



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**RIKU HONKOAHO**  
**AKKUKÄYTTÖISET LIIKKUVAT TYÖKONEET**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pertti Järventausta  
Tarkastaja ja aihe hyväksyty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaneuvos-  
ton kokouksessa 9. maaliskuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**RIKU HONKOAHO:** Akkukäyttöiset liikkuvat työkoneet

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 134 sivua, 12 liitesivua

Joulukuu 2016

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Uusiutuvat sähköenergiateknologiat

Tarkastaja: professori Pertti Järventausta

Avainsanat: akkutekniikka, akkujärjestelmän oheislaitteet, akkujen latausinfra, akkujärjestelmän suunnittelu, elinkaarikustannuslaskenta, tuotantolaitokset, työkoneet, energianvarastointi

Tässä diplomityössä tutkittiin eri akkuteknologioiden hyödyntämisen mahdollisuuksia tuotantolaitoksen liikkuvien työkoneiden energiavarastoina. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka perinteiset sähköistysmenetelmät, kuten kaapelirummun kautta hoidettava työkoneen sähköistys voitaisiin toteuttaa kustannustehokkaasti, turvallisesti ja käyttäjäturvallisesti akkutekniikkaa hyödyntäen.

Jo yleisellä tasolla puhuttaessa on akkuteknologian osalta tehty 2000-luvun aikana valtava määrä tutkimusta ja tuotekehitystä ja tämä tahti vaikuttaisi vain kiihtyvän entisestään. Erityisesti akkuteknologian tuotekehitystä ovat vauhdittaneet globaalilla tasolla tehdyt päätökset hiilidioksidipäästöjen vähentämisestä ja sitä kautta lisääntynyt kiinnostus akkukäyttöisiä sähköajoneuvoja kohtaan. Tämän diplomityön sovelluskohteina olevissa tuotantolaitoksissa eivät ilmaston suojelemista koskevat tavoitteet olleet juurikaan myötävaikuttamassa akkutekniikkaan siirtymistä, vaan syyt liittyvät akkuteknologiaan siirtymisestä saataviin kustannussäästöihin yhdessä joustavamman tuotannon ja uusien markkinointikeinojen ohella. Näin ollen akkuteknologioiden laajentumisen myötä tapahtunut akkujen hankintakustannusten lasku on saanut myös teollisuuden toimijat kiinnostumaan akkujen hyödyntämisestä omiin tarpeisiinsa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on ollut selvittää erityisesti litiumionitekniikoiden teknistä taloudellista kilpailukykyä muihin akkutyyppeihin nähden sekä laatia tarkasteltavaan sovelluskohteeseen sen käyttöympäristön ja käytettävien työkoneiden vaatimukset täyttävä akku- ja latausjärjestelmä. Laadittavan järjestelmän tulee olla asennettavissa jo ennalta määritellyn teholuokan työkoneisiin siten, että koneiden tuotantohinta säilyy kohtuullisella tasolla. Samalla oli huolehdittava siitä, että koneiden sähkökeskuksen yhteyteen määritellyt tilavaraukset mahdollistavat akkutekniikan ja sen oheiskomponenttien sovittamisen kyseisen työkoneen yhteyteen.

## ABSTRACT

**RIKU HONKOAHO:** Utilization of battery technology in motorized machinery

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 134 pages, 12 Appendix pages

December 2016

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Renewable Energy Systems

Examiner: Professor Pertti Järventausta

**Keywords:** battery technology, balance of plant components in battery-powered system, charging infrastructure, battery-powered system developing, life cycle costing, industrial facilities, motorized machinery, energy storage systems

This master's thesis studies the utilization of battery technology as an energy storage in motorized machinery. The main target was to research that how one could use the battery technologies in a moving machinery instead of conventional powering methods like electrifying the machinery via cable drum. Of course, this had to do with all due respect to safety, economic and user-friendly aspects.

In a general level, there has been a huge amount of investigation in a field of developing battery technologies during the 21<sup>st</sup> century and the rate of interest is still accelerating. One of the major reason for this is the raising interest towards the electrical vehicles which is caused at least partially by the agreements for reducing the CO<sub>2</sub>-emissions. However, these agreements don't have an impact to utilization rate of battery technology in industrial machineries which are the objects in this master's thesis. The reasons for using battery technology in the industrial plants are based on cost reducing together with flexible production and advanced marketing resources. As a result of lowering costs of battery technologies, which is result of increasing usage of battery-powered machines, the actors of multiple fields at industrial sectors have started to research the suitability of battery technologies to their demands.

