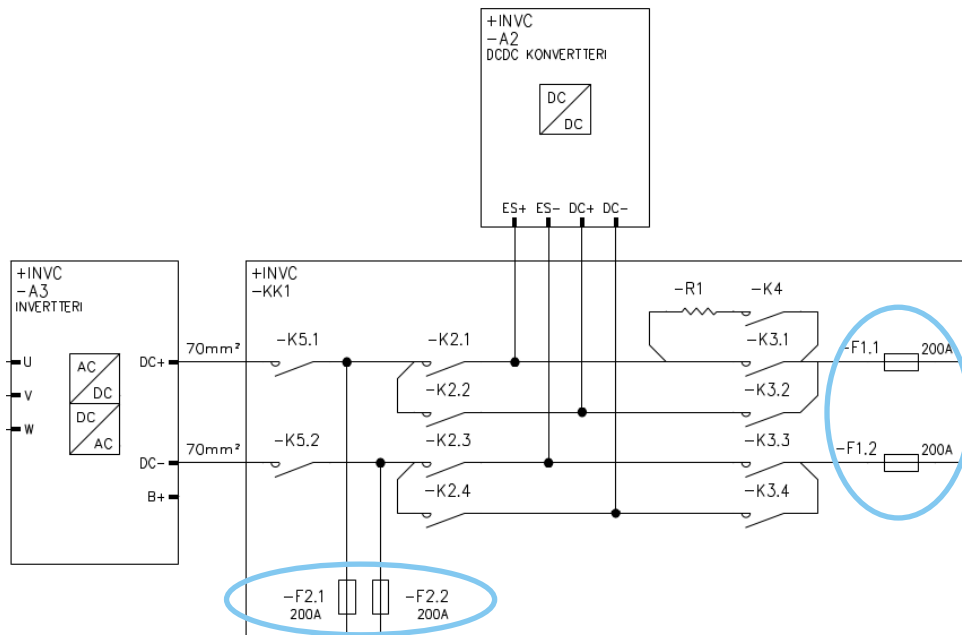
Yksittäisessä akkumoduulissa ei ole sisäistä sulaketta, vaan akuston pääsulake on PDU:lla. Tässä laitteistossa kytketään kahta akustoa rinnan ja sarjaan kytkentäkotelolla ennen PDU:ta, minkä takia akkujen ja PDU:n väliin täytyy asentaa sulakkeet myös kytkentäkotelossa tapahtuvaa vikatilannetta varten (kuvio 20). PDU:n ja akustojen sulakkeet ovat vain + -navassa. Muualla järjestelmässä sulakkeet ovat molemmilla navoilla.



KUVIO 20. Akuston sulakkeet

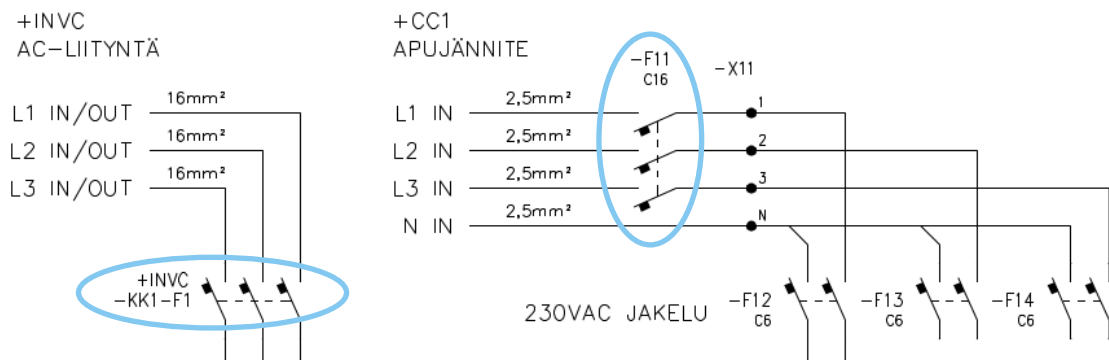
Akuston suojalaitteiden nimellisvirta tässä laitteistossa on 200 A riippumatta siitä, ovatko akkuvaunut sarjassa vai rinnankytkettyinä. Laitteiston tasasähköpiiri on mitoitettu kokonaisuudessaan suurimmillaan 200 A virralle hetkellisiä piikkivirtoja lukuun ottamatta. Konvertterin jatkuva virta on 120 A, mutta 200 A virtaa voidaan

käyttää 1 / 10 min sykleissä. Suojalaitteet ovat kiskoston lähdoissa ja laitteilla pääpiirikaavion mukaan. Konvertterin valmistaja ohjeistaa käyttämään 250 A sulaketta, mutta ohjelmallisesti virtaa rajoittamalla myös 200 A sulakkeet sopivat. Invertterivaunussa invertterin ja konvertterin lähtöjen suojalaitteita on yhdistetty siten, että välipiirin ulosotossa ja DC-kiskostoliitynnässä on sulakkeet, mutta ei välittömästi laitteiden liittimillä (kuvio 21).



KUVIO 21. Invertterivaunun DC-jännitteiden suojalaitteet

Invertterivalmistajan ohjeen mukaan AC-liitännän suojalaite saa olla korkeintaan 105 A ja DC-liitännän 250 A. Invertterivaunu liitetään 63 A voimapistorasiaan, joten AC-liitynnän suojalaite on enintään 63 A. Invertteri täytyy parametroida niin, että vaihtovirta jää hiukan alle 63 A. Ohjauskeskuksen AC-liitännälle riittää 16A tai 10A johdonsuoja-automaatti (kuvio 22).



KUVIO 22. AC-liityntöjen suojalaitteet

3.3.2 Johtimien ja kaapeleiden mitoitus

Pääpiirissä käytetään 200 A gPV / 1000V -tyyppisiä sulakkeita. Kaapelin kuormitettavuus tällä suojalaitteella pitää olla vähintään 221 A (SFS-6000-5-52, Taulukko Y.52.1). Taulukon B.52.10 mukaan **70 mm²** PVC-eristetyn kuparikaapelin kuormitettavuus on 251 A, kun piirissä on 2 ilmassa olevaa johdinta, jotka koskettavat toisiaan. Valittu pääpiirin kaapeli on siis riittävän kokoinen laitteistoon. Invertterin ja konvertterin suositus pääpiirin kaapelista on 50 mm² Cu, mikä toteutuu.

Pääpiirin 70 mm² kaapelin 1 s oikosulkukestoisuus on $70\text{mm}^2 \cdot 138\text{ A/mm}^2 = 9660\text{A}$ tietyin ehdoin (Lapp Group T12, 8). Tietyin ehdoin akustolta voidaan saada 400 A virta 10 sekunnin ajan, joten lasketaan kaapelin kestävyys 10 sekunnin ajalle oikosulkukestoisuutta käyttäen:

$$I_{kaapeli,10s} = \frac{I_{1s}}{\sqrt{t}} = \frac{9660\text{A}}{\sqrt{10\text{s}}} = 3055\text{A} > 400\text{A}$$

Kaapelin pitäisi kestää akuston piikkivirtaa 400 A hyvinkin 10 s ajan. Sulake 200 A gPV kestää 400 A piikkivirtaa yli 200 s (kuvio 24), joten akusto pystyy antamaan tarvittaessa hetkellistä 400 A virtaa 10 sekunnin ajan.

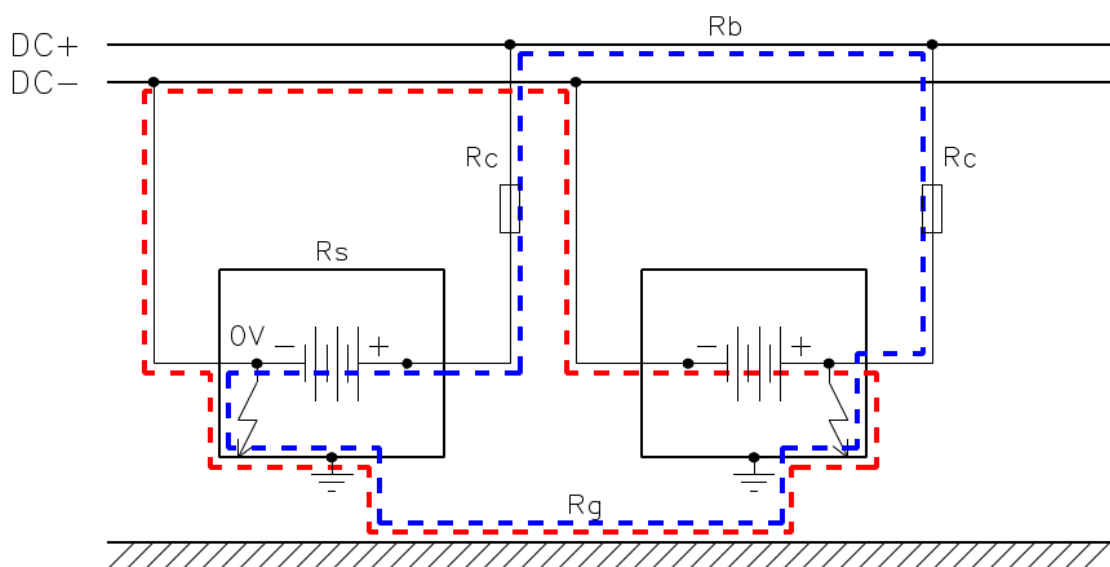
Pääpiirin kaapelit ovat lyhyitä eikä suojalaitteiden toiminnan kannalta kaapelin maksimipituus ole rajoittava. Pituutta sen sijaan rajoittavat akkuvalmistajan ohjeet kaapelipituuksien osalta:

- Akkujen väliset kaapelit max 3 m
- PDU:n ja kuorman väliset kaapelit max 5 m

Vaihtojännitteen johdotukset määräytyvät johdonsuojakatkaisijoiden ja verkkoliityntäpisteiden mukaan. Invertterivaunun AC-liityntä tehdään 16 mm² johtimilla (kuormitettavuus >63A). Ohjauskeskuksen liityntään riittää 2,5 mm² poikkipinta.

3.3.3 Oikosulkutilanne

Laitteiston DC-osa on tasajännitteinen IT-verkko, koska järjestelmän jännitteiset osat eivät ole mistään kohdasta maadoitettu. Tällöin ensimmäinen maasulkuvika aiheuttaa ainoastaan äärijohtimen potentiaalın siirtymisen maapotentiaaliin ja mättömän oikosulkuvirran. Vasta toinen maasulkuvika aiheuttaa suuren vikavirran mahdollisesti montaa eri reittiä pitkin (kuvio 23).



KUVIO 23. Kaksoismaasulku (akkuvaunut rinnankytketyt)

Aiemmin todettiin jo, että tasajännitekaapeleiden oikosulkukestoisuus on riittävä. Tutkitaan vielä, mitä vaaditaan, että suojalaitteina olevat sulakkeet toimivat. Kun tarkastellaan yo. kuvion sinisen vikavirran kulkureittiä, niin reitin kokonaisresistanssi 20 m pituisilla kuparikaapeleilla on noin

$$R_k = 2 \cdot R_c + R_g + R_b \approx 2 \cdot 0,3 \Omega/\text{km} \cdot 20\text{m} + 1,4 \Omega/\text{km} \cdot 20\text{m} + 0 = 40\text{m}\Omega$$

(ominaisresistanssit 70Cu / 0,3 Ω/km ja 16Cu / 1,4 Ω/km). Akkujen kytkentäkotelossa olevien kontaktoreiden ylimenovastus on 0,2 m Ω , mikä voidaan jättää huomioimatta.

Akun oikosulkuvirtaa ei tiedetä tarkasti, mutta valmistajan mukaan se on suuruusluokaltaan *useita tuhansia ampeereja*. Jos arvioidaan maltillisesti, että akun antama oikosulkuvirta on 2000 A, niin seitsemän akun sarjaankytkennän sisäinen resistanssi nimellisjännitteessä on

$$R_s = \frac{U_{\text{oikosulku}}}{I_{\text{oikosulku}}} = \frac{7 \cdot 48,3\text{V}}{2000\text{A}} = 0,17 \Omega$$

Vikavirtapiirin oikosulkuresistanssi on yhteensä 0,21 Ω ja oikosulkuvirta

$$I_{\text{oikosulku}} = \frac{U_{\text{oikosulku}}}{R_{\text{oikosulku}}} = \frac{7 \cdot 48,3\text{V}}{0,21\Omega} = 1620 \text{ A}$$

Sulakkeen laukaisukäyrästä (kuvio 24) nähdään, että 200 A sulakkeet toimivat alle 0,4 sekunnissa, kun oikosulkuvirtaa on yli 1500 A. Nimellisjännitteessä suojalaitteet toimivat oikein.

Akkukäytössä on väistämättä sellainen piste, missä akkujen varaustilanne on niin matala, etteivät suojalaitteet enää toimi vaaditussa ajassa. Testilaitteiston akuista ei ole käytettävissä SoC / R_{int} tai U / R_{int} -käyriä, joten tarkkaa tietoa sisäisen vastuksen ylärajasta tai saatavilla olevan oikosulkuvirran alarajasta ei ole. LTO-akuille on kuitenkin tyypillistä, että sisäinen impedanssi on melko tasainen välillä 10–90 % SoC (Bank 2021, 83). Tutkimuslaitteiston akkuja on tarkoitus käyttää tällä tai hiukan suppeammalla välillä 10–80 % SoC, jolloin suojalaitteet aina toimivat.

Varaustilan asemesta suojalaitetta valitessa kannattaa huomioida syklimäärä, joka voi kaksinkertaistaa kennon sisäisen resistanssin (kuvio 13). Vaikka alun perin akkujen oikosulkuvirta on useita tuhansia ampeereja, niin 10000 syklin jälkeen oikosulkuvirta voi olla enää tuhat ampeeria. Tällöin akuston oikosulkuvirta ei aina riitä laukaisemaan 200 A sulaketta vaaditussa ajassa (min 1500 A / 0,4 s). Karkea ohje akuston käyttöiän suhteen voisikin olla, että

Akkujen oikosulkuvirta / sisäinen resistanssi pitää mitata tai muuten tarkistaa 10000 lataussyklin jälkeen, jotta 200 A suojalaitteet toimivat edelleen oikein.

3.3.4 Potentiaalintasaus

Pienjännitstandardin SFS 6000 luvut 4–41 ja 5-54 määrittelevät maadoituksen ja potentiaalintasauksen perusvaatimukset. Perusmäärittelyn mukaan suojajohdin on puolet äärijohtimen koosta silloin, kun äärijohtimen poikkipinta on vähin-

tään 35 mm² (SFS 6000-5-54, taulukko 54.2). Tällä määrityksellä saadaan tarpeettoman suuria poikkipinta-aloja tässä laitteistossa, missä äärijohdin on 70 mm² ja oikosulkuvirrat ovat kaapelin kokoon nähden maltilliset. Standardin mukaan suojajohtimen poikkipinta voidaan myös laskea kaavalla 2

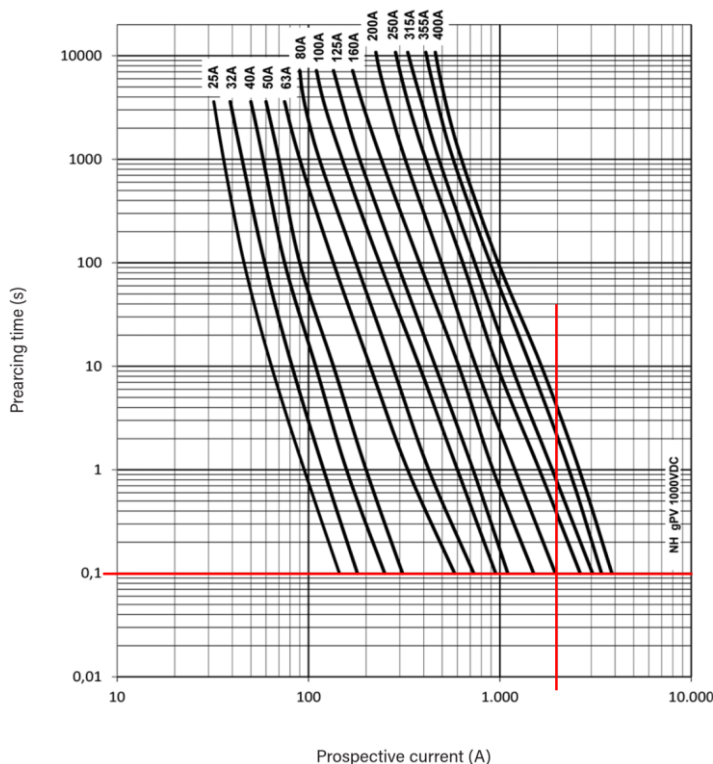
$$S = \frac{1}{k} \sqrt{I^2 t}, \quad (2)$$

missä

k	Materiaalikerroin, tässä tapauksessa 143
I	Prospektiivisen vikavirran RMS-arvo suojalaitteella
t	Suojalaitteen toiminta-aika

(SFS 6000-5-54, 379).

Laitteistossa käytetään 200 A kokoisia gPV-tyyppin sulakkeita. Alla kuvioista 24 nähdään, että yli 2000 A oikosulkuvirta aiheuttaa sulakkeen toimimisen alle 0,1 sekunnissa.

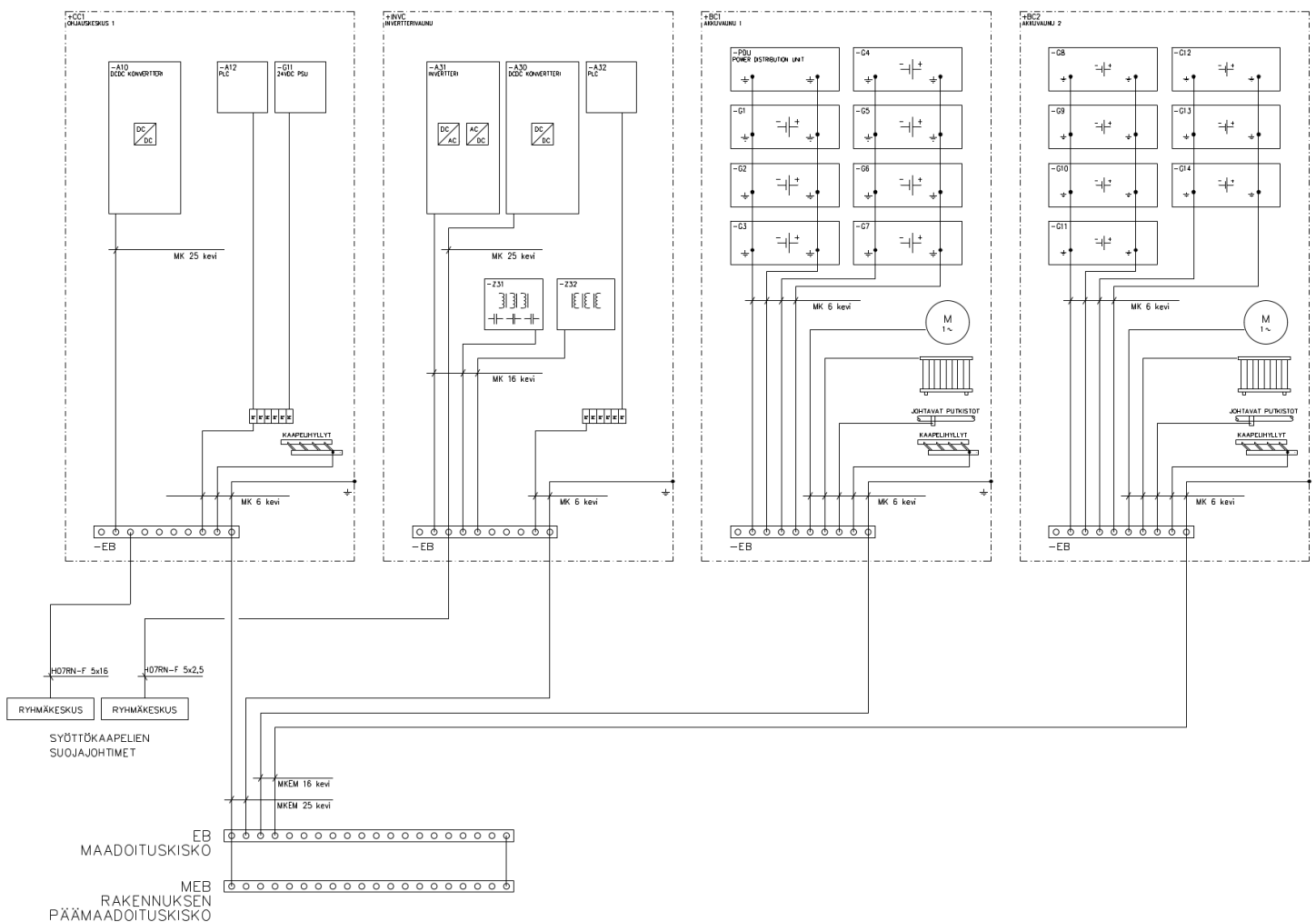


KUVIO 24. PV-sulakkeiden laukaisukäyrät (dF Electric, 4)

Arvioidaan, että akuston oikosulkuvirta on korkeintaan 5000 A. Suojajohtimen poikkipinta 5000 A virralla ja 0,1 sekunnin laukaisuajalla pitää kaavan 2 mukaan

olla vähintään 11 mm². Akuilla, akkuvaunuilla ja invertterillä voidaan siis käyttää 16 mm² tai 2x6 mm² suojohtinta. Konvertterilla käytetään vähintään 25 mm² suojohtinta valmistajan käyttöohjeen mukaisesti.

Akkuvaunujen ja invertterivaunun muita johtavia osia voivat olla esimerkiksi kaapelihyllyt, metallinen runko ja lauhduttimen osat. Näiden joutuminen jännitteelliseksi ei ole todennäköistä, mutta on suositeltavaa maadoittaa esimerkiksi vaunun metallirunko. Erillisen mekaanisesti suojaamattoman suojohtimen minimipoikkipinta on 4 mm² (SFS 6000-5-54, 380), mutta käytännöllisistä syistä voidaan hyvin käyttää 6 mm² johdinta suojaamaan muut johtavat osat. Metalliset kytkentäkotelot ja ohjauskeskuksen runko sekä ovet liitetään maadoituskiskoon myös 6 mm² johtimella. Alla kuviossa 25 on esitetty laitteiston maadoituksen periaatteet ja poikkipinnat.



KUVIO 25. Maadoituskaavio

4 AKKUVAUNU

4.1 Akut

4.1.1 Tekniset tiedot

Yhden akkuyksikön (kuva 4) tekniset tiedot ovat esitetty taulukossa 6. Akun lataukselle ja purkamiselle on kennokohtaiset ylä- ja alarajat, jotka ovat tehdasaseteltavia parametreja. Akkuyksikössä ei ole sisäistä sulaketta.

TAULUKKO 6. Akkuyksikön tiedot (Akkuvalmistajan esitelehtinen)

Nimellisjännite	48,3 V
Kapasiteetti	2,2 kWh
Energiasisältö	46 Ah
Nimellisteho	10 kW
Piikkiteho (10 s)	20 kW
Suosittelun käyttölämpötila	5-35 °C



KUVA 4. Akkuyksikkö (Kuva: Mikko Tillander)

Akussa on pääpiirin DC+ ja DC- -liittimien lisäksi jäähdytyspiirin tulo- ja lähtöputket sekä akkujen väliset signaaliliittimet heikkovirtalenkin kytkentää varten (Akkuvalmistaja 2023, 16). Jokaiselta akkuyksiköltä mitataan ja raportoidaan järjestelmään mm.

- Kennojen jännitteet (min, max, ave)
- Lämpötila (min, max, ave)
- HVIL-lenkin eheys

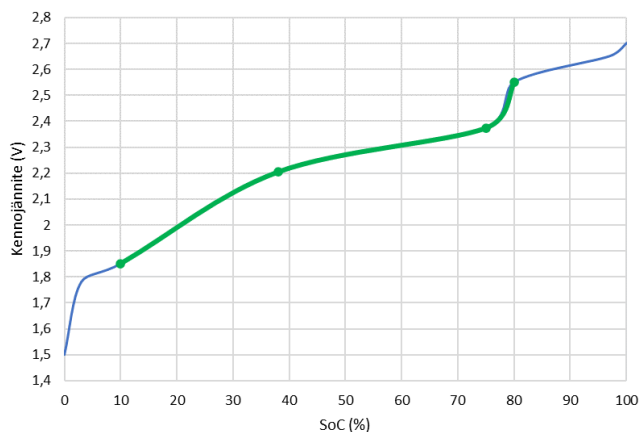
HVIL (High Voltage Interlock Loop) kytkentäpisteet ovat kaikissa akkuyksikön sähköisissä liittimissä. Jos akuston joku liitin on irti, niin PDU ilmoittaa tehdasaseteltavan viiveen jälkeen HVIL-vian CAN-väylää pitkin ja asettaa kaikki virtarajat nollassi.

LTO-akku sietää hyvin luonteensa takia suurta lataus- ja purkuvirtaa, paljon lataussyklejä, syväpurkamista sekä matalia ja korkeita lämpötiloja. Akkujen nimellisteho on 10 kW, joka vastaa lataus- ja purkuvirtaa 200 A. Tällöin C-arvo 4,3C,

mikä on yleisesti akulle korkea latausvirta. Käyttöiän ja optimaalisen suorituskyvyn takia akkuja kannattaa käyttää pääasiassa näissä olosuhteissa:

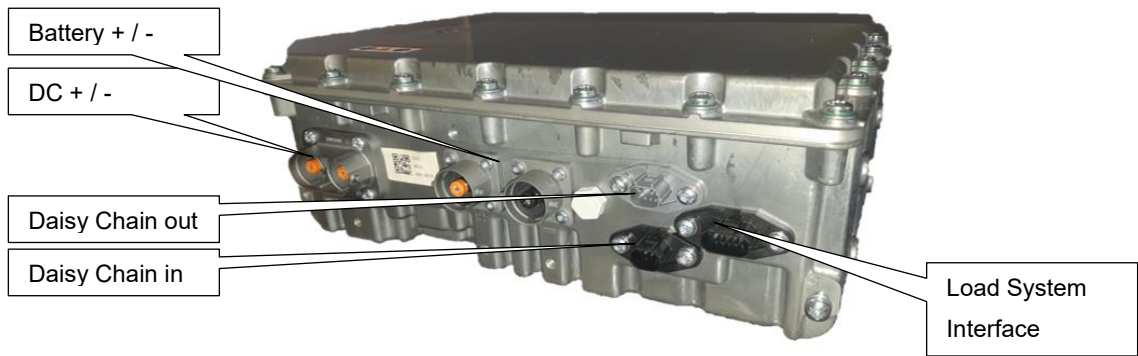
- Lämpötila 5–35°C
- Varaustila SoC 10–80 %
- Akkujännite 39–54 V

Näissä olosuhteissa lataus- ja purkuvirtoja ei käyttöohjeen mukaan lähtökohtaisesti tarvitse rajoittaa. Virtoja rajoittavat raja-arvot, mm. kennojännitteiden rajat, ovat tehdasaseteltavia parametreja, jotka voidaan asettaa käyttökohteen mukaan. Alla kuviossa 26 on esitetty *havainnollistamistarkoituksessa* kennojännitteen ja varaustilan yhteys karkealla tasolla sekä optimaalinen käyttöalue (vihreällä). Sijoitetut datapisteet ovat akuilta mitattuja arvoja tai käyttöohjeessa mainittuja. Käyrää ei tule soveltaa tarkkojen jännitteiden laskemiseen vain on pelkästään käyttäytymistä havainnollistava.



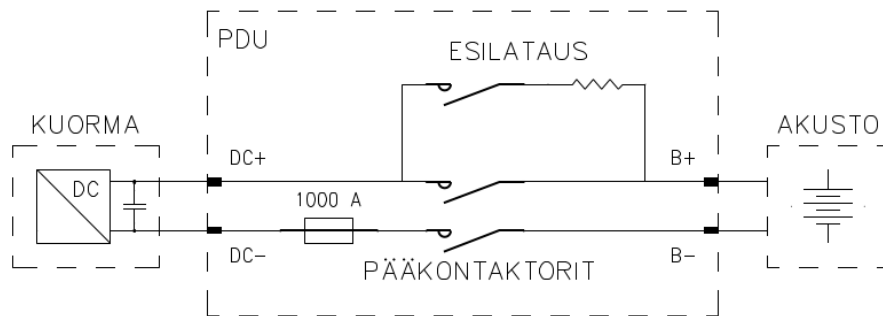
KUVIO 26. Kennojännite / SoC -käyrä

Akuston hallinnan ja kommunikoinnin hoitaa Power Distribution Unit PDU, (kuva 5). PDU:lla on akuston pääpiirin sulake, pääkontaktorit, kuorman esilatauspiiri, kommunikointiliittimet sekä ohjausyksiköt BMU (Battery Management Unit) ja HVIU (High Voltage Instrumentation Unit). PDU:n nimellisvirta on mitoitettu vastaamaan akkumoduulin nimellisvirtaa 200 A. Hetkellisesti PDU pystyy käsittelemään kaksin- tai jopa kolminkertaista virtaa.

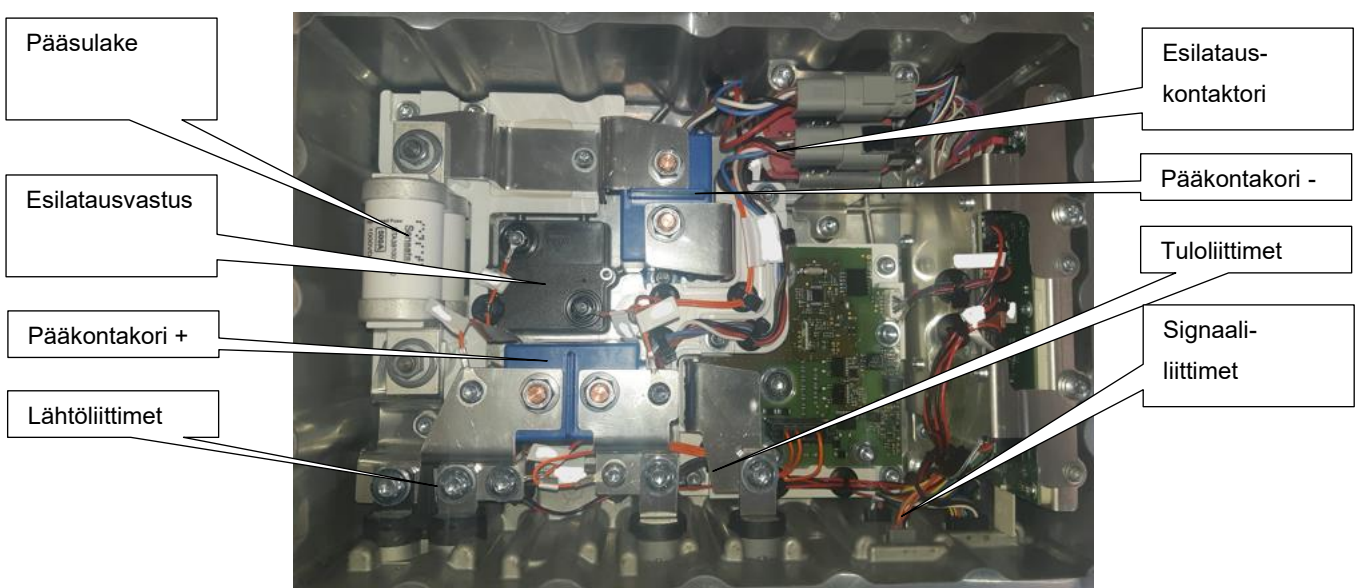


KUVA 5. PDU (Kuva: Mikko Tillander)

PDU:n pääpiiri on melko yksinkertainen. Pääkontaktoreita on kaksi, mutta sulake on vain DC- -puolella ja esilatauspiiri vain DC+ -puolella. PDU:n pääpiiri on esitetty kuviossa 27. Kuvaan 6 on merkattu PDU:n pääkomponentit ja liittimet kotelon sisäpuolella.



KUVIO 27. PDU:n pääpiiri



KUVA 6. PDU:n pääkomponentit (Kuva: Mikko Tillander)

4.1.2 Mittaukset

Akustolla on mm. seuraavat toiminnallisuuteen ja turvallisuuteen liittyvät mittaukset tai ominaisuudet:

- Yksittäisen kennon jännitemittaus
- Akkujännitteen mittaus
- DC-linkin (eli kuorman) jännitemittaus
- Akun lämpötilan mittaus
- Sisäinen sulake (PDU)
- Eristysresistanssin mittaus
- Akuston pääkontaktori
- Esilatausvastus ja -kontaktori
- HVIL lenkin monitorointi
- CAN-kommunikointi
- SoC ja SoH laskennat

(Akkuvalmistaja 2023, 16)

Jos yksittäisen kennon jännite eroaa muista sallittua enemmän (tehdasaseteltava parametri), niin akusto käynnistää kennon balansointirutiinin. Jokaisella kennolla on oma passiivinen balansointipiiri, jonka avulla varaustason ja jännitteiden erot voidaan tasoittaa. Kennojännitteet vaikuttavat myös järjestelmälle raportoitaviin virtarajoihin. Jos yksittäisen kennon jännite on riittävän kauan tehdasasetuksena määrättyjen rajojen yli tai ali, niin PDU lähettää järjestelmään vikatiedon ja asettaa kaikki virtarajat nolnaan. (Akkuvalmistaja 2023, 26).

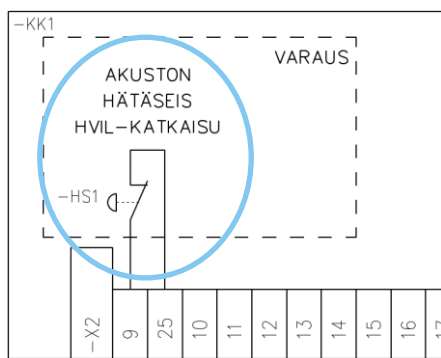
Tehtaalla on asetettu kennoille rajalämpötilat ja aikarajat lämpötilojen ylityksille. Jos tietyn ajan kuluessa lämpötilat eivät ole korjaantuneet, niin PDU lähettää järjestelmään vikatilaa ja asettaa kaikki virtarajat nolaksi. Lämpötilamittaukset vaikuttavat myös virtarajoihin. (Akkuvalmistaja 2023, 22). Muita mittauksia ja ominaisuuksia käsitellään muiden kappaleiden yhteydessä.

4.1.3 Dynaaminen virranhallinta

PDU laskee akun lämpötilan, varaustilan sekä kennojen jännitteiden perusteella jatkuvasti suurimmat dynaamiset lataus- ja purkuvirrat (eli jatkuvan virran rajat) ja raportoi ne järjestelmään. Dynaamisen virtarajan yli voidaan akustolta ottaa hetkellisesti suurempaa virtaa. Piikkivirrat huomioidaan jatkuvan virran rajojen laskennassa integraalitermillä. Jos rajoja ylittäviä piikkivirtoja on liikaa ajan suhteen ja integraalitermi kasvaa esiasetun rajan yli, niin PDU lähettää järjestelmään vikatilaa ja asettaa kaikki virtarajat nolllaksi. Jos akustoa käytetään tehdasasetetuissa rajoissa, esimerkiksi 5–35°C / SoC 10–80 % ja kennojännitteet ovat rajojen sisällä, niin PDU ei rajoita jatkuvaa lataus- ja purkuvirtaa tehdasasetetun nimellivirran alle. (Akkuvalmistaja 2023, 24–25).

4.1.4 Turvatilaan siirtyminen

Akuston ja järjestelmän välisessä kommunikoinnissa käytetään fyysistä High-Speed CAN -väylää. Turvallisuussyistä CAN-väylän kommunikointiin ei tässä laitteistossa luoteta kriittisten viestien välittämistä. Akkuvaunu 1:n kytkentäkotelolle on suunniteltu varaus hätäseis-painikkeen lisäämisestä. Painike tulee katkaisemaan kuvion 28 mukaan HVIL-lenkityksen, mikä siirtää akuston turvalliseen tilaan ja kytkee akut irti kuormasta PDU:lla.

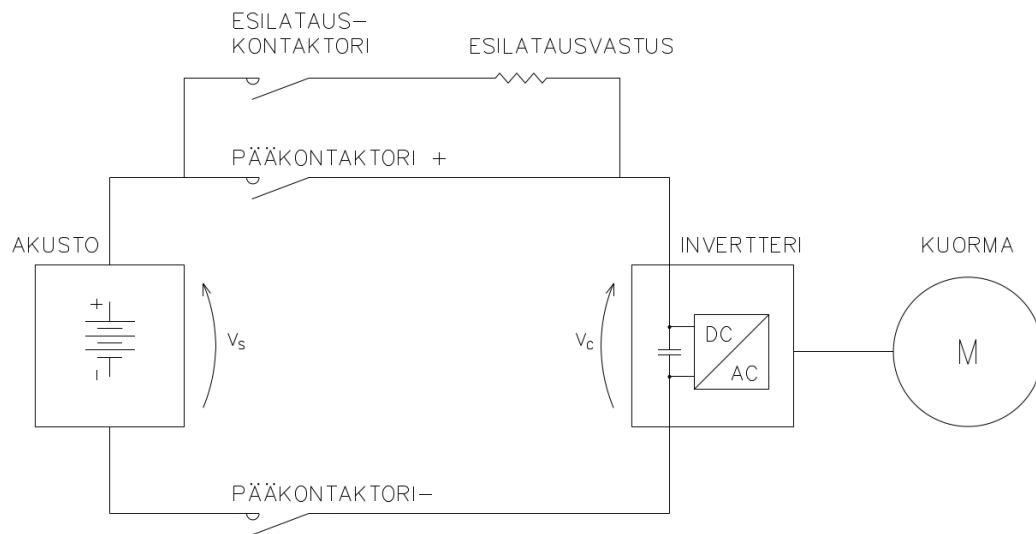


KUVIO 28. HVIL-lenkin katkaiseva HS-painike (optio)

4.2 Esilataus

4.2.1 Esilatauksen mitoitus

Kytettäessä kahta DC-laitetta yhteen potentiaaliin tarvitaan yleensä jännitteentasaus ennen kytkentää. Yksinkertaisimmillaan jännitteentasaus tehdään kytke-
mällä esilatausvastus jännitteiden V_S ja V_C väliin kuvion 29 mukaan.



KUVIO 29. Esilatauspiirin rakenne

Esilatauksen tarkoitus on ladata esimerkkipuomana olevan invertterin välipiirin kondensaattorit virranrajoitusvastuksen kautta, jolloin vältetään iso jännitteentasausvirta pääkontaktoria kytkettäessä. Jännitteen tasauksen jälkeen pääkontaktori kytketään ja esilatausvastus irrotetaan piiristä. Välipiirin kondensaattorin jännite V_C ajan t suhteen voidaan esittää kaavalla 3

$$V_C = V_S \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (3)$$

missä

V_S	Akuston / ES:n jännite
t	Aika esilatauspiirin kytkentähetkestä
R	Esilatausvastuksen resistanssi
C	Välipiirikondensaattorin kapasitanssi

(Sensata 2020, 5).

Kaavassa esiintyvä termi $RC = \tau$ on systeemin aikavakio, jonka avulla voidaan määrittää, kuinka nopeasti esilatauksen pitäisi tapahtua. Alla taulukkoon 7 on laskettu välipiirikondensaattorin suhteelliset jännitteet, kun aika on välillä $1 \dots 5 \tau$ s.

TAULUKKO 7. Ajan $t = n * \tau$ vaikutus kondensaattorin suhteelliseen jännitteeseen V_C/V_S

$n * \tau$	V_C/V_S
1 τ	63,21 %
2 τ	86,47 %
3 τ	95,02 %
4 τ	98,17 %
5 τ	99,33 %

Yleisesti käytetään arvoa 5τ , jonka jälkeen tulkitaan kondensaattorin olevan täysi. Tässä tapauksessa riittää 4τ (98,17 % lataustaso), koska pääpiirin laitteet sietävät kohtuullisia virtoja eikä lyhytaikainen jännitteentasausvirta haittaa. Alla taulukkoon 8 on laskettu sopivia vastusarvoja esilatausajan ja kapasitanssin funktiona.

TAULUKKO 8. Vastusarvon valinta esilatausajan ja välipiirin kapasitanssin mukaan

	C=2800uF	C=5600uF	C=6800uF
4 τ (s)	R (Ohm)	R (Ohm)	R (Ohm)
2	178,57	89,29	73,53
4	357,14	178,57	147,06
6	535,71	267,86	220,59
8	714,29	357,14	294,12
9	803,57	401,79	330,88

Testilaitteiston invertterin välipiirikondensaattorit ovat 6800 uF kokoiset. Valitaan esilatausajaksi minimissään 9 sekuntia, jolloin tarvitaan 330 Ohm kokoinen vastus. Tämä esilatausaika on kohtuullisen pitkä, mutta se ei tässä käytössä haittaa. Riittävän pitkä latausaika pienentää vastaavasti esilatausvastuksen teholuokkaa ja fyysistä kokoa.