The one key element of this thesis was specially to find out how the lithium-ion batteries are able to compete with other battery technologies when considering the unit prices with estimated cyclic and calendar life cycles of different types of batteries. There was also a demand of developing the whole battery-powered system together with charging station to match with the all requirements. These designed system layouts had to be also suitable with the conditions of operating environment as well as requirements of examined industrial machineries. One of major challenges was to keep the costs of components in a reasonable level and not to exceed the limits of battery pack's space reservation inside the machinery.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on teetetty Tampereen teknillisen yliopiston sähkötekniikan laitoksella Elematic Oyj:n pyynnöstä. Työn ohjaajina toimivat DI Taisto Aurola ja DI Jouni Sirkka Elematic Oyj:stä ja tarkastajana professori Pertti Järventausta TTY:ltä.

Tämän diplomityön ensisijaisena tarkoituksena oli antaa Elematic Oyj:lle riittävästi tietoutta ja yhteistyökontakteja, jotta he pääsevät soveltamaan nykyaikaisia akkuteknologioita, niiden oheislaitteineen ja latausjärjestelyineen omissa tuotantolaitteissaan. Toivon, että tämän diplomityön ja sen oheismateriaalien myötä Elematic Oyj pystyy toteuttamaan ensimmäiset akkukäyttöiset työkoneensa mahdollisimman pikaisesti ja vastaamaan näin asiakkaiden esittämiin toiveisiin sekä parantamaan kilpailuasemaansa omilla markkina-alueillaan.

Osoitan siten kiitokseni Elematic Oyj:lle erittäin mielenkiintoisesta, motivoivasta ja monipuolisesta tutkimusaiheesta, jonka uskon tukevan tulevaa tieteellistä uraani sekä antaneen kattavan näkemyksen akkuteknologioiden nykytilasta ja akkujärjestelmän suunnittelun moninaisista vaatimuksista.

Lisäksi haluan osoittaa mitä lämpimimmät kiitokset ystävilleni ja läheisilleni, erityisesti avopuolisolleni Anna Riutalle sekä vanhemmilleni Satu ja Reijo Honkoaholle tämän diplomityön ja muiden opintojeni aikana saamastani tuesta ja kannustuksesta. Haluan myös kiittää TTY:n sähkötekniikan laitoksen tutkijoita Ph.D. Jenni Rekolaa avunannosta moottorikäyttöjä koskevaan tutkimusosioon ja DI Antti Supposta TTY:n mielenkiintoisen sähköautotutkimuksen ja eri akkutekniikoiden esittelystä sekä opiskelukaveriani Tapio Arosta tehoelektroniikan teoriatason vinkeistä.

Erityiskiitoksen annan vielä Tampereen teekkareiden moottorikerholle – viihtyisän ja rauhallisen kerhohuoneen tarjoamisesta tämän diplomityön kirjoittamispaikaksi kesän 2016 aikana.

Tampereella, 27.12.2016

Riku Honkoaho

# SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	1
1.1 Tutkimuksen tausta .....	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset .....	2
1.3 Diplomityön rakenne .....	4
2 AKKUJEN YLEISPIIRTEET .....	5
2.1 Akkujen rakenne .....	5
2.2 Akkujen ominaisuudet .....	7
2.2.1 Akun kenno- ja napajännite .....	8
2.2.2 Akun energia- ja tehotiheys .....	11
2.2.3 Akun kapasiteetti sekä varautumis- ja purkautumiskyky .....	14
2.2.4 Teoreettinen elinikä ja ulkoisten tekijöiden vaikutus .....	15
2.3 Akkutyypin esittely .....	19
2.3.1 Lyijyakut .....	19
2.3.2 Nikkelikadmiumakut .....	20
2.3.3 Nikkelimetallihydridiakut .....	21
2.3.4 Litiumioniakut .....	21
2.4 Akkujen hintakehitys ja uudet akkutyypit .....	25
3 AKKUKÄYTTÖJEN OHEISLAITTEET .....	27
3.1 Sähkömoottorit .....	27
3.2 Tasa- ja vaihtosuuntaajat .....	32
3.3 DC/DC -muuntimet .....	35
3.4 BMS -järjestelmä .....	42
3.5 Superkondensaattorit .....	50
4 SOVELLUSKOHTTEEN ESITTELY .....	55
4.1 Tuotantoprosessin esittely sovellustasolla .....	55
4.1.1 Ontelolaattalinjan prosessikuvaus .....	55
4.1.2 Seinälaattalinjan prosessikuvaus .....	57
4.2 Prosessilaitteiden energiatarpeet .....	58
4.3 Tarkempi tutustuminen akkukäyttöille valittuihin työkoneisiin .....	62
4.3.1 Preparer .....	63
4.3.2 Poikkisiirtopalkki .....	68