Esilatausvastuksen kuluttama teho esilatauksen aikana keskimäärin voidaan kohtuullisella tarkkuudella arvioida kaavalla 4

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2t} C V_S^2 \quad (4)$$

missä

E	Kondensaattoreiden varastoima energia
C	Välipiirin kapasitanssi
V_S	Akuston / ES:n jännite
t	Aika esipiirin kytkentähetken jälkeen

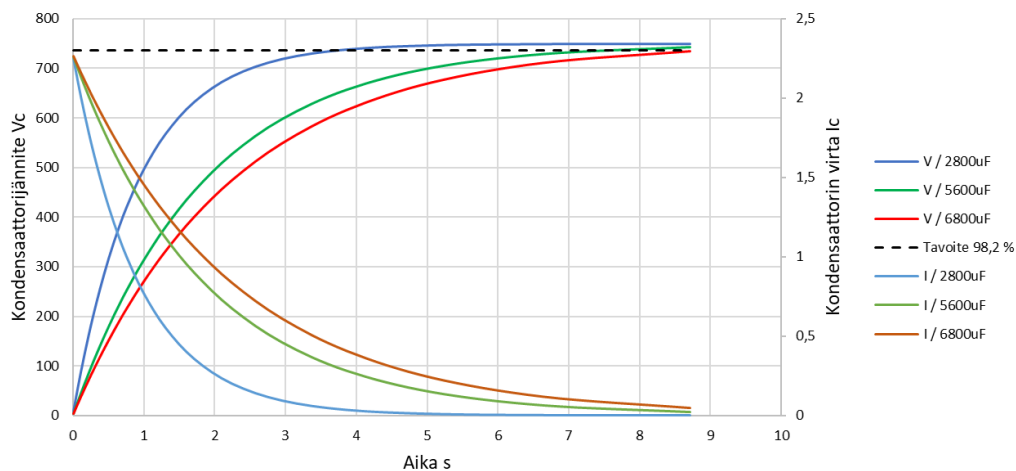
(Sensata 2020, 7–8).

Jännitteellä 750 V ja välipiirikondensaattorilla 6800 uF kannattaa invertterin esilatausvastukseksi valita 330 Ohm / >225 W vastus. Alla taulukkoon 9 on koottu invertterin esilatausvastuksen määrittämisessä käytetyt valinnat. Invertterin esilatauspiiri tulee sijaitsemaan invertterivaunun kytkentäkotelolla.

TAULUKKO 9. Esilatausvastuksen valintaparametrit

Lataustaso	98,17 %
Latausaika	9 s
Kapasitanssi	6800 uF
Vastus	330 Ohm
Jännite	750 V
Vastusteho	>225 W

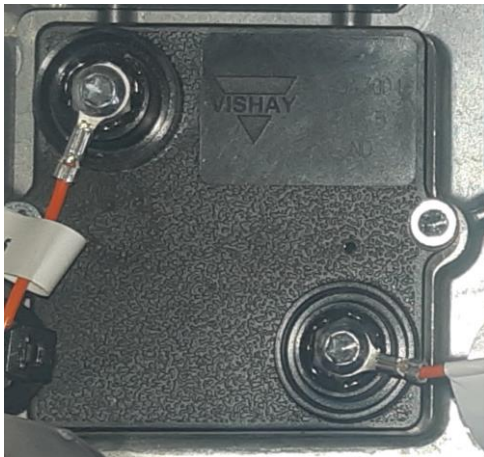
Alla kuviossa 30 on esitetty graafisesti välipiirikondensaattorin koon vaikutus välipiirin latautumiseen. Lataamisen jännitteen raja arvona on käytetty suhteellista jännitettä 98,2 % (=4 τ aika), vastus on 330 Ohm ja kytkettävä jännite 750 V. Kuvioista nähdään, että esilatausaika lyhenee nopeasti, jos välipiirikondensaattori on pieni.



KUVIO 30. Välipiirikondensaattorin jännite ja virta, kun $R=330$ Ohm ja $V_S=750$ V

4.2.2 Esilatauspiiri PDU:lla

Ennen kuorman kytkentää akustolle, suoritetaan kuorman kapasitanssin esilataus. Ohjausyksikkö PDU sisältää esilatausvastuksen ja tarvittavat laitteet sen kytkemiseksi. Tätä akuston esilatausta käytetään tutkimuslaitteistossa keskuksen DCDC-konvertterin esilataukseen ennen DC-jännitteiden kytkentää. PDU:n sisältämä esilatausvastus on koteloinnin perusteella Vishayn valmistama 240 Ohm ja 300 W LPSA300 -tyypin vastus.



KUVA 7. PDU:n esilatausvastus (Kuva: Mikko Tillander)

DCDC-konvertterin välipiirin kondensaattori on 2800 uF, jolloin aikavakio $\tau = 240 \text{ Ohm} \cdot 2800 \text{ uF} = 0,672 \text{ s}$. Riittävä jännitetaso saavutetaan noin 4τ ajassa eli 2,7 s kohdalla.

PDU:n esilatausajastimen aika sekä kuorman ja akuston jännite-eron maksimiarvo esilatauksen lopussa ovat tehdasaseteltavia. Esilatauksen toiminta PDU:n ja DCDC-konvertterin välillä tullaan laitteiston rakentamisen aikana tarkastamaan. Jos PDU:n esilatausvastus on liian suuri, jolloin esilatausaika on tehdasasetusta pidempi, niin ohjauskeskukselle ja invertterivaunulle pitää rakentaa ulkoiset esilatauspiirit.

4.3 Pääpiirin kytkentäsekvenssi

Akuston hallintamoduuli PDU:ssa on DC-link-pääpiirin kontaktori ja esilatausvastus ja -kontaktori. Akkumoduuleilla ei ole omia kontaktoreita eikä sulakkeita.

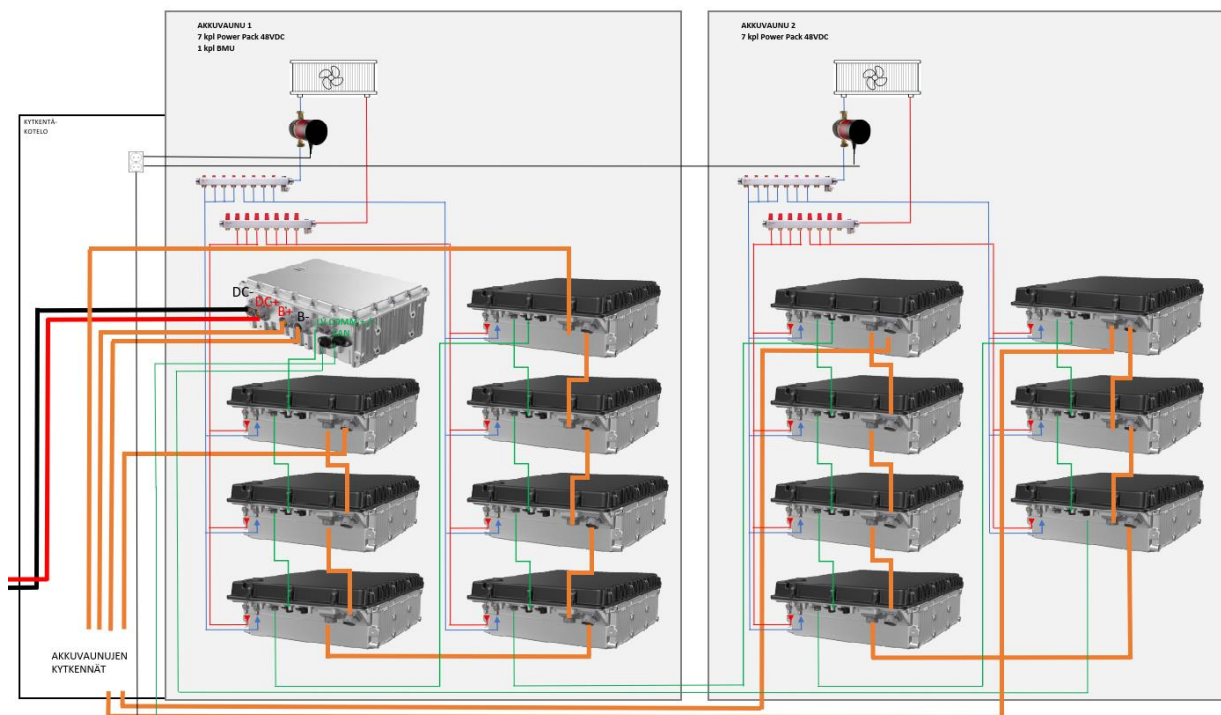
Akuston kytkentä kuormaan noudattaa seuraavaa sekvenssiä:

1. Lähetetään kytkentäkomento PDU:lle CAN-väylää pitkin
2. PDU käynnistää esilatausajastimen ja kytkee esilatauspiirin
3. PDU mittaa DC-linkin ja akuston välistä jännite-eroa samalla kun esilatauspiiri lataa DC-linkin kapasitanssia
4. Jos jännite-ero on sallituissa rajoissa esilatausajastuksen päätyttyä, kytketään akusto kuormaan ja irrotetaan esilatausvastus
5. Jos jännite-ero on sallittua suurempi esilatausajastimen kuljettua loppuun, niin akku ilmoittaa virheestä ja DC-linkkiä ei kytketä

(Akkuvalmistaja 2023, 22). Akkujen sisäisen kontaktorin ja esilatauspiirin ansiosta ulkoista esilatausta ei tarvita, ellei ulkoinen kapasitanssi ole poikkeuksellisen suuri.

4.4 Akkuvaunujen rakenne

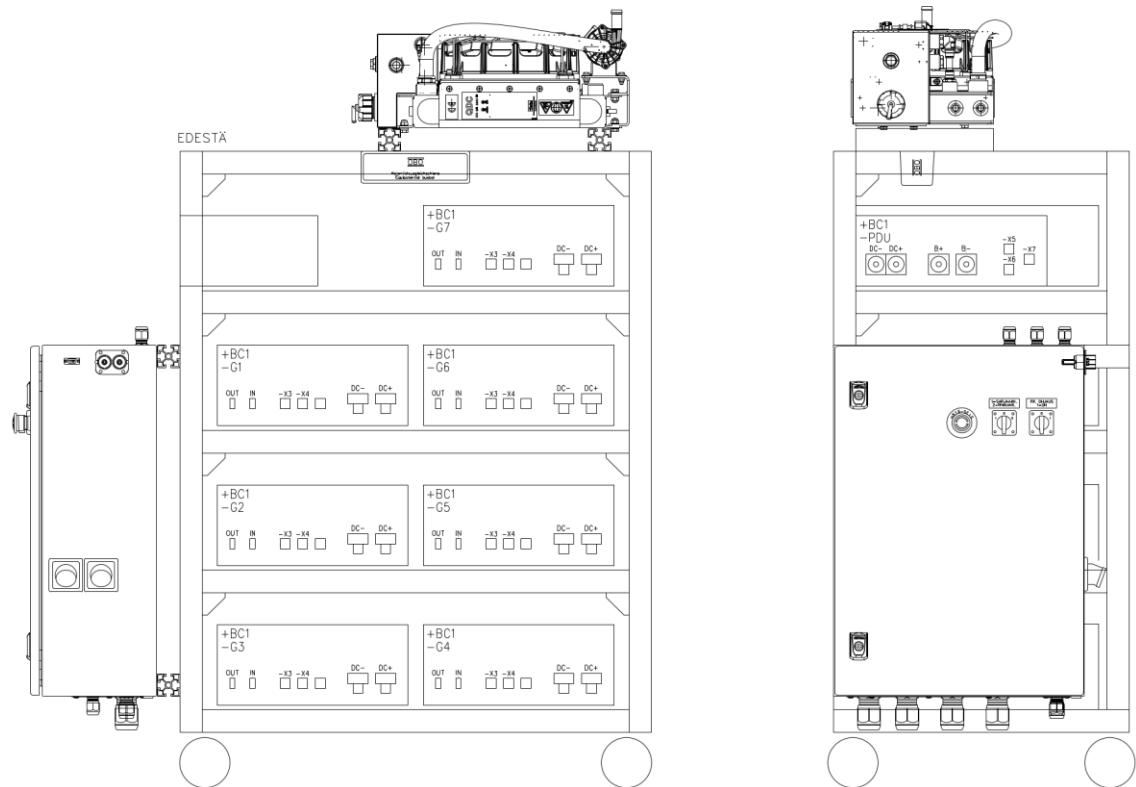
Akkuvaunuja on kaksi, joista ensimmäisessä on akuston hallintalaite PDU sekä kytkentäkotelo KK1. Molemmissa vaunuissa on seitsemän akkua. Akkuvaunu 1:n kytkentäkoteloon on sijoitettu akkuvaunujen kytkentäkontaktorit, pumppuhjauksen kytkentäliittimet ja riviliittimet ja releet signaaleille. Jäähdytysjärjestelmään kuuluu lauhdutinyksikkö, kytkentärasia, jakotukit ja tarvittavat letkut. Alla kuviossa 31 on esitetty akkuvaunujen laitteet ja kaapeloinnit kaaviomuodossa.



KUVIO 31. Akkuvaunujen laitteet ja johdotukset

Kahden akkuvaunun DC-kaapelit on viety kytkentäkotelolle vaunujen sarjaan- tai rinnankytkentää varten. Tämä on tarpeen, jotta DC-kiskoston jännite saadaan säädettyä aukottomasti. Kummankin akkuvaunun 7 akkua on kytketty vaunun sisäisesti sarjaan. Akkuvaunut painavat noin 400 kg ja 350 kg, joten niiden liikuttaminen täytyy suunnitella etukäteen ja nostaminen on hankalaa. Vaunujen runko on 45 mm alumiiniprofiilia, joka kestää akkujen painon hyvin.

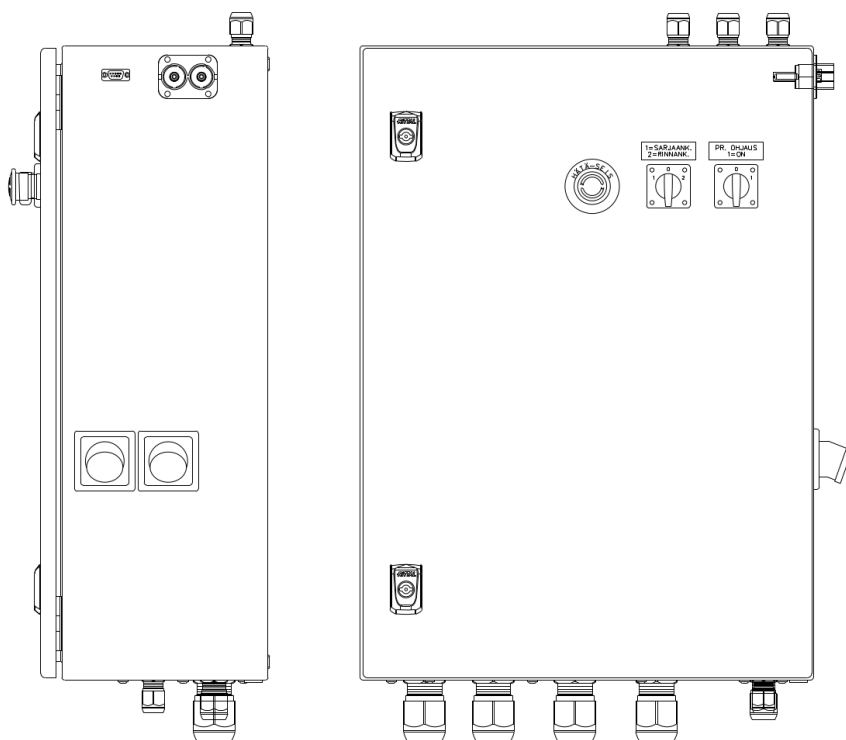
Alla kuviossa 32 on esitetty akkuvaunun 1 laitesijoittelu. Jäähdytysjärjestelmä on tarkoitus sijoittaa vaunun katolle, mutta lopullinen paikka määritetään, kun putkisto asennetaan. PDU:n etulevy osoittaa vasemmalle, koska akuston kaapelit lähtevät suoraan alaspäin kytkentäkotelon taakse.



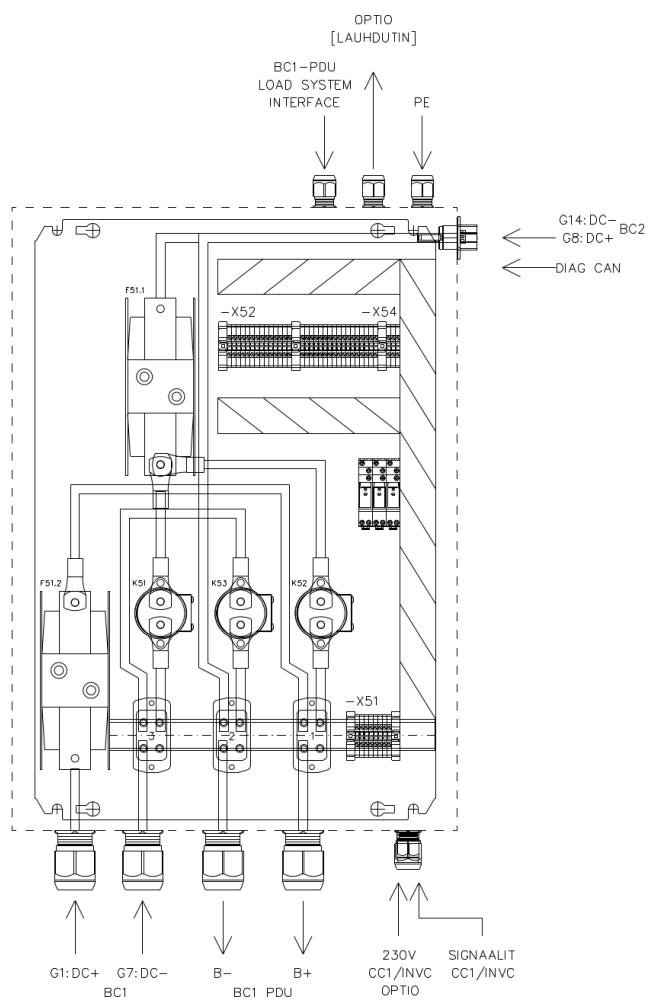
KUVIO 32. Akkuvaunu 1:n laitesijoittelu

4.5 Kyt Kentäkotelo

Kuvioissa 33 ja 34 on esitetty akkuvaunu 1:n kytkentäkotelon suunnitelma ulko- ja sisäpuolelta. Pääpiirin paksut johtimet ja liittimet sekä isot komponentit määräävät tarkemmin, mihin laitteet lopulta sijoittuvat. Lopullinen rakenne muotoutuu kokoonpanovaiheessa.



KUVIO 33. Kytentäkotelo +BC1-KK1 ulkopuolelta



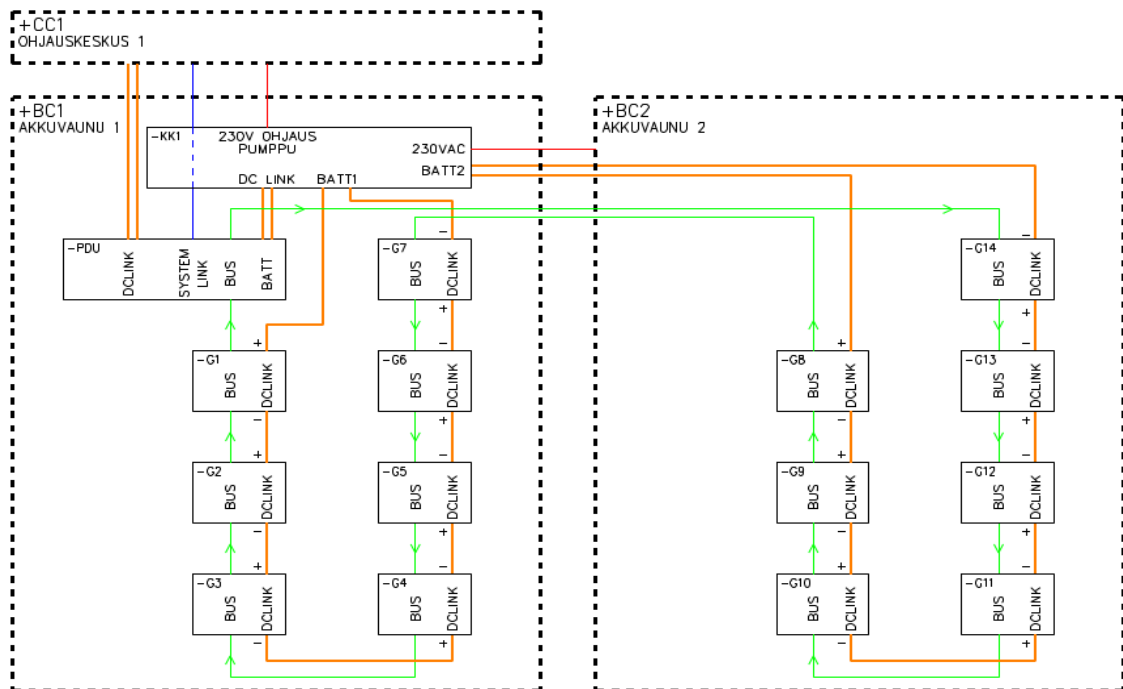
KUVIO 34. Kytentäkotelo +BC1-KK1 sisäpuolelta

Kytkenäkoteloon sijoitettavilla laitteilla on seuraavat toiminnallisuudet:

- Akkuvaunujen pääpiirin sarjaan-/rinnankytkentä tai irtikytkentä kontakteilla, ohjaus käsikytkimellä
- Jäähdytyspumppujen sähkönsyöttö ja käsiohjaus
- Järjestelmäsignaaleiden jako diagnostiikkaportille ja järjestelmään
- Akuston HVIL-signaalin katkaisu, mikä kytkee akuston irti PDU:lta hätätilanteessa (optio)

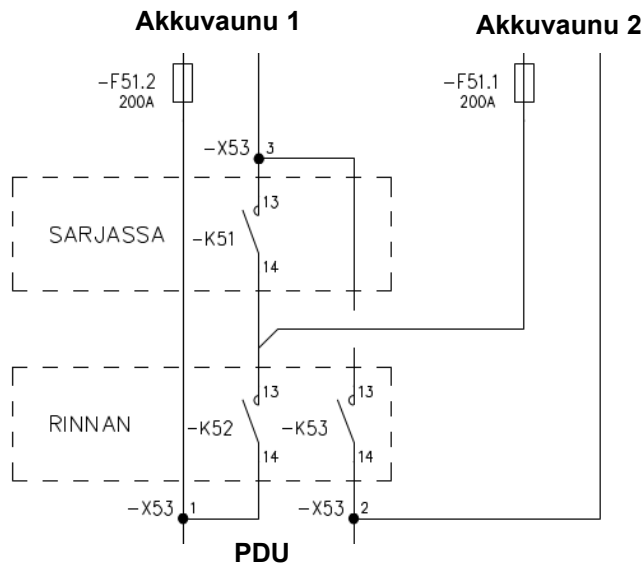
4.6 Kytkenäköt ja piirikaaviot

Akkuvaunujen väliset kaapeloinnit (pl. potentiaalintasaus) on esitetty kuviossa 35. Kummankin vaunun 7 akkua on sarjaankytkettynä ja DC-pääpiirin kaapelit (oranssit) tuodaan kytkentäkotelolle. PDU:n ja järjestelmän välinen DC-kaapelointi saa olla maksimissaan 5 m. Koko akuston kiertää signaalilenkitys (vihreä). PDU:lta järjestelmään viedään runkokaapelia pitkin akuston mittaus- ja ohjaus-signaalit sekä kontaktoreiden tilatiedot (sininen). Keskukselta tuodaan vaunuille ohjattu 230 VAC pumppujen käyttöä varten.

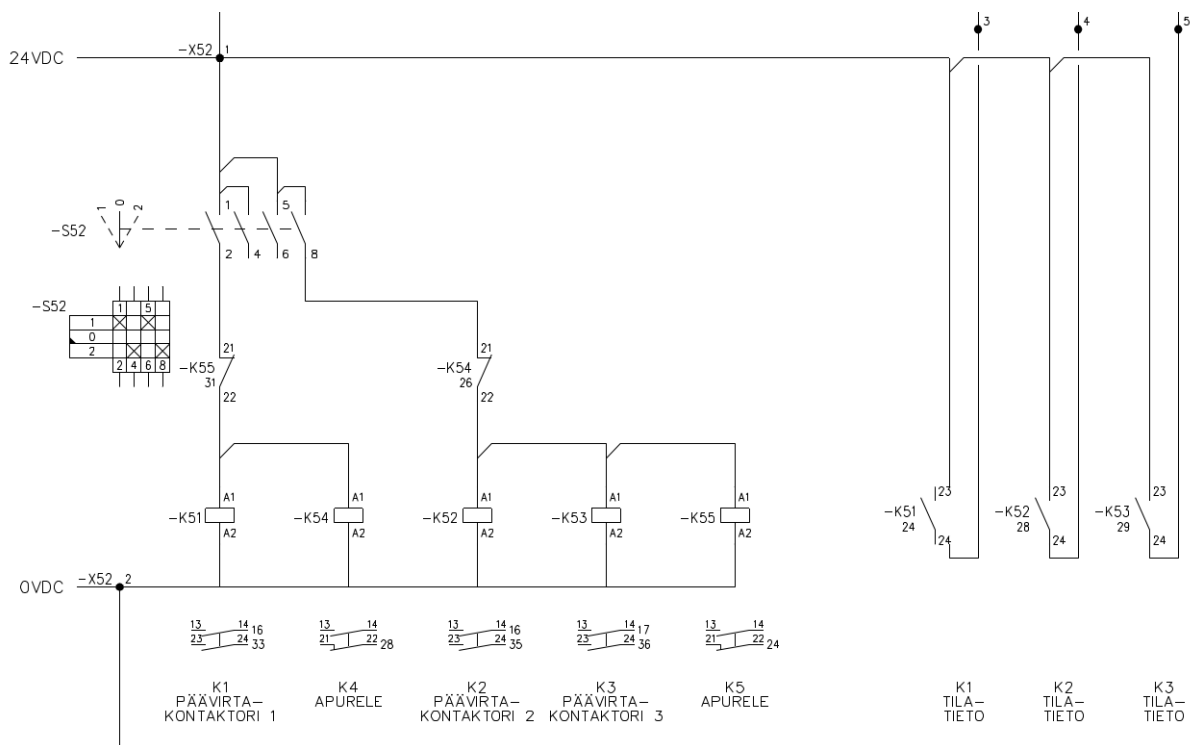


KUVIO 35. Akkuvaunujen kaapelointikaavio. Esitettynä DC- ja väyläkaapelit.

Alla kuvioissa 36 ja 37 on esitetty akkuvaunujen sarjan- ja rinnankytkennän pääpiiri ja ohjauspiiri. Ohjaus tapahtuu käsikytkimellä siten, että kytkentätapojen välissä on 0-asento, missä kaikki kontaktorit K51-K53 ovat auki.



KUVIO 36. Vaunujen rinnan- ja sarjaankytkentä, pääpiiri



KUVIO 37. Vaunujen rinnan- ja sarjaankytkentä, ohjauspiiri

Apureleet K54 ja K55 ovat kytkentätapojen ristiinlukitusta varten. Tällöin sarjaan- ja rinnankytkentäkontaktoreiden samanaikaisen kytkeytymisen estää kaksi eri lai-

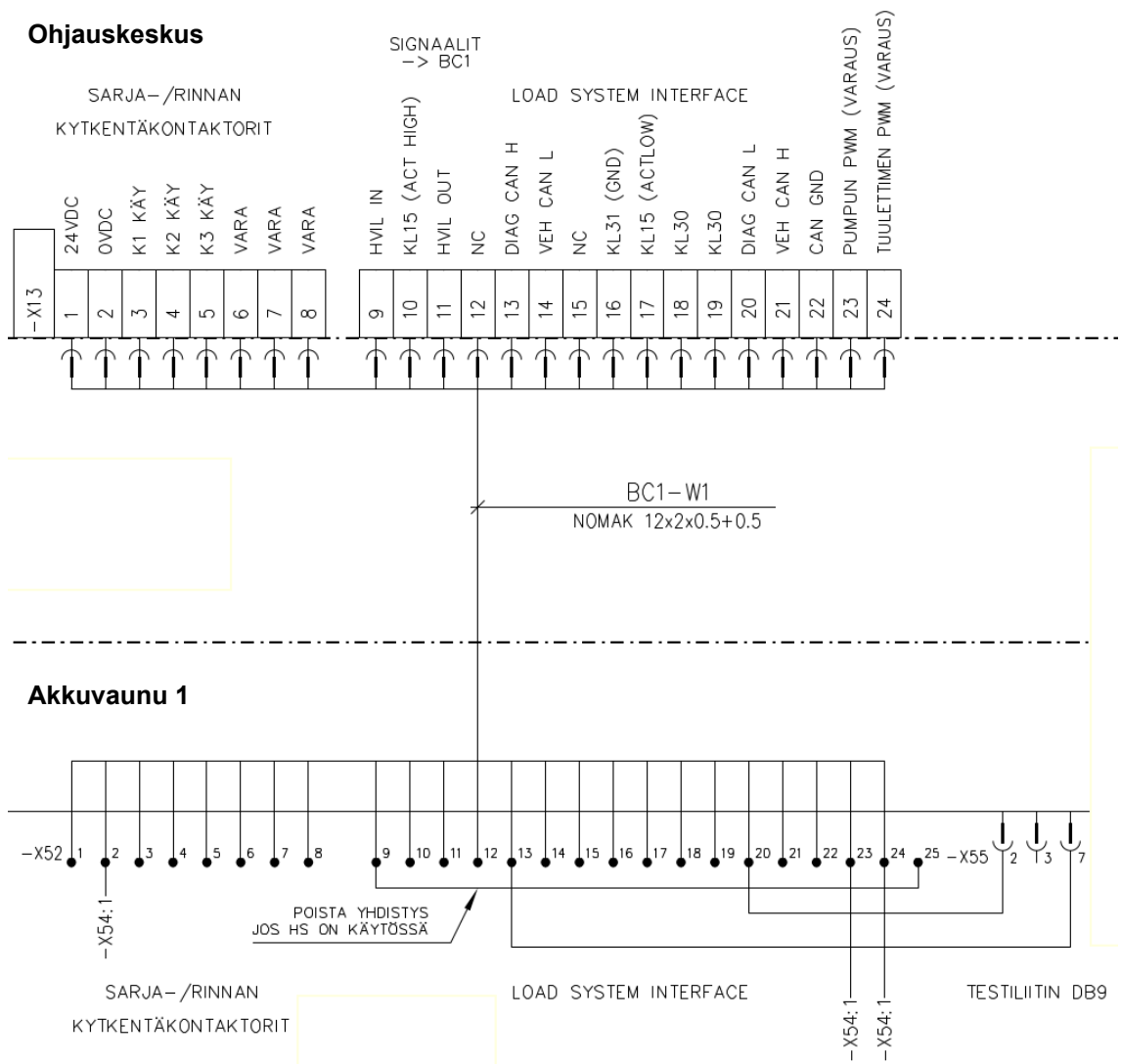
tetta: Nokkakytkin ja apureleet. Jos tästä huolimatta kontaktorit kytkeytyvät vika-tilanteessa kaikki päälle, niin akkujen oikosulku laukaisee sulakkeet F51.1 ja/tai F51.2.

Jos akkuvaunut ovat toisistaan tai järjestelmästä irti pitkän aikaa, niin akkuvau-
nujen varaustila ja sen myötä jännite voi vaeltaa toisistaan erilleen. Tällöin akku-
jen rinnankytkennässä voi teoriassa syntyä hetkellinen potentiaalintasausvirta.
Tämä voidaan estää seuraavalla tavalla:

- Akkujärjestelmä lukee kennojen / akkujen jännitettä ja mahdollinen vaunu-
jen välinen potentiaaliero on järjestelmän tiedossa. Käyttäjää voidaan va-
roitaa potentiaalierosta.
- Kytetään akut ensin sarjaankytkentään, jolloin BMU lataa eri jännitteessä
olevat kennot tehdasasetettavan jännitetoleranssin sisään

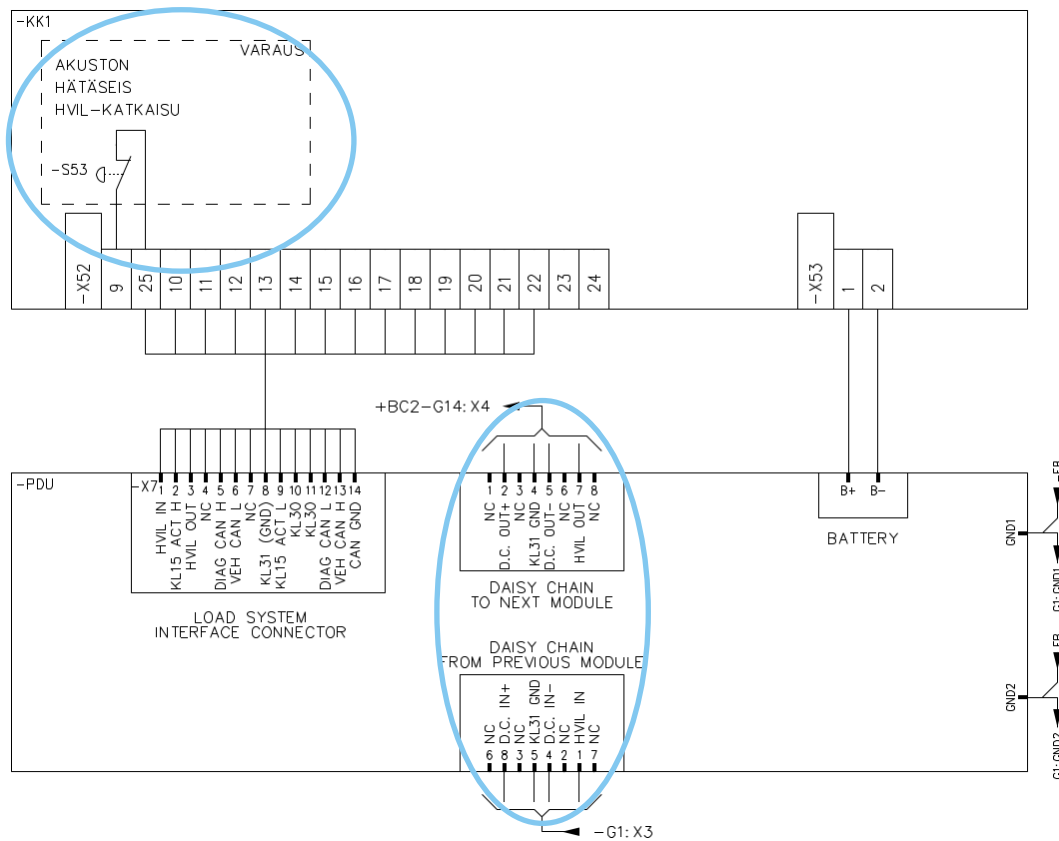
Jos kennojännitteet eroavat toisistaan tehdasaseteltavaa rajaa enemmän, niin
PDU yrittää tasoittaa kennojännitteet. Jos joku kennoista on esiasetetun jännite-
rajan yli tai ali riittävän kauan, niin PDU asettaa virtarajat nolaksi ja antaa järjes-
telmälle vikatiedon.

Alla kuviossa 38 on esitetty akkuvaunujen ja järjestelmän väliset signaalit ja kaa-
pelointi. 12-parisen runkokaapelin 4 ensimmäistä paria on varattu kontaktorijän-
nitteelle ja tilatiedoille. Loput 8 paria kuljettavat PDU:n ja järjestelmän väliset sig-
naalit, myös CAN-väylän. Kytöntäkotelon kylkeen D9-liittimelle tuodaan DIAG
CAN -pinnit.



KUVIO 38. Akkuvaunun signaalit ja runkokaapeli ohjauskeskukselle

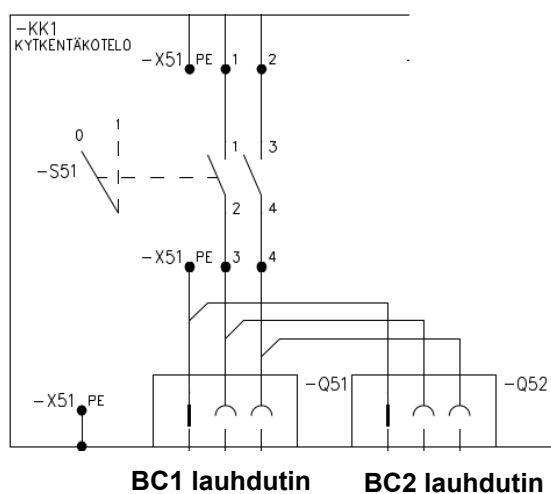
Alla kuviossa 39 on esitetty hätäseis-painikemahdollisuus, jolla katkaistaan HVIL-signaali. Tämä aiheuttaa välittömästi PDU:n pääkontaktorin aukeamisen ja akuston irrottamisen järjestelmästä. Kuviossa on esitetty myös akkujen välisen heikkovirtakaapeloinnin tulo- ja lähtöliitinten signaalit ja liitinnumerointi (kuvassa "Daisy Chain").



KUVIO 39. Järjestelmäsignaali PDU:lla ja akkujen signaaliketjutus

Kuviossa 40 on esitetty lauhduttimien ja niiden liittyvien syöttöjen kytkennät. Ohjauskeskukselta tuodaan ohjattu 230 V pumppua varten, mikä jaetaan KK1:illä akkuväunu 2:lle. Jos ohjauskeskus ei ole käytettävissä, niin lauhdutin voidaan kytkeä suoraan tavalliseen pistorasiaan ja käyttää pumppuja käsikytkimen avulla.

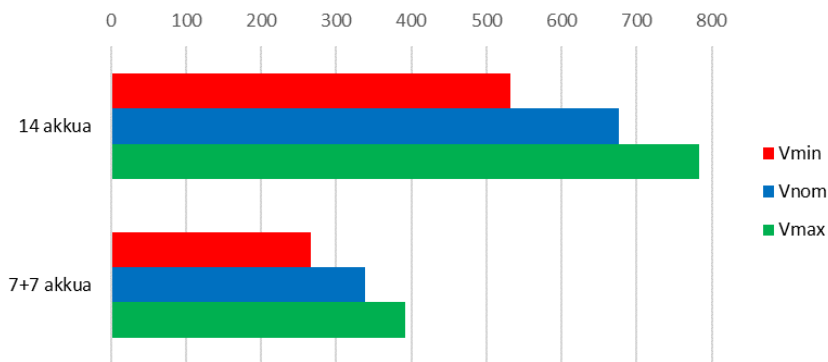
230V syöttö keskukselta tai invertterivaunulta



KUVIO 40. Lauhduttimien pääpiiri

4.7 Akuston jännitteet

Kuviossa 41 on näytetty esimerkkilaskelma, millaiset voivat olla akuston minimi-, maksimi ja nominaalijännitteet eri kytkentä- ja varaustilanteissa. Akun esitelehtisen mukaan akkujännite voi olla välillä 38–56 V.



	Min	Nom	Max
Sarjaankytkentä	532	676	784
Rinnankytkentä	266	338	392

KUVIO 41. Akuston min, max ja nominaalijännitteet

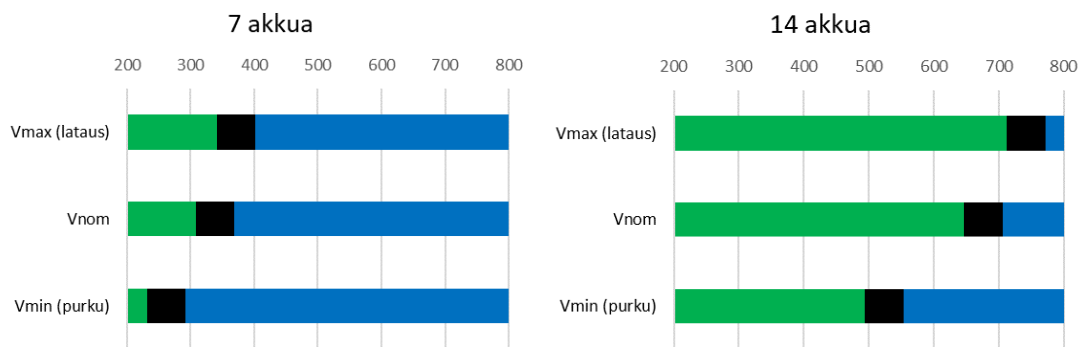
Akuston jännitteen huomioiminen järjestelmässä on oleellista ainakin kahdesta syystä:

- Latausjännitettä voidaan rajoittaa, kun aletaan ladata tyhjää akustoa
- DC-kiskoston ja akuston jännitteistä riippuu, miten keskuksen DCDC-konverterti pitää kytkeä

Laitteiston käyttötapauksia ei käsitellä tässä esityksessä. Oletetaan toistaiseksi, että akuston pääasiallinen kytkentätapa on sarjaankytkentä, millä on muutamia etuja rinnankytkentään nähden:

- Saavutetaan täysi purku- ja latausjännite (muun laitteiston rajoissa)
- Akustosta saadaan täysi teho ulos (muun laitteiston rajoissa)
- Akkuvaunujen välille mahdollisesti syntyvä tilapäinen varaus- ja jänniteero ei ole relevantti

DCDC-konvertterin valmistajan mukaan ES- ja DC-tulojen välillä pitää olla vähintään 30 V potentiaaliero siten, että DC-liittimet ovat korkeammassa potentiaalissa. Tällöin konvertterin toiminta on vakaata. Jos esimerkiksi akustojännite on 500 V, niin kytkemällä akusto eri puolelle konvertteria saadaan DC-kiskolle jännitteet 200–470 V tai 530–800 V. Akkujännitteen ympäristöön jää siis vähintään 60 V suuruinen väli, johon kiskoston jännitettä ei voi DC-konvertterista asettaa. Alla kuviossa 42 on esitetty sarjaan- ja rinnankytkennällä saavutettavissa olevat kiskostojännitteet eri varaustilanteissa. Akuston minimi- ja maksimijännitteet ovat yllä mainitut esimerkinomaiset laskennalliset arvot.