5 LATAUSJÄRJESTELMÄN TOTEUTUSVAIHTOEHDOT .....	70
5.1 Latausaseman suunnittelu sovelluskohteeseen .....	70
5.1.1 Preparerin vaatima akkukapasiteetti ja latausteho.....	70
5.1.2 Poikkisiirtopalkin vaatima akkukapasiteetti ja latausteho .....	75
5.1.3 Usean akkukäyttöisen koneen lataaminen samalla linjastolla.....	77
5.2 Latausstandardit .....	78
5.3 Vaihtovirtalaturit.....	81
5.4 Tasavirtalaturit .....	86
5.5 Trukkiakkujen laturit .....	87
5.6 Onboard AC/DC -laturit .....	89
5.7 Induktiolataus.....	99
6 AKKUTEKNIIKAN KÄYTTÖÖNOTOSSA HUOMIOITAVIA ASIOITA .....	103
6.1 Säädökset ja määräykset .....	103
6.1.1 Akkutekniikan käyttöön liittyvät säädökset ja määräykset .....	103
6.1.2 Akkuasennuksiin liittyvät säädökset ja määräykset .....	105
6.2 Akkuteknologian käyttöönoton vaikutus tuotantoprosessiin.....	106
7 TOTEUTUSSUUNNITELMA AKKUTEKNIikkaAN SIIRTYMISESTÄ.....	110
7.1 Akuston ja BMS -järjestelmän valinta ja mitoittaminen .....	110
7.2 Järjestelmän muut oheislaitteet ja -komponentit .....	114
7.3 Esitys latausjärjestelmän toteutuksesta.....	116
8 YHTEENVETO .....	121
LÄHTEET.....	123

LIITE 1: Leroy-Somersin tasavirtamoottoreiden mallivariaatiot

LIITE 2: Arctic Electric Vehicles Oy:n BMS -järjestelmävaihtoehdot

LIITE 3: Elematic Oyj:n EDGE-linjastokonseptin havainnekuva

LIITE 4: Manzanita Micro -latureiden ulos- ja sisääntulovirtojen kuvaajat akuston  
jännitetason funktiona

LIITE 5: GS Yuasan tarjoamat akkukäyttöisen Preparerin akustokonseptit

LIITE 6: Akkukäyttöisen Preparerin HW-arkkitehtuuri

LIITE 7: Akkukäyttöisen poikkisiirtopalkin HW-arkkitehtuuri

## LYHENTEET, MERKINNÄT JA MUUTTUJAT

### Lyhenteet

\$/kWh	Akkujen, superkondensaattoreiden yms. energiavarastojen kustannustasoa kuvaava yksikköhinnan määritelmä, valuuttayksiköllä tarkoitetaan Yhdysvaltain dollaria (USD)
AC	eng. Alternating Current, vaihtovirta
AEV	Arctic Electric Vehicles Oy, Ratio Electric B.V -yhtiön jälleenmyyjä
AGM	eng. Absorbent Glass Matt, eräs lyijyakkutyyppe, missä nestemäinen elektrolyytti sidottu lasikuitumattoon
AGV	eng. Automated Guided Vehicle, automaattisesti kulkeva ajoneuvo, käytetään myös nimitystä vihivaunu
AIM	eng. Active Ineterface Module, Siemensin aktiivinen verkkosuodin
ALM	eng. Active Line Module, Siemensin aktiivinen linjamoduuli
BLDC	eng. Brushless DC, harjaton tasavirtamoottori
BMS	eng. Battery Management System, akun kuntoa ja sen tilaa reaaliajassa valvova mikroprosessoriyksikkö
BMU	eng. Battery Management Unit, synonyymi termille BMS
CAGR	eng. Compound Annual Growth Rate, vuotuista kasvunopeutta kuvaava talousluku (indeksi)
C-arvo	eng. C-rate, akun purku- ja latausnopeutta kuvaava suure
CP	eng. Control Pilot, yksi latausliittimen signaalijohdoista
DC	eng. Direct Current, tasasähkö
DCLA	eng. Deep Cycle Lead Acid, eli erityisesti akun syväpurkauksia kestävä suunniteltu lyijyakkutyyppe
DTC	eng. Direct Torque Control, mm. ABB:n käyttämä oikosulkumoottorien ohjausjärjestelmä
DMM	eng. Dual Motor Module, kahden sähkömoottorin yhtäaikaiseen ohjaukseen kykenevä moottorinohjausyksikkö
DoD	eng. Depth of Discharge, akusta purettavan varauksen suuruutta ilmaiseva suure, missä 100% viittaa täysin purettavaan akkuun
ELY	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
EMI	eng. Electromagnetic interference, sähkömagneettiset häiriöt
GEL	eng. Gel (battery), geeliakuksi nimetty lyijyakun tyyppi, missä nestemäinen elektrolyytti on korvattu geelimäisellä aineella
H <sub>2</sub> O	Vesimolekyyl
IGBT	eng. Insulated-gate bipolar transistor, transistorityyppe
KRW	Etelä-Korean won, rahayksikkö
LCO	LiCoO <sub>2</sub> , litiumkoolttioksidiakku
LFP	LiFePO <sub>4</sub> , litiumrautafosfaattiakku
LiC6	Litioitu grafiitti, litiumioniakun mahdollinen anodimateriaali