KUVIO 42. Akuston kytkentä DCDC-konvertterin liittimille eri akkujännitteillä

Kuvassa sinisellä alueella akusto kytketään DCDC-konvertterin ES-tuloihin, jolloin akkujännite on konvertterin ulostulojännitettä korkeammalla. Vihreällä alueella akusto kytketään DC-tuloihin. Mustat alueet eivät ole saavutettavissa, ellei akuston varaustilaa tai kytkentätapaa muuteta. Akusto on lähellä nimellijännitettään noin 60 % varaustasossa. Tällöin akuston jännite on $7 \cdot 48,3 \text{ V} = 338 \text{ V}$ (rinnan) tai 676 V (sarjassa). Kiskostojännitteet 200–646 V saavutetaan *sarjaankytkennässä* siten, että akusto on konvertterin DC-puolella (konvertterin Buck-toimintatila). Korkeammat kiskostojännitteet 646–800 V saavutetaan kytkemällä akkuvaunut *rinnakkain* konvertterin DC-puolelle (konvertterin Boost-toimintatila).

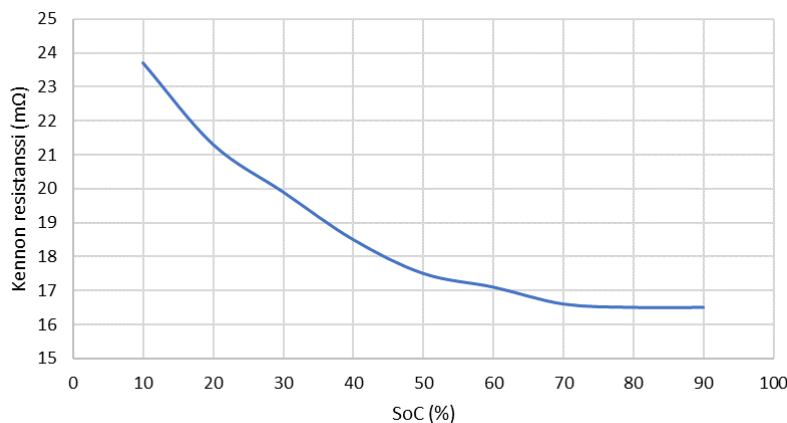
Alueet menevät limittäin ja toimintatila on valittava käyttötilanteen mukaan. Jos akustoa kuormitetaan, niin akuston jännite laskee ja kytkentätapa kannattaa valita niin, ettei jännitteen laskeessa päädytä 'mustalle alueelle'. Kun taas akkuja ladataan, niin tiedetään etukäteen, että akuston jännite nousee ja voidaan päättää kytkentätapa niin, ettei ladattaessa päädytä mustalle alueelle.

4.8 Akuston lataaminen

PDU laskee olosuhteiden ja muiden parametrien perusteella dynaamisesti jatkuvien lataus- ja purkuvirtojen ylärajat. Oletetaan tarkastelussa, että ollaan huoneenlämmössä, jolloin PDU ei ala rajoittamaan latausvirtaa olosuhteiden takia.

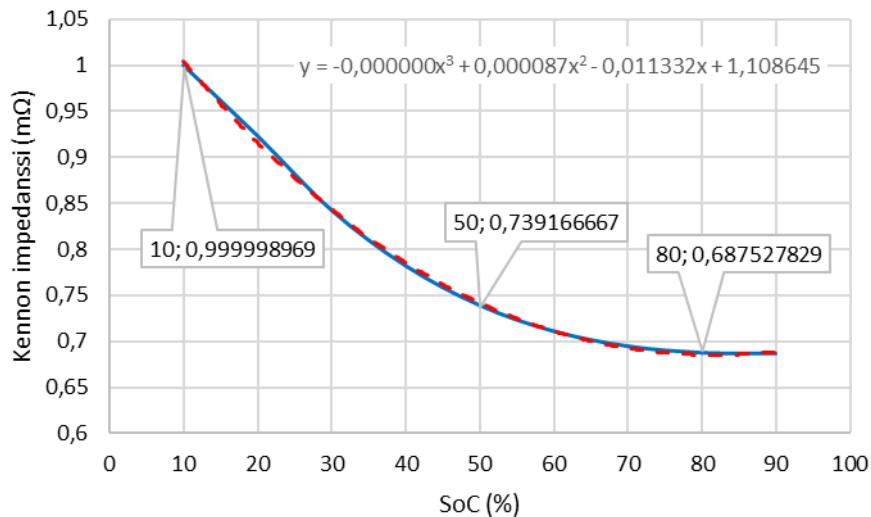
Aiemmin todettiin, että litiumioniakuilla käytetään yleensä kaksivaiheista CCCV-latausprofiilia (Constant Current, Constant Voltage), koska akkua ei saada ladattua täyteen korkealla latausvirralla. Tämän laitteiston akkujen sisäisistä resistansseista ja lataussuosituksista on niukasti materiaalia, koska kaikki jännitteiden raja-arvot ovat tehtaalla aseteltavissa. Arvioidaan latauksen reunaehtoja yleisen LTO-tiedon perusteella.

LTO-kennojen datalehtien ja joidenkin tutkimusten mukaan huoneenlämmössä ja varaustilassa 10–90 % kennon sisäinen impedanssi on 1 mΩ tai vähemmän (Bank 2021, 83). Erään tutkimuksen mukaan LTO-akun sisäinen impedanssi on noudattaa kuvion 43 mukaista käyrämuotoa (Chang-O & Pyeong-Yeon & Jonghoon & Sungsoo 2017, 4).



KUVIO 43. Varaustilan vaikutus sisäiseen impedanssiin (Data: Chang-O jne. 2017, 4)

Jos oletetaan lähteisiin perustuen, että yhden kennon suurin impedanssi on 1 mΩ ja käytetään yo. käyrämuotoa arvioimaan laitteiston akkujen yhden kennon sisäistä impedanssia varaustilan suhteen, niin päädytään kuvion 44 mukaiseen käyttäytymiseen.



KUVIO 44. Arvioitu varaustilan vaikutus kennon sisäiseen impedanssiin (sininen). Käyrästön tehty 3. polynomisijoitus (punainen katkoviiva)

Varaustilanteita 10 ja 80 % SoC vastaavat laskennalliset kennojännitteet ovat 1850 ja 2550 mV. Näitä pisteitä vastaavat oikosulkuvirrat ovat yo. impedanssiarvion mukaan

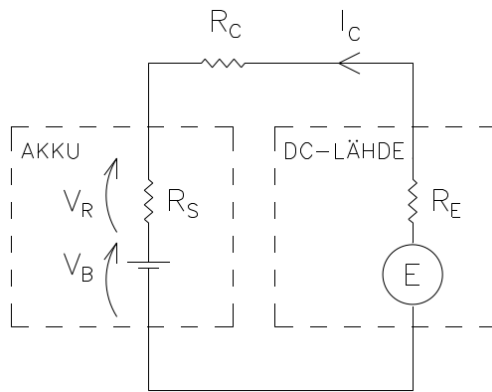
$$I_{SoC\ 10\ \%} = \frac{1850\ \text{mV}}{1\ \text{m}\Omega} = 1850\ \text{A}$$

$$I_{SoC\ 80\ \%} = \frac{2550\ \text{mV}}{0,688\ \text{m}\Omega} = 3710\ \text{A}$$

Lasketut oikosulkuvirrat viittaavat siihen, että kennojen impedanssin arviointi on suuruusluokaltaan oikein. Matalassa varaustasossa 10 % on oikosulkuvirtaa vielä riittävästi sulakkeiden toiminnan kannalta. Hyvässä varauksessa olevan kennon arvioitu oikosulkuvirta 3710 A on samaa suuruusluokkaa kuin valmistajan ilmoittama *useita tuhansia ampeereja*. Voidaan siis käyttää kennon impedanssin (yksikkö mΩ) karkeaan arviointiin polynomia

$$\begin{aligned} R_{S\ \text{kenno}}(SoC\ \%) &= -1,44901 \cdot 10^{-7} \cdot SoC^3 + 8,70980 \cdot 10^{-5} \cdot SoC^2 - 0,0113322 \\ &\cdot SoC + 1,10865 \end{aligned}$$

Latauksessa jännitelähde joutuu ylittämään akun jännitteen sekä latausvirrasta riippuvan akun sisäiseen impedanssin ja kaapeloinnin kuluttamat jännitteet. Kuviossa 45 on esitetty latausvirran reitti ja siihen vaikuttavat jännitteet ja impedanssit.



KUVIO 45. Latausvirran reitti

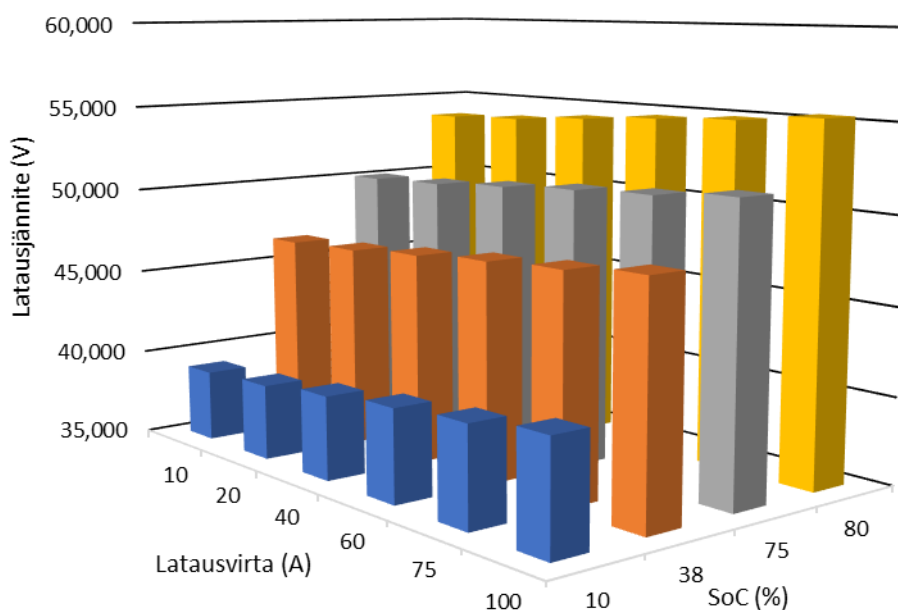
Jännitelähteen E täytyy latausvirran I_C tuottamiseksi antaa jännite

$$E_{out} = I_C(R_S + R_C) + V_B$$

Oletetaan, että kaapeli on 10 m mittainen ja ominaisresistanssi 70 mm^2 kaapelille tyypillinen $0,3 \text{ } \Omega/\text{km}$. Taulukkoon 10 on laskettu kennon impedanssin arviointipolynomia ja arvioituja jännitepisteitä käyttäen sopivat latausjännitteet muutamassa varaustilanteessa. Latausjännitteet yhdelle akulle on esitetty myös kuviossa 46.

TAULUKKO 10. Yhden akun sopiva latausjännite virran ja varaustilan funktiona

Latausjännite (V)	SoC (%)			
	10	38	75	80
Latausvirta (A)				
10	39,091	46,481	50,028	53,724
20	39,332	46,678	50,203	53,898
40	39,813	47,073	50,552	54,246
60	40,295	47,467	50,900	54,593
75	40,656	47,762	51,162	54,854
100	41,258	48,255	51,598	55,289



KUVIO 46. Latausjännitteet eri virroilla ja eri varaustilanteissa

Invertterin 63 A pistotulppaliitännä antaa teoreettisesti maksimitehon $\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 63 \text{ A} = 43,6 \text{ kW}$. Jos oletetaan idealinen invertteri, niin tasavirtaa on saatavissa invertteriltä suurimmillaan $43,6 \text{ kW} / \sqrt{2} / 400 \text{ V} = 77 \text{ A}$. Tarkastellaan latausjännitteitä maksimilatausvirtapisteessä 75 A. Neljäntoista akun sarjaankytkennässä latausjännitteen tulee ylittää akustojännite alla olevan taulukon 11 mukaisesti. Seuraavassa taulukossa 12 on esitetty 14 akun sarjaankytkennän suositellavat latausjännitteet. Maksimilatausvirralla 75 A (3-vaiheliitännän maksimiteho) suositellavat latausjännitteet on korostettu vihreällä.

TAULUKKO 11. 14 akun sarjaankytkennän latausjännitteen ylitys akustojännitteeseen verrattuna

Akustojännitteen ylitys / 14 akkua (V)	SoC (%)			
	10	38	75	80
Latausvirta (A)				
10	3,3714	2,7598	2,4413	2,4348
20	6,7429	5,5195	4,8826	4,8696
40	13,4857	11,0391	9,7653	9,7392
60	20,2286	16,5586	14,6479	14,6088
75	25,2857	20,6983	18,3099	18,2610
100	33,7143	27,5977	24,4132	24,3480

TAULUKKO 12. 14 akun sarjaankytkennän latausjännitteet

Latausjännite 14 akkua (V)	SoC (%)			
Latausvirta (A)	10	38	75	80
10	547,3	650,7	700,4	752,1
20	550,6	653,5	702,8	754,6
40	557,4	659,0	707,7	759,4
60	564,1	664,5	712,6	764,3
75	569,2	668,7	716,3	768,0
100	577,6	675,6	722,4	774,0

Latausprofiilin väli 10–80 % SoC on CC-tyyppiä eli constant current. Latausvirta asetetaan vakioksi joko akuston tai laturin virtarajaa käyttäen, mutta virta ei saa ylittää akuston ilmoittamaa dynaamista suurinta latausvirtaa. Jännite asettuu virran ja piirin impedanssin (SoC-riippuvainen) määräämään tasoon, joka on taulukoiden mukainen tai pienempi. Taulukon jänniterajoja voidaan käyttää ohjelmistossa lisärajana varmistamaan, ettei latausta käynnistettäessä anneta tarpeettoman suurta jännitettä tyhjälle akustolle.

Kun ollaan korkeassa varaustilassa, niin PDU:n laskenta alkaa rajoittaa järjestelmälle ilmoitettavaa latausvirtaa. Varaustilan raja on tehtaalla aseteltavissa käyttökohteen mukaan. Korkeassa varaustilassa olevaa akustoa ladataan CV-moodissa eli latausjännite rajoitetaan tiettyyn maksimiarvoon. Tässä laitteistossa yli 80 % varaustilassa olevan akuston latausjännite rajoitetaan ohjausjärjestelmällä maksimiarvoon 775 V. Järjestelmän käyttöön otossa aseteltu tarkistetaan riippuen siitä, mihin akuston SoC -arvo jää tällä jänniterajalla. Uusilla akuilla kennojännitteet saattavat nousta nimellisiä arvoja hiukan korkeammalle eikä tarkkaa jänniterajan arvoa voi kokeilematta määrittää.

Yllä mainitut latausjännitteet on laskettu 14 akun sarjaankytkennälle. Silloin, kun akkuvaunut ovat rinnankytkettynä, niin latausjännitteet voi kohtuullisella tarkkuudella jakaa kahdella. Invertteriltä saatavilla oleva maksimi latausvirta akkua kohden puolittuu rinnankytkennässä.

4.9 Jäähdytyspiiri

4.9.1 Jäähdytyspiirin tekniset vaatimukset

Akkuvalmistajan ohjeen mukaan jäähdytyspiirillä täytyy olla seuraavat ominaisuudet:

- Neste 50/50 vesi-glykoli-seos, alumiinille sopivaa
- Virtausnopeus 6 l/min suositus, voi olla 2–6 l/min tarvittaessa
- Jokaisella akulla oma jäähdytyspiiri
- Jäähdytyspiirien jako jakotukeilla (kylmä & kuuma)
- Jäähdytyspiirin maksimipaine on 3,5bar

Akun jäähdytyskierron liittämiseen tarvitaan akulle VDA-standardin mukaiset NW8-tyyppiset putkiliittimet (Akkuvalmistaja 2023, 27). Tähän soveltuu esimerkiksi Normaquick PS3 90° NW08 -liitin (kuva 8).



KUVA 8. NW08-putkiliitin (Kuva: Norma Group) ja akuston putkiliittimet (Kuva: Mikko Tillander)

4.9.2 Akuston hukkalämmön laskenta

Akun jäähdytystehon tarvetta tai kuormituksessa syntyvää hukkatehoa ei ole kerrottu valmistajan materiaaleissa. Akun koteloinnin passiivista jäähdytystehoa ei myöskään tiedetä, joten joudutaan tekemään muutamia oletuksia.

Parker Hannifin Corp valmistaa teollisuuden käyttöön erilaisia jäähdytys- ja muita ratkaisuja. Parkerilta on saatavissa sekä AC- että DC-moottoreilla olevia jäähdytysratkaisuja. Akustoon sopivan QDC 006 -sarjan laitteen 5847006500 (kuva 9) jäähdytysteho on 0,277 kW/°C virtauksella 70 l/min ja noin 0,240 kW/°C virtauksella 6 l/min.



KUVA 9. Parker QDC 006 (S) 5847006500 lauhdutinyksikkö (Kuva: Parker Hannifin, 1)

Lauhduttimen valmistajan datalehden valintataulukon mukaan noin 5,8 kW hukateholle 40 asteen ympäristölämpötilassa tarvitaan 0,232 kW/°C jäähdytysteho (Parker, 9). Yhden akkuvaunun maksimihukateho aiemmin arvioidun kennon impedanssin perusteella on

$$P_{max} = 1,004\text{m}\Omega \cdot 200\text{ A}^2 \cdot 21\text{ kennoa} \cdot 7\text{ akkua} = 5,91\text{ kW}$$

Jäähdytinmoduulin datalehden perusteella yksikkö voisi olla akustolle sopiva, mutta akkujen käyttölämpötila on matalampi kuin autojen öljy-/hydraulikierroissa, joihin lauhdutinyksikkö on suunniteltu. Täytyy siis arvioida, miten akkujen suositeltu käyttölämpötila ja ympäristön lämpötila vaikuttavat akkujen lämpenemään ja lauhduttimen tehoon.

Arvioidaan, että akun painosta on 75 % alumiinia ja 25 % muovia, joiden ominaislämpökapasiteetit ovat 0,909 kJ/K/kg ja 1,3–2,1 kJ/K/kg (Ranta & Tiilikainen

1993, 87; Tammertekniikka 2019, 177). Tällöin 41 kg painavan akun lämpökapasiteetti on noin

$$Q_{akku} = \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{1,3 + 2,1}{2} + \frac{3}{4} \cdot 0,909 \right) \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \cdot 41 \text{ kg} = 45 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

Tarkastellaan tilannetta, missä akkua puretaan varauksesta 80 % varaukseen 10 % käyttäen 200 A purkuvirtaa. Purkamiseen kuluva aika voidaan laskea akun nimellisen kapasiteetin 46 Ah perusteella, jolloin 10 % purkaminen kestää $46 \text{ Ah} / 200 \text{ A} / 3600 \cdot 10 \% = 83 \text{ s}$.