LiCoO <sub>2</sub>	Litiumkobolttioksidi, litiumioniakun mahdollinen katodimateriaali
Li-Ion	eng. Lithium Ion (battery) eli litiumioniakku
LiPF <sub>6</sub>	Litiumheksafluorofosfaatti, litiumioniakun mahdollinen elektorolyyttimateriaali
LiPo	Litiumpolymeeriakku
LMO	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , litiummangaaniakku
LNCA	LiNiCoAlO <sub>2</sub> , litiumnikkelikobolttialumiiniakku
LNMC	LiNiMnCoO <sub>2</sub> , litiumnikkelimangaanikobolttiakku
LTO	Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub> , litiumtitanaattiakku
NiCd	Nikkelikadmiumakku
NiMH	Nikkelimetallihydridiakku
PbO <sub>2</sub>	Lyijyoksidi
PbSO <sub>4</sub>	Lyijysulfaatti
PP	eng. Proximity Pilot, toinen latausliittimen signaalijohdoista
RoHS	eng. Restriction of Hazardous Substances, direktiivi, joka pyrkii rajoittamaan ihmisille ja/tai ympäristölle vaaraa aiheuttavien ongelmajätteiksi luokiteltavien aineiden käyttöä
SMM	eng. Single Motor Module, yksittäisen moottorin ohjaukseen käytettävämoottorinohjausyksikkö
SOC	eng. State of Charge, akun varaustilaa prosenttiyksikössä kuvaava suure, missä 100 % tarkoittaa täyteen varattua akkua ja yli 100 % suuruinen arvo akun ylilatausta
T&K	Tutkimus- ja kehitys
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö

### **Merkinnät ja muuttujat**

$\alpha$	ohjauskulma
$\mu$	kommutointikulma
A	ampeeri
Ah	ampeeritunti
C	kapasitanssi
C <sub>6</sub>	grafiitti
Co	koboltti
e <sup>-</sup>	elektroni
E	energia
E <sub>a</sub>	akun anodin potentiaali
E <sub>akt</sub>	akun aktivointipolarisaatio
E <sub>k</sub>	akun katodin potentiaali
E <sub>kenno</sub>	akun kennojen välinen potentiaaliero
E <sub>kon</sub>	akun konsentraatiopolarisaatio
E <sub>ohm</sub>	akun ohminen polarisaatio



$E_p$	akun polarisaatiojännite
$E_{smv}$	sähkömotorinen voima
$F_v$	Faradayn vakio (96,487 C mol <sup>-1</sup> )
F	faradi
$\Delta G$	Gibbs'n vapaa energia (yksikössä J mol <sup>-1</sup> )
g	gravitaatiokiihtyvyys
G	gravitaatiovoima
h	korkeus
I	virta
K	katkaisin
kg	kilogramma
kWh	kilowattitunti
Li	litium
Li <sup>+</sup>	litiumioni
n	elektronien lukumäärä
N	pinnan tukivoima
Nm	newtonmetri
m	massa
M	vääntömomentti
O <sub>2</sub>	oksidi
Pb	lyijy
rpm	kierrosta minuutissa
U	jännite
$V_{kenno}$	akun kennojännite
Wh	wattitunti
x	reaktiokerroin