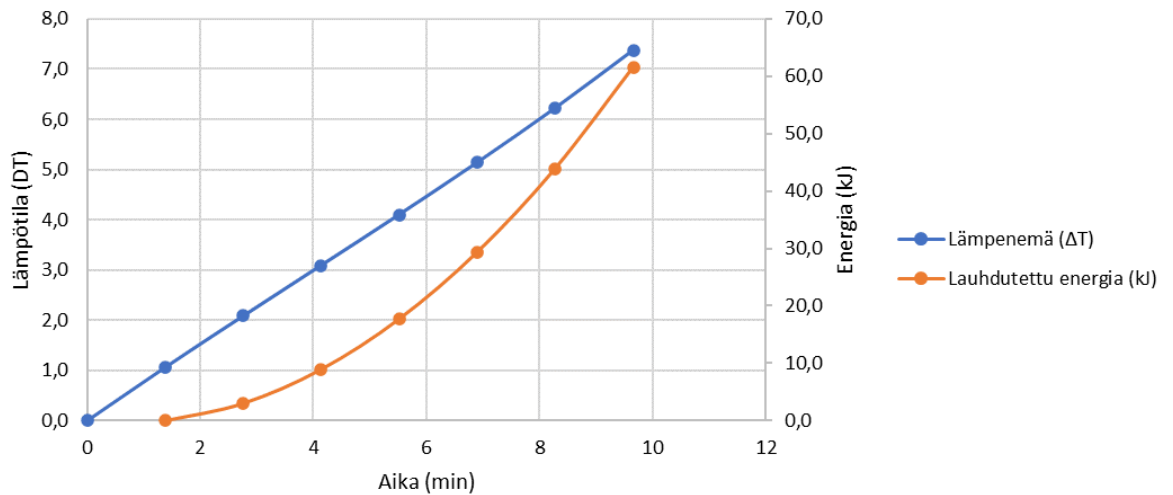
Akun hukkatheon arvioimiseen käytetään aiemmin tehtyä polynomisijoitusta sisäisen resistanssin laskemiseksi (kappale 4.8). Kun huomioidaan akun muuttuva sisäinen resistanssi, akun lämpeneminen ja lauhduttimen haihduttama energia, niin voidaan laskea akun lämpenemä ja lauhduttimen siirtämä energia 10 % tarkastelujaksoilla. Laskennan tulokset on esitetty taulukossa 13.

TAULUKKO 13. Akun hukkalämpö, lämpenemä ja lauhduttimen haihduttama energia, kun akkua puretaan varauksesta 80 % varaukseen 10 % virralla 200 A.

t (min)	SoC (%)	Akussa syntyvä lämpöenergia välillä (kJ)	Lauhdutettu energia välillä (kJ)	Lämpenemä ($\Sigma \Delta T$)	Akussa syntyvä lämpöenergia (Σ , kJ)	Lauhdutettu energia (Σ kJ)
0	80					
1,4	70	48,2	0,0	1,1	48,2	0,0
2,8	60	49,4	3,0	2,1	97,6	3,0
4,1	50	51,6	5,9	3,1	149,2	8,9
5,5	40	54,6	8,8	4,1	203,8	17,7
6,9	30	58,6	11,6	5,1	262,5	29,4
8,3	20	63,7	14,6	6,2	326,2	43,9
9,7	10	69,8	17,7	7,4	396,0	61,6

Lauhdutin alkaa jäähdyttää vasta, kun akun lämpötila on ympäristön lämpötilaa korkeampi. Viimeisen tarkastelujakson SoC 20–10 % aikana lauhdutin haihduttaa 17,7 kJ, joka on vain 30 % akussa syntyneestä hukkalämmöstä. Kun akku vasta alkaa lämmitä ympäristön lämpötilasta, niin suurin osa syntyneestä hukkalämmöstä lämmittää ensin akkuja. Lauhduttimen teoreettinen maksimiteho 6 l/min virtauksella ja 35°C lämpötilaerolla (ympäristö 20°C, akusto 55°C) on $0,86 \cdot 0,277 \text{ kW}/^\circ\text{C} \cdot 35^\circ\text{C} = 8,4 \text{ kW}$. Lauhdutin on riittävän suuri akkuvaunulle, koska akusto saadaan purettua (80->10 %) alle kymmenessä minuutissa ja lämpenemä on alle

10 astetta. Jos latausta ja nopeaa purkua tehdään jatkuvasti peräkkäin, niin akusto kyllä lopulta lämpenemään. Lauhdutin toimii sitä paremmin, mitä suurempi lämpötilaero on akkujen ja ympäristön välillä. Alla kuviossa 47 on näytetty akun lämpenemä ja lauhdutettu energia ajan suhteen.



KUVIO 47. Akun lämpenemä ja lauhduttimen haihuttama energia akkua purettaessa 200 A virralla varaustilasta 80 % varaustilaan 10 %

4.9.3 Lauhdutinmodulin tekniset tiedot

Parker QDC 006 (5847006500) -yksikön tekniset tiedot on esitetty taulukossa 14. Pienin virtaus on 6,7 l/min, mikä on hiukan akuston suositeltua isompi, mutta ei merkittävästi. Maksimipaine 1 bar on kuitenkin reilusti alle akuston maksimin 3,5 bar. Lauhdutin sopii kaikilta osin akuston jäähdytykseen.

TAULUKKO 14. Lauhdutinmodulin tekniset tiedot

Ominaisuus	Arvo	Yksikkö	Huomiot
Tuotekoodi	QDC-006-B-0-ST-01X-F-0-0-0-2		
Nestetyyppi	Vesi-glykoli-seos 35-50%		
Ohjaussignaali (tuuletin)	PWM tai 0.10 VDC		
Ohjaussignaali (pumppu)	PWM		
Paineen alenema	0,18	bar	40 l/min, W/G 50%, 30°C
Suurin jäähdytysteho	0,277	kW/°C	40 l/min, W/G 50%, 4300 RPM
Käyttöjännite	16 - 30	VDC	Nimellinen 24VDC
Suurin virtaus	40	l/min	
Pienin virtaus	6,7	l/min	
Järjestelmäpaine	0,05-1	bar	
Lämpötila	-40 - +85	°C	
Tuulettimen nopeus	1100 - 4300	RPM	
Virta	15,3	A	4300 RPM
Paino	14	kg	
Liitin	G 1/2 ja G 1/4		Anturit
Liitin	G 3/4		Jäähdytinneste tulo/lähtö
Liitin	G 1/4		Ilmaus

Lauhdutinyksikön tuuletin ja pumppu kytketään omilla liittimillään. Kuvassa 10 on esitetty pumpun liittämiseen tarvittavat komponentit

- AMP 282088-1 liitinrunko
- AMP 183025-1 liitinnasta (naaras, yksittäinen) tai AMP 282110-1 liitinnasta (naaras, nauha)



KUVA 10. Pumpun liittimet AMP 282088-1 ja AMP 183025-1 (Kuva: TME)

Liittimen signaalijärjestys on esitetty taulukossa 15. Pumpun ohjaus on PWM-tyyppinen. Pumpun eri tilat ja ohjauksen parametrit on esitetty taulukossa 16. Tiedot ovat Parkerin ohjeesta Bulletin MSG10-6201/EN.

TAULUKKO 15. Pumpun liittimen signaalijärjestys

Pinni	Johdinväri	Signaali
1	Musta	GND
2	Keltainen	Vikatilan tieto
3	Sininen	PWM
4	Punainen	24VDC

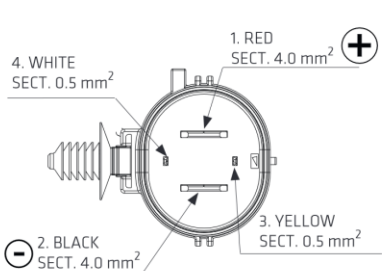
TAULUKKO 16. Pumpun PWM-ohjauksen tilat ja tulkinat

Työjako	Kuvaus / toimintatila	Huomautukset
0 - 10 %	PWM Seis	1: PWM virhe max ± 2
11 - 55 %	PWM miniminopeus	2: PWM: 24 VDC, taajuus 50-1000 Hz
56 - 90 %	PWM Lineaarinen nopeusohjaus	3: Suositustaajuus 500 Hz
90 - 100 %	PWM maksiminopeus	4: PWM seis 7 % 5: PWM 0 % ohjauksen irtikytkentä

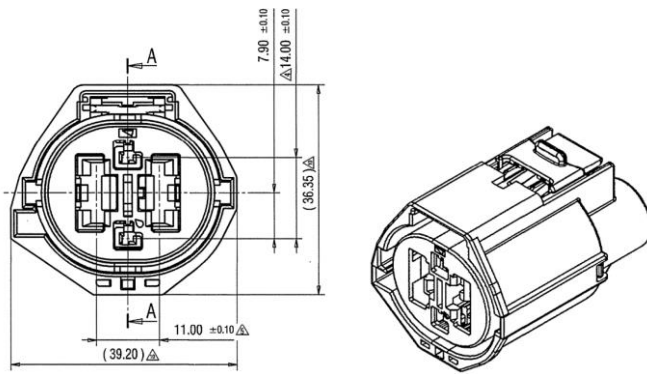
Tuulettimen liittimen numerointi ja signaalit ovat esitetty alla kuviossa 48. Kuvassa 11 on esitetty tuulettimen liittimen vastakappaleen havainnekuva. Liittimen vastakappaleen valmistaja ja osanumerot ovat

- Yazaki 7283-8497-90 Liitinrunko 1 kpl
- Yazaki 7116-3251 9,5 mm liitin (naaras) 2 kpl
- Yazaki 7116-4103-02 1,5 mm liitin (naaras) 2kpl

Näiden lisäksi voidaan käyttää tiivistyshattuja tarvittaessa pöly- ja vesitiiviiden saavuttamiseksi.

Connector:YAZAKI HYBRID (USCAR-2 compliant) - Part number: 7282-8497-90					
	Identification	+	-	A	PWM* / E*
	Pin number	1	2	3	4
	Wire Color	RED	BLACK	YELLOW	WHITE
	Sealing p/n	7157-3582-90	7157-3582-90	7158-3030-50	7158-3030-50
	Pin p/n	7114-3251	7114-3251	7114-4102-02	7114-4102-02
	Section [mm²]	4.0	4.0	0.5	0.5

KUVIO 48. Tuulettimen liitin ja signaalitiedot (Spal Automotive, 46)

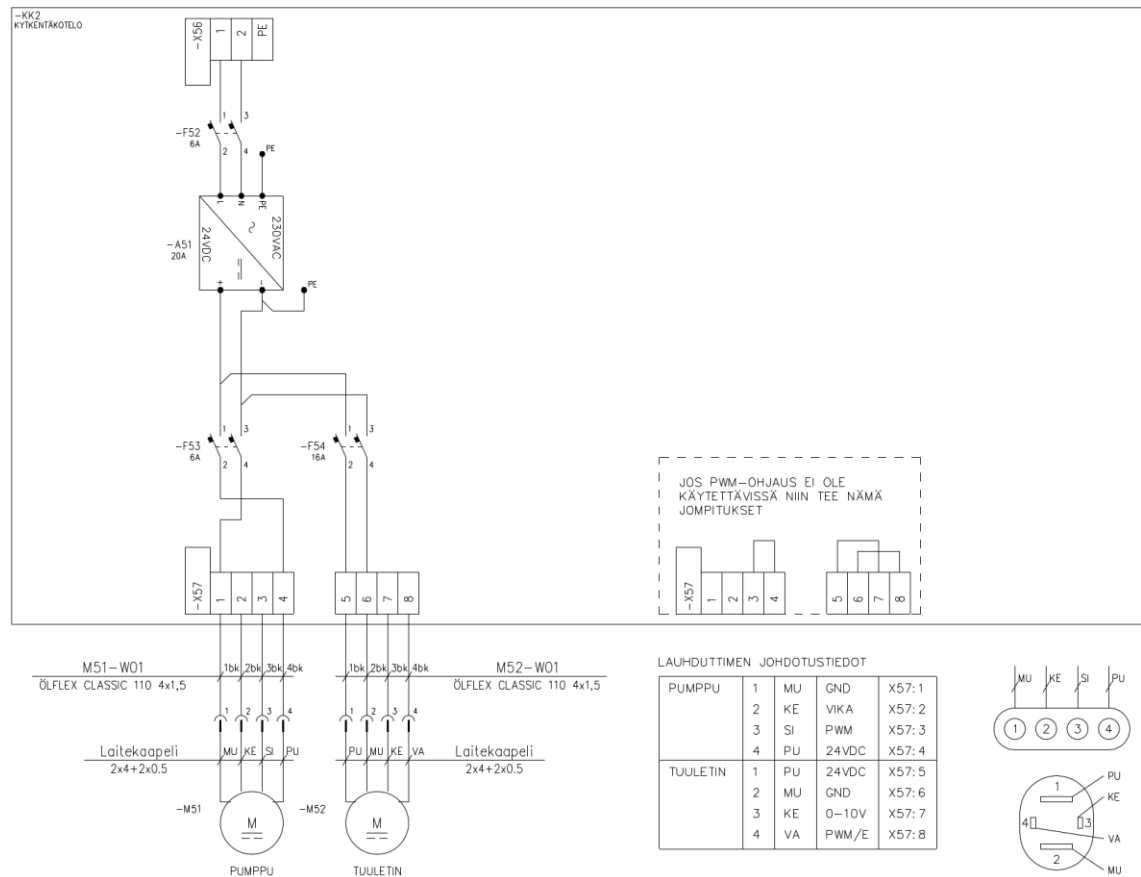


KUVA 11. Tuulettimen liittimen havainnekuva (Kuva: Mouser, 7283-8497-90 datalehti)

Tuuletin voidaan kytkeä joko PWM- tai analogiseen 0–10 V jänniteohjaukseen. Jos ohjausta ei haluta käyttää, niin liittämällä pinnit 3 ja 4 sopivasti syöttöjännitteeseen saadaan tuuletin toimimaan myös ilman säätöä. Eri ohjaustavat on esitetty Spal automotiven moottori-/tuuletinesitteessä (Spal Automotive) eikä niitä ole tarpeen käydä tässä läpi. Lähtökohtaisesti pumpun ja tuulettimen ohjaus tehdään Beckhoff -automaatiolta PWM-ohjauksena tai pelkästään päälle ja pois päältä ohjaamalla lauhduttimen DC-syöttöä. Lauhdutin tarvitsee oman kytkentäkotelon, joka sisältää DC-jännitelähteen, mahdolliset apureleet ja signaaliliittimet.

4.9.4 Kytkennät

Lauhduttimen ottama maksimivirta on 15,3 VDC, joten on käytännöllistä asentaa akkuvaunulle oma 24V jännitelähde. Alla kuviossa 49 on esitetty akkuvaunu 1:n kytkentäkotelon 2 kytkennät. Lauhdutin syötetään kytkentäkotelon 1:ltä.



KUVIO 49. Akkuvaunu 1 lauhduttimen kytkentä ja kytkentäkotelo

Jännitelähteeltä -A51 jaetaan pumpulle ja tuulettimelle käyttöjännite erikseen, koska lauhduttimessa on eri liittimet kummallekin laitteelle. Molempia voidaan ohjata PWM-signaalilla, mikä tuodaan tarvittaessa järjestelmästä. Samaa ohjaus-signaalia käytetään myös Akkuvaunu 2:n lauhduttimen ohjaamiseen. Jos PWM-ohjausta ei ole käytettävissä, niin pumpun ja tuulettimen ohjaukset asetetaan täydelle teholle piirikaaviossa olevan johdotusohjeen mukaan. Tällöin lauhduttimia ohjataan päälle ja pois kytkemällä -X56 riviliittimen vaihtojännitettä päälle ja pois.

4.9.5 Jäähdytysneste

Akkuvalmistajan ohjeen mukaan jäähdytyskierron nesteen tulee olla 50/50 vesiglykoliseosta. Glykolia on karkeasti kahta tyyppiä: etyleeniglykolia ja propyleeniglykolia. Käyttöohjeen mukaan kumpikin sopii, mutta suosittelee etupäässä käyttämään etyleeniglykolia, tosin sen pitää olla suoja-aineiltaan alumiinille sopivaa.

Etyleeniglykoli on yleensä erittäin myrkyllistä ja hävittäminen voi olla hankalaa. Propyleeniglykoli on parempi vaihtoehto turvallisuuden ja käsiteltävyyden takia.

Glykoli on tyypillisesti pH-arvoltaan välillä 6–8 ja lähes puhtaan glykolin jäätymispiste on noin -13C sekä kiehumispiste luokkaa 200C (Carl Roth). Vesi-glykoli-seoksen jäätymispiste on matalampi, noin -33C. Seoksen vesi tulee olla tislattua tai käänteisosmoosilla puhdistettua vettä eikä vesijohtovettä pidä käyttää (Terburg). Jäähdytyskierron glykoliksi voidaan valita esimerkiksi paikallisesta rautakaupasta löytyvä Motox-bio pakkasnestee, joka on 100 % propyleeniglykolia sekä täydellisesti biohajoava. Tislattua vettä eli perinteisesti sanottuna akkuvettä voidaan käyttää glykolin laimennukseen, mutta ei kuitenkaan de-ioinisoitua vettä, ellei jäähdytysjärjestelmän muut komponentit erikseen ole mainittu soveltuviksi (Terburg).

Jäähdytyskiertoihin tyypillisesti asennetaan suodattimia varmistamaan jäähdytinnesteen puhtaus. Akkuvaunun kierto on niin lyhyt, että suodattimia ei tässä tapauksessa asenneta.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Akkuvaunujen sähköinen suunnittelu ja toteutus pohjautui pienjännitstandardisarjan SFS 6000 määräyksiin. Lisäksi noudatettiin laitevalmistajien ohjeita ja suosituksia. Akkuvaunujen kaapeli-, laite- ja asennustapavalinnat arvioitiin suunnitteluvaiheessa tarvittaessa laskelmiin perustuen. Akkuvalmistajan ohjeistuksia arvioitiin vertaamalla sähköisiä arvoja ja käsittelyohjeita LTO-akuista tehtyihin tutkimuksiin ja muiden valmistajien teknisiin tietolehtiin.

Akkujen raja-arvot lämpötiloihin, varaustasoihin ja jännitteisiin liittyen ovat tehtaalla aseteltavissa ja akusto asetellaan aina käyttökohteen mukaan. Tämän takia tarkat tiedot esimerkiksi oikosulkuvirrasta, sisäisestä impedanssista ja PDU:n turvaominaisuuksien reunaehdoista puuttuivat. Laskennoissa käytettiin käyttöohjeen esimerkkilukuja, akuston diagnostiikkaväylältä luettavissa olevia arvoja sekä yleistä LTO-kennojen tuotetietoa. Akuston turvallisuuteen liittyvissä laskennoissa tarvittavat arviot ja oletukset tehtiin aina turvalliseen suuntaan. Virta- ja kuormitettavuuslaskemissa päädyttiin laite- ja kaapelivalintoihin, jotka ovat turvalliset, mutta mahdollisesti hiukan ylimitoitettut.

Raportin palautushetkellä tutkimuslaitteiston invertterivaunu ja ohjauskeskus olivat vielä tekeillä ja järjestelmän kehitys jatkuu edelleen. Akkuvaunujen osalta valmiina olivat laitteiston sijoittelu, kytkentäkotelo ja kytkennät kotelossa sekä vaunujen suunnitteluaineisto. Alla kuvassa 12 ovat akkuvaunut raportin palautusvaiheessa. Liitynnät invertterivaunulle ja ohjauskeskukselle ovat kesken, koska toisen pään liittymispisteitä ei vielä ole. Kytkenäkotelon lauhduttimeen liittyvät liittännät tehdään siinä vaiheessa, kun lauhdutinjärjestelmä toteutetaan.



KUVA 12. Akkuvaunut kokoamisprosessin loppuvaiheessa (Kuva: Mikko Tillander)

Akkuvaunujen jatkokehityksessä on vielä useita oleellisia tehtäviä. Akkujen ohjainyksikön ohjelmisto on päivitettävä, jotta väyläliikenteen tulkinta automaatiojärjestelmässä toimii oikealla tavalla. Raportin kirjoitushetkellä akuilla oli vielä aktiivisena järjestelmävika, jota ei voi selvittää ilman ohjelmiston päivittämistä.

Akkuvaunut on koestettava isommalla kuorma- tai latausvirralla. Sitten voidaan selvittää kennon jännite / SoC -käyrä tarkalleen ja päästään arvioimaan myös kennon ja akuston sisäistä impedanssia ja oikosulkuvirtoja. Akuston sisäisen impedanssin mittaus olisi hyvä suorittaa eri varaustilanteissa, jotta voidaan varmentaa suojalaitteiden toiminta kaikissa tilanteissa.

Lauhdutinjärjestelmä on myös asennettava. Jos akustoa ladataan ja puretaan suurella virralla, niin akut lopulta lämpenevät. Akuilla on suuri massa eikä yksi tai kaksi lataus- ja purkukierrosta vielä lämmitä akustoa käyttölämpötilarajalle, mutta jos syklejä tehdään useita peräkkäin, niin lopulta ohjainyksikkö alkaa rajoittaa sallittuja virtoja lämpötilan takia, ellei järjestelmässä ole aktiivista jäähdytystä.

Kokonaisuutena työ eteni suunnitelman mukaan, mutta alkuperäistä aikataulua hitaammin, koska järjestelmän komponenteista ei ollut riittävän yksityiskohtaista tietoa saatavilla ja teknisten yksityiskohtien selvittäminen vei oletettua enemmän aikaa. Järjestelmä on vielä kesken, koska invertterivaunun ja ohjauskeskuksen toteutus lopulliseen muotoonsa eivät kuuluneet tämän työn piiriin ja ovat suurimaksi osaksi tekemättä. Kokonaisuutena järjestelmä on yksinkertaisesta tehtävänannosta huolimatta melko monimutkainen. Akkujen varaustilan ja kytkentätavan myötä akuston jännite voi vaihdella paljonkin. Tämä pitää huomioida kaikkien komponenttien ohjauksessa ja parametroinnissa.

LÄHTEET

Acharya, Truptimayee & Pathak, Anil D. & Pati, Soobhankar. 2023. High-Temperature Electrochemical Performance of Lithium Titanate (Li₄Ti₅O₁₂) Anode Material in Secondary Lithium-ion Batteries. Journal of Energy Storage. PDF-tiedosto. Viitattu 26.2.2024.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2300926X?via%3Dihub>

Akkukierrätys Pb Oy. Tilastot. Verkkosivu. Viitattu 30.4.2024.

<https://akkukierratyspb.fi/tilastot/>

Akkuvalmistaja. 2023. Akkujen käyttöohje / User and Safety Manual. Akkuvalmistajan nimeä ei ilmoiteta salassapitosyistä eikä viitattu dokumentti ei ole julkinen.

Alarco, Jose & Talbot, Peter. 2015. The history and development of batteries. Verkkosivu. Viitattu 17.2.2024.

<https://phys.org/news/2015-04-history-batteries.html>

Bank, Thomas. 2021. Performance and Aging Analysis of High-Power Lithium Titanate Oxide Cells for Low-Voltage Vehicle Applications. Aachen, Germany: RWTH Aachen University.

Bellis, Mary. 2019. History and Timeline of the Battery. Verkkosivu. Viitattu 17.2.2024.

<https://www.thoughtco.com/battery-timeline-1991340>

BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries. Verkkosivu. Viitattu 22.2.2024.

<https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>

BU-205: Types of Lithium-ion. Verkkosivu. Viitattu 17.2.2024.

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

Chang-O, Yoon & Pyeong-Yeon, Lee & Jonghoon, Kim & Sungsoo, JangAn. 2017. Snalysis of electrical characterization on LTO batteries based on electrochemical method. PDF-dokumentti. Viitattu 31.3.2024.

http://www.i-asem.org/publication_conf/anbre17/YP.14.ER1753_4362F5.pdf

dF Electric. Fuse links & fuse holders, Photovoltaic. PDF-dokumentti. Viitattu 23.3.2024.

<https://www.dfelectric.es/data-sheets/photovoltaic/nh-fuse-links/NH1-1000VDC-gPV-fuse-links-photovoltaic.pdf>

ELB Energy Group. 2021. 40Ah LTO Battery, datalehti. Verkkosivu. Viitattu 28.2.2024.

<https://www.ecolithiumbattery.com/product/40ah-lto-battery/>

Ev lithium limited. TOSHIBA 2.3V 23Ah SCIB High energy Type LTO Battery Cell, datalehti. Verkkosivu. Viitattu 29.2.2024.

<https://www.evliithium.com/Lithium-Titanate-Battery-LTO/toshiba-23ah-lto-battery-cell.html>

Greentech renewables. 2021. Battery Cost per Cycle Analysis. Verkkosivu. Viitattu 24.2.2024.

<https://www.greentechrenewables.com/article/battery-cost-cycle-analysis>

Hall, Florian Hall & Touzria, Jonas & Wußler, Sabine & Buqa, Hilmi & Bessler, Wolfgang. 2018. Experimental investigation of the thermal and cycling behavior of a lithium titanate-based lithium-ion pouch cell. PDF-dokumentti. Viitattu 28.2.2024.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X17302475>

Harmon, E. Josehp. 2019. Assessing battery performance: Compared to what? Verkkosivu. Viitattu 24.2.2024.

<https://www.anl.gov/article/assessing-battery-performance-compared-to-what>

Keil, Peter & Jossen, Andreas. 2016. Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life—An experimental study with different 18650 high-power cells. PDF-dokumentti. Viitattu 28.2.2024.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X16300147>

Lapp Group. Technical tables T12. PDF-dokumentti. Viitattu 24.3.2024.

Liimatainen, Lauri. 2013. Käytetyimpien akkutyyppien kehitys. Opinnäytetyö. Viitattu 17.2.2024.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/66012/liimatainen_lauri.pdf?sequence=1&isAllowed=y

MSc Electronics Oy. MSc DC/DC Converter – User manual. PDF-dokumentti. Viitattu 23.3.2024

https://www.msc.eu/uploaded/files/fin/20160315_MSc-80-200-DCDCDE_user-manual_1_2.pdf

Nemeth, Thomas & Schröer, Philip & Kuipers, Matthias & Sauer, Dirk Uve. 2020. Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications – Electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations. Journal of Energy Storage Volume 31. Verkkosivu. Viitattu 17.2.2024.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X20314936>

Nitta, Naoki & Wu, Feixiang & Lee, Jung Tae & Yushin, Gleb. 2015. Li-ion battery materials: present and future. Materials today Volume 18. Verkkosivu.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702114004118?via%3Dihub>

Norma Group. Tuoteluettelo. Verkkosivu. Luettu 11.4.2024.

https://shop.normagroup.com/de_en/normaquickr-ps3-90-connector-nw08.html

Panasonic Energy Co Ltd. History of batteries. Verkkosivu. Viitattu 17.2.2024.

<https://www.panasonic.com/global/energy/study/academy/history.html>

Panasonic. 2007. Lithium Ion Batteries. Verkkosivu. Viitattu 22.2.2024.
<https://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/ACA4000/ACA4000PE3.pdf>

Parker Hannifin Corp. Catalogue MSG10-6120UK. PDF-dokumentti. Viitattu 12.4.2024.
<https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Accumulator---Cooler-Division---Europe/catalogues/cooler/air-oil-cooler/QDC%20for%20ePTO%20Catalogue%20%20MSG10-6120UK.pdf>

Parker Hannifin Corp. 2024. Bulletin MSG10-6201/EN. PDF-dokumentti. Viitattu 13.4.2024.
https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Accumulator---Cooler-Division---Europe/service-manuals/pumps/MSG10-6201-EN_QPMDC.pdf

Power Plus Deep Cycle AGM. Datalehti EV12-240. PDF-dokumentti. Viitattu 24.2.2024
https://www.suomenakut.fi/storage/product_files/4/213214-EV12-240_ce039a354c3978d1a45257224fb55b5b.pdf

Ranta, Esko & Tiilikainen, Matti. 1993. Lukion taulukot. Helsinki: WSOY.

Richtek Technology Corporation, Application note. 2014. Understanding the characteristics of Li-ion batteries and Richtek power management solutions. PDF-dokumentti. Viitattu 24.2.2024.

Sensata Technologies. 2020. How to design a precharge circuit for hybrid and electric vehicle applications. Verkkosivu. Viitattu 16.3.2024.
<https://www.sensata.com/sites/default/files/a/sensata-how-to-design-precharge-circuits-evs-whitepaper.pdf>

SFS ry. 2017. SFS-käsikirja 600-1-1. Pienjännitesähköasennukset. Helsinki: SFS.

Spal Automotive. HIGH-PERFORMANCE SEALED BRUSHLESS MOTOR FANS & BLOWERS. Verkkosivu. Viitattu 13.4.2024.
https://www.spalautomotive.it/documents/20182/94723/brushless_catalogue.pdf/011138a9-0a3f-4ada-9dc6-31560ef69104

Stroe, Ana-Irina & Stroe, Daniel-Ioan & Knap, Vaclav & Maciej, Swierczynski & Teodorescu, Remus. 2018. Accelerated Lifetime Testing of High Power Lithium Titanate Oxide Batteries. PDF-dokumentti. Viitattu 29.2.2024.
https://www.researchgate.net/publication/329616241_Accelerated_Lifetime_Testing_of_High_Power_Lithium_Titanate_Oxide_Batteries

Tammertekniikka. 2019. Tekniikan kaavasto. Porvoo: Amk-kustannus Oy.

Terburg, Kathryn. 10 Glycol Tips for Water Chiller Operators. Verkkosivu. Viitattu 15.2.2024.
<https://coolingbestpractices.com/technology/cooling-towers/10-glycol-tips-water-chiller-operators>

Xiao, Kevan. 2023. The working principle of lithium ion battery. Verkkosivu. Viitattu 22.2.2024

<https://www.dtpbattery.com/a/The-working-principle-of-lithium-ion-battery.html>

Yamawaki, Tetsuya & Eto, Kiyoshi & Sakai, Hideki. 2002. Process for producing lithium titanate and lithium ion battery and negative electrode therein. Patentti. Viitattu 17.2.2024.

<https://patentcenter.uspto.gov/applications/09501662>

Zenaji Pty Ltd. 2022. We've been building lithium titanate batteries for a decade: here's why. Verkkosivu. Viitattu 28.2.2024.

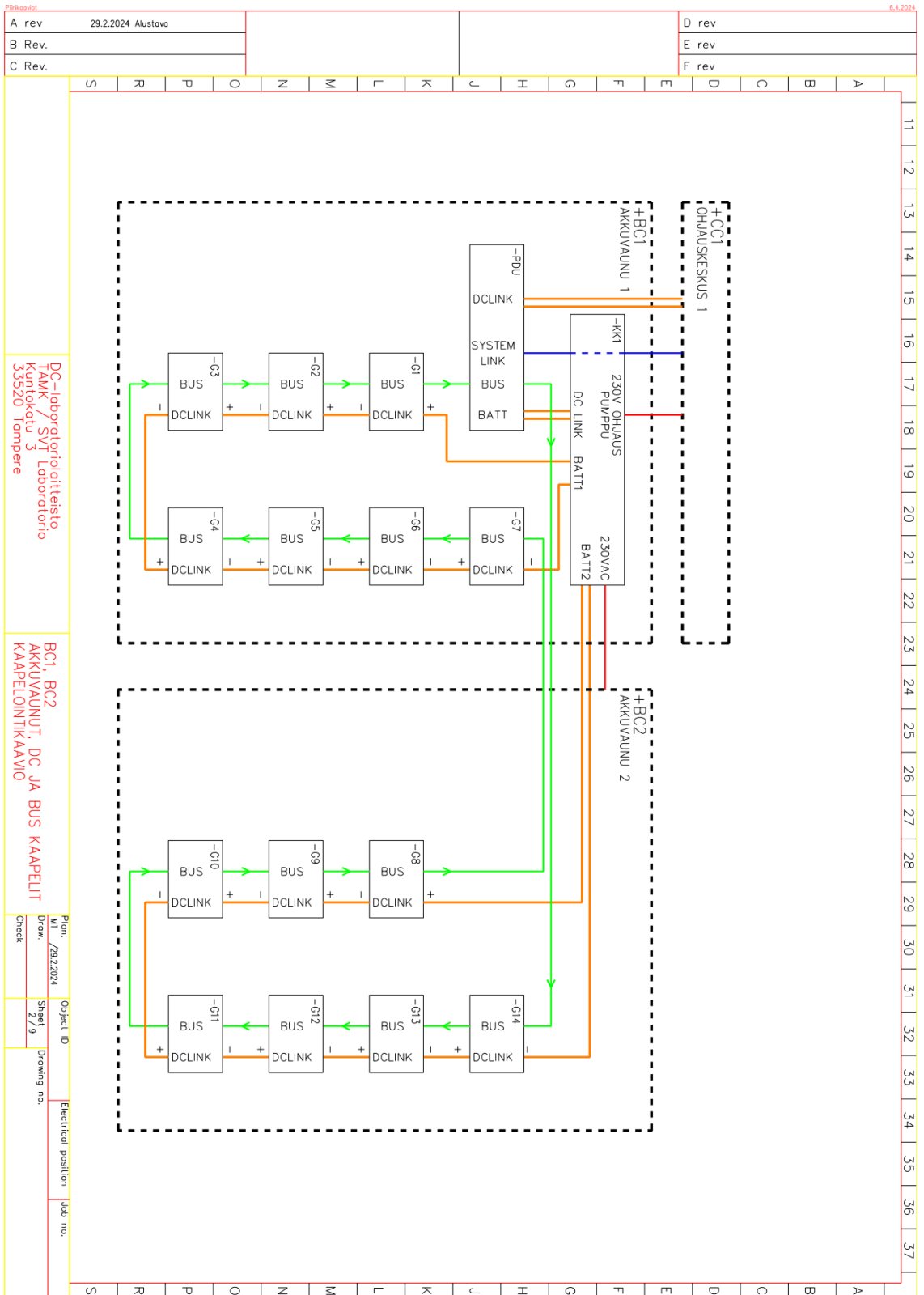
<https://zenaji.com/weve-been-building-lithium-titanate-batteries-for-a-decade-heres-why/>

Zhao, Zequan & Zhao, Xiyao & Zhou, Yiming & Liu, Siliang Liu & Fang, Guozhao & Liang, Shuquan. 2023. Towards establishing uniform metrics for evaluating the safety of lithium metal batteries. Verkkosivu. Viitattu 24.2.2024.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772834X23000313?via%3Dihub>

Akkuvaunujen kaapelointikaavio

2(10)

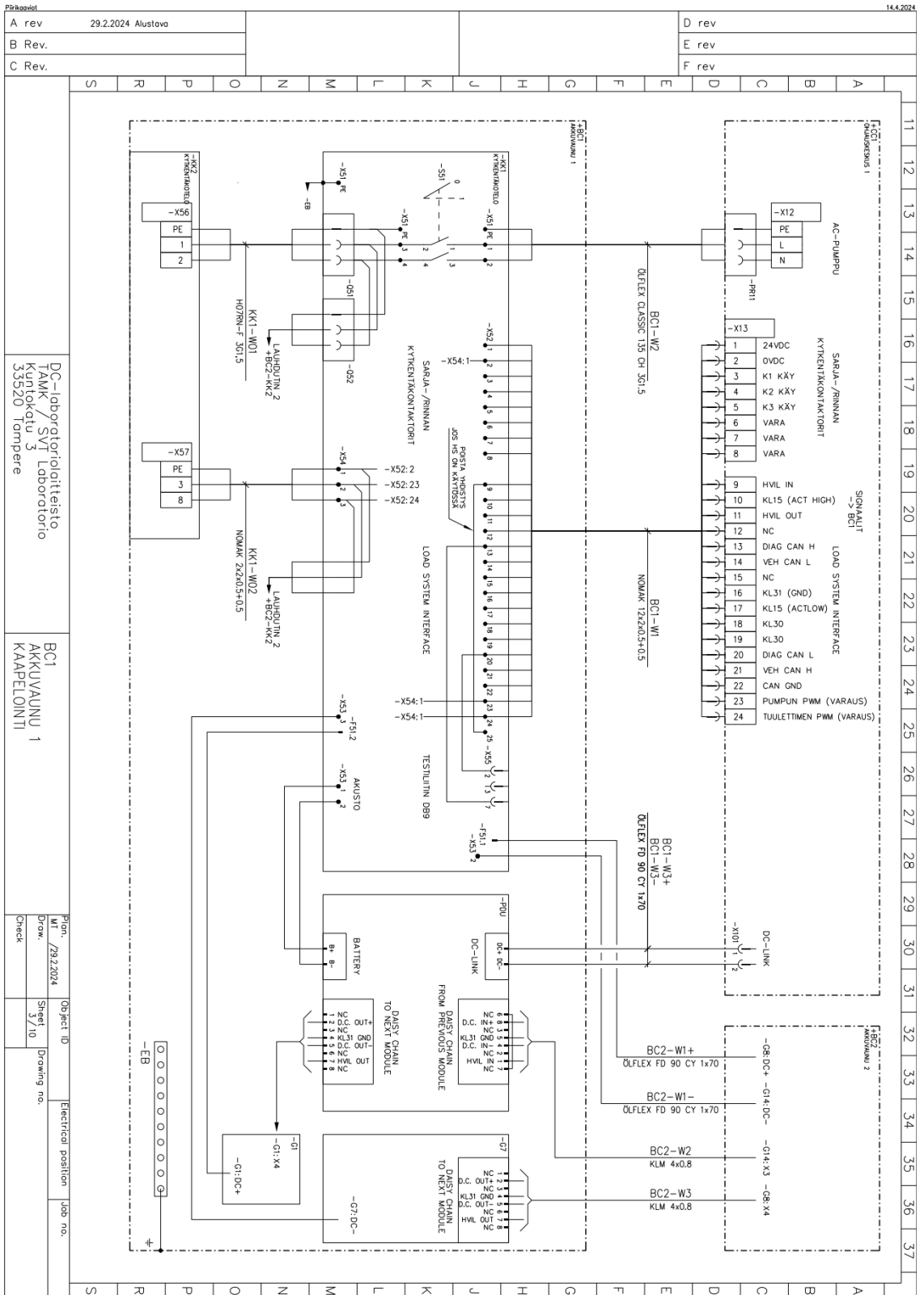


DC-laboratorio/laitteisto
 TAMK / SVT Laboratorio
 Kuntokatu 3
 33520 Tampere

BC1, BC2
 AKKUVAAUNU1, DC JA BUS KAAPELIT
 KAAPELIONTIIKAAVIO

Plan: /29.2.2024 Draw: Check:	Object ID: Sheet: 2 / 9 Drawing no.: Electrical position: Job no.:
-------------------------------------	--

BC1-KK1 kaapelointi



A rev	29.2.2024 Alustava
B Rev.	
C Rev.	

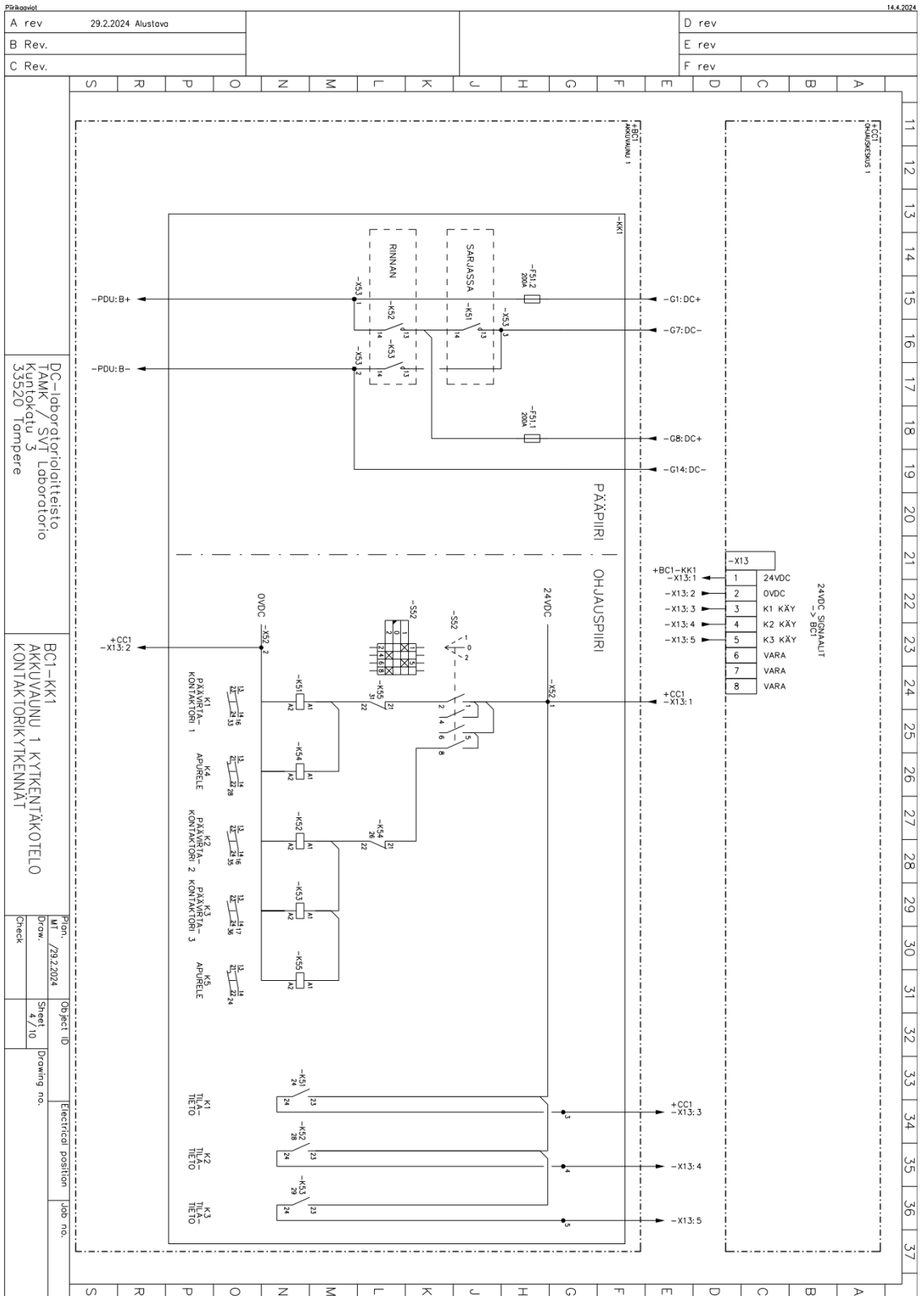
D rev	
E rev	
F rev	

DC-laboratoriolaitteisto
TAMK / SYT Laboratorio
Kuntokatu 3
33520 Tampere

BC1
AKKUVAAJUNU 1
KAPELIONIT

Piirrok.	MT	Object ID	Electrical position	Job no.
Draw.	/29.2.2024	Sheet		
Check		3/10	Drawing no.	

BC1-KK1 kontaktoriytkennät



A rev	29.2.2024	Alustava
B Rev.		
C Rev.		

D rev	
E rev	
F rev	

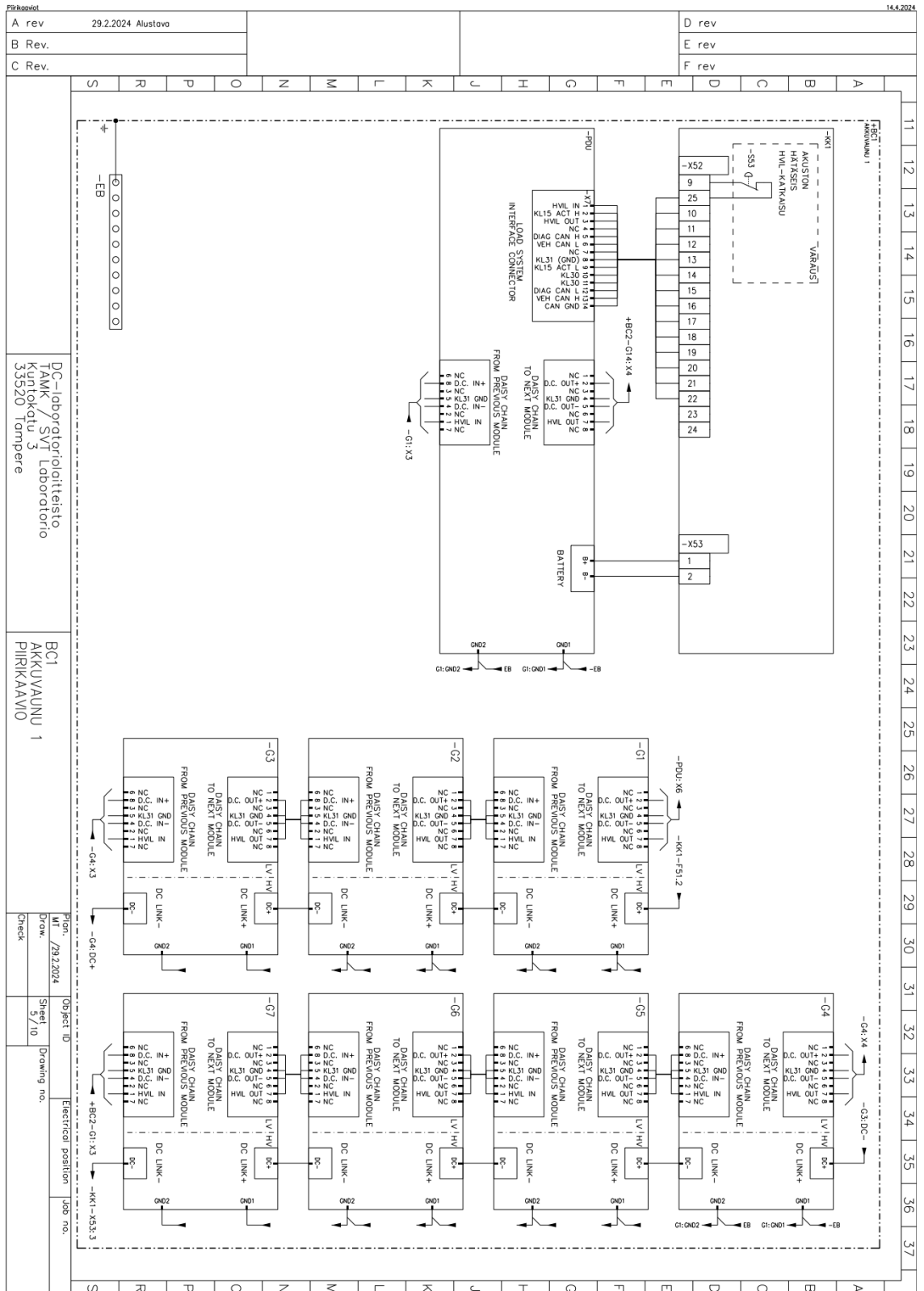
DC-laboratoriolaitteisto
TAMK / SYT Laboratorio
Kuntokatu 3
33520 Tampere

BC1-KK1
AKKUVAAJUNU 1 KYTKENTÄKOTTELO
KONTAKTORIKYTKENNÄT

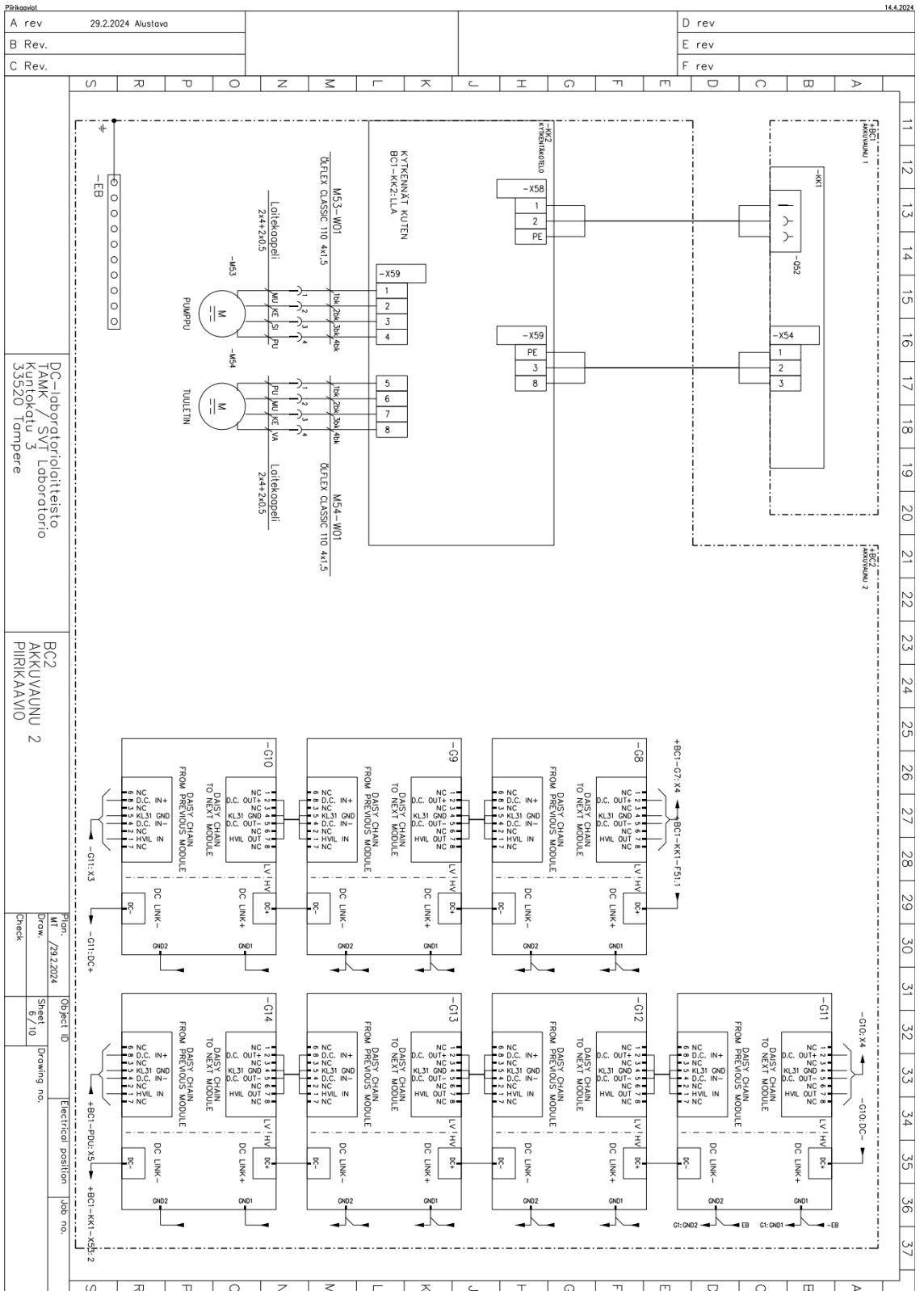
Piir.	MI	/29.2.2024
Dra.		
Sheet	4	/10
Check		
Object ID		
Drawing no.		
Electrical position		
Job no.		

BC1 akkujen kytkennät ja signaalit

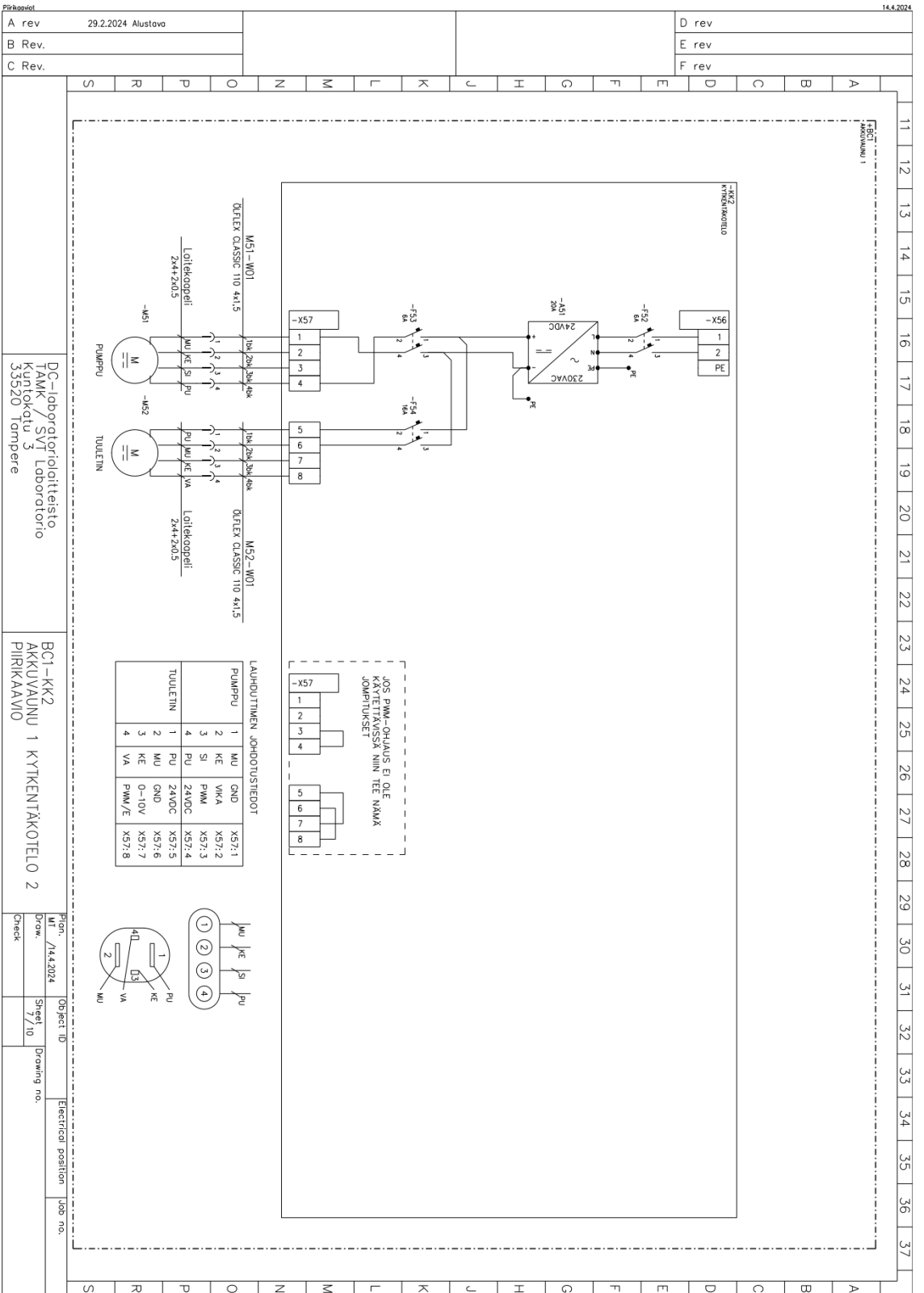
5(10)



BC2 kytkennät



Lauhduttimen kytkennät



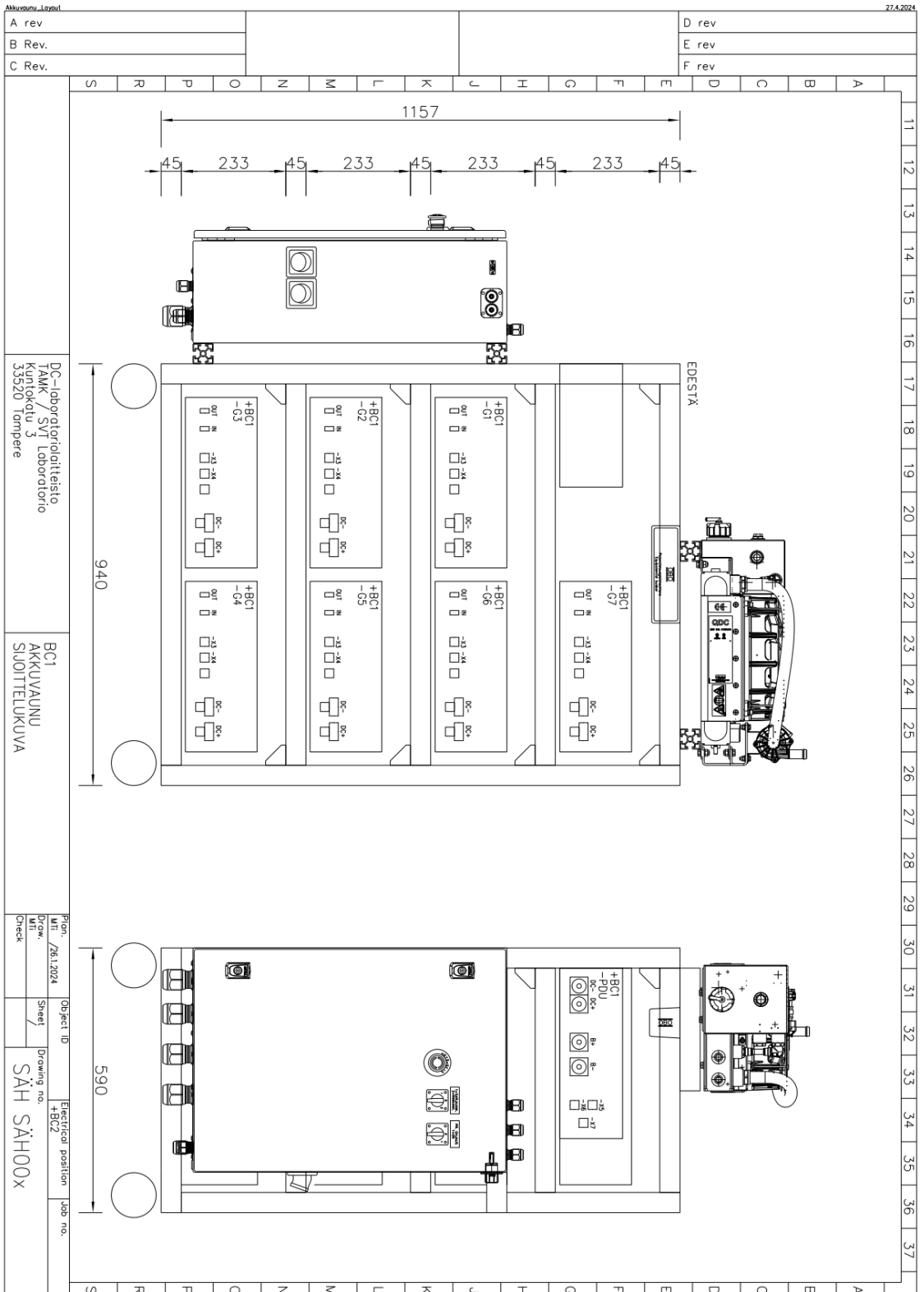
A rev	29.2.2024	Alustava
B Rev.		
C Rev.		

D rev	
E rev	
F rev	

DC-laboratoriolaitteisto TAMK / SYT Laboratorio Kuntokatu 3 33520 Tampere	BC1-KK2 AKKUVAAJUU 1 PIIRIKAAVIO	PIIRIKAAVIO	Object ID	Drawing no.	Electrical position	Job no.
			Proj. /444.2024	Sheet 7/10		
			Draw.			
			Check			

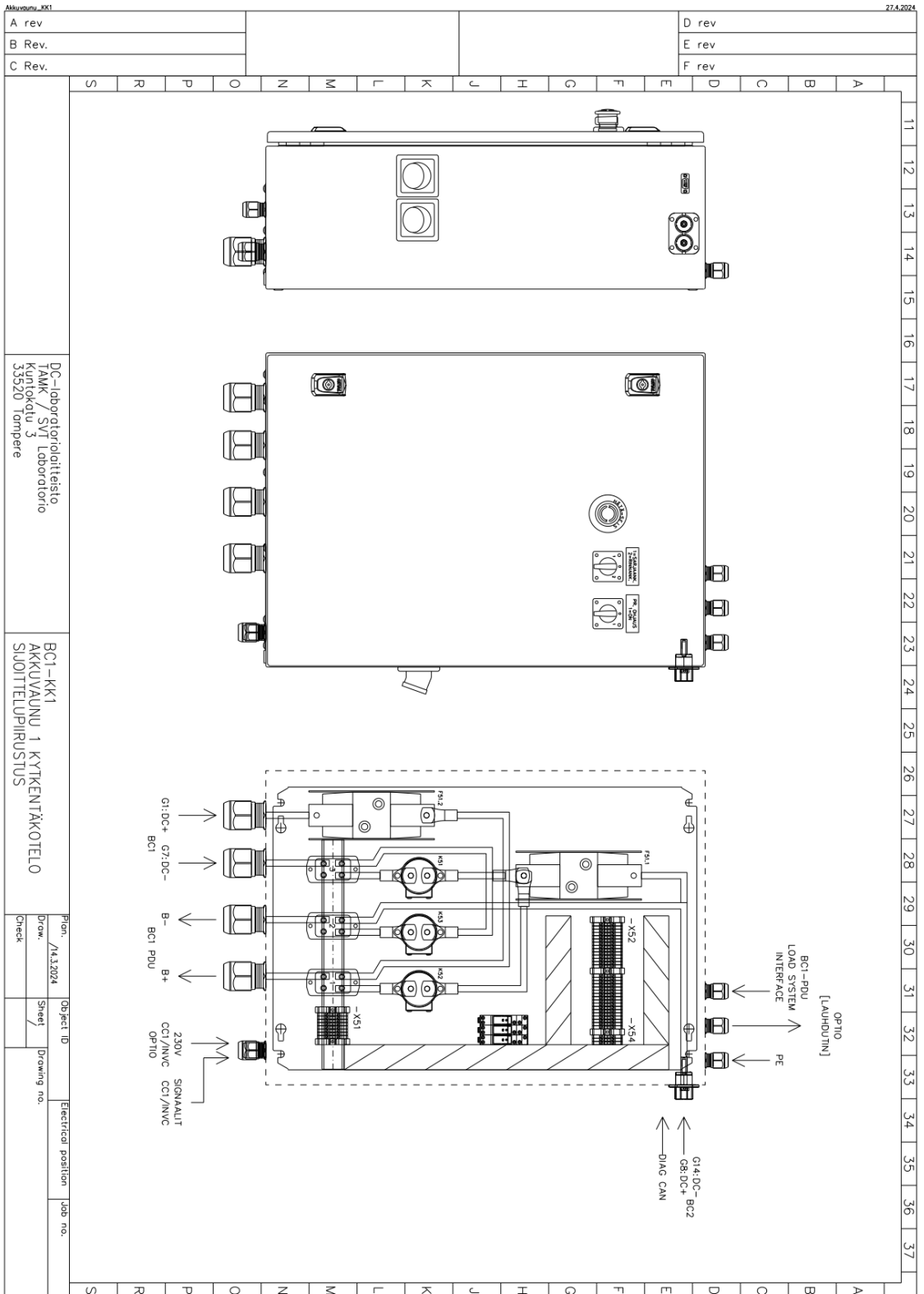
14.4.2024

BC1 sijoittelu



BC1-KK1 sijoittelu

9(10)



Maadoituskaavio