# 1 JOHDANTO

Tämä selvitys akkuteknologian hyödyntämisestä työkoneisiin tehtiin Elematic Oyj:n esittämästä aiheesta ja se käsittelee siten Elematic Oyj:n suunnittelemien työkoneiden muuntamista akkukäyttöisiksi. Tarkasteltavat työkoneet olivat betoniteollisuuden ontelolaatta- ja välipohjalinjan koneita, jotka käyttävät alun perin energialähteenään sähköä, dieseliä tai nestekaasua, mutta tutkimuksen tuloksia voidaan helposti soveltaa myös seinälaattalinjaston laitteille.

Sähkökäyttöisten koneiden sähkönsyöttö hoidetaan keskukselta viedyllä siirtokaapelilla, jonka pystyy kelaamaan koneen yhteydessä olevaan kaapelirumpuun. Sen sijaan diesel- sekä nestekaasukäyttöisiä ovat vain muutamat harjakoneen (myöhemmin Preparer) erikoismallit, joten tässä työssä on tutkittu vain sähkökäyttöisten työkoneiden muuntamista akkukäyttöisiksi.

Pääpainona eri teknologiavaihtoehtoja verrattaessa oli tutkia olemassa olevia kaupallisia akkuratkaisuja ja valita kustannuksiltaan alhaisin ratkaisu, joka pystyisi kuitenkin käsittelemään koneiden vaatiman sähkötehon sekä tuotantoprosessin syklisen energiatarpeen. Tätä varten diplomityössä pohdittiin eri lataustekniikoita, joilla koneiden keskeytymätön liikkuminen voitiin varmistaa.

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Tähän akkukäyttöjä tutkivaan projektiin siirryttiin moninaisten syiden johdosta. Lähtökohtaisesti tässä projektissa ei haettu kustannussäästöjä laitteistotasolla, vaan saavutettava hyöty tulee korostumaan loppuasiakkaiden kokeman joustavamman tuotannon ja sitä kautta saatujen säästöjen kautta. Myös mahdollisesti yksinkertaistuva tehdaslinjan sähköistys saattaa tuoda suuriakin säästöjä tehtaan kunnossapitoa ja rakentamisvaihetta ajatellen.

Esiin nousi myös Elematicin globaali asiakaskunta ja siten akkuteknologian kautta syntyvät mahdollisuudet hyödyntää erityyppisiä uusiutuvia energiamuotoja. Ajatukset toiminnan tehostamisesta ovat pääosin lähtöisin Elematicin omista linja- ja laitteistoanalyysistä, mutta myös asiakkaiden esittämät toiveet ovat olleet saman suuntaisia.

Sivuhuomiona mainittakoon aiemmin sähkönsyöttöön käytettyjen kaapelirumpujen ongelmat, kuten niiden avaamiseen vaadittava työvoima, epätasainen paluukelautuminen,

kaapeleiden aiheuttamat kompastumisvaarat sekä kaapeleiden rispaantuminen ajan saatossa. Näin ollen akkukäyttöihin siirtyminen parantaa osaltaan myös työturvallisuutta sekä ratkaisee kaapelikäyttöjen teknisiä ongelmia ja edesauttaa tutkittavan konseptitehtaan automatisointia.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tämän diplomityön tutkimuksen tavoitteena oli selvittää teknis-taloudellisen lähestymistavan kautta kokonaistaloudellisesti edullisin, mutta samalla turvallinen ja pitkän tähtäimen aikajänteen tarkastelulla soveltuvin akkuteknikka Elematic Oyj:n valmistamien betonituoteteollisuuden tuotantolinjastoilla tarvittaviin liikkuviin työkoneisiin.

Työssä käsitellään pintapuolisesti myös kokonaisvaltaista kuvaa erityyppisten tuotantolinjastokonseptien toimintaperiaatteesta sekä erilaisten työvuoro- ja linjasto-optioiden asettamia vaatimuksia sovelluskohteisiin laadittavien akkujärjestelmien osalta. Diplomityön tavoitteiksi ja tutkimuskysymyksiksi Elematic Oyj:n toimesta seuraavat rajaukset:

- Millaiset säädökset ja määräykset koskevat akkuteknologian käyttöönottoa ja kuinka niitä tulisi soveltaa Elematic Oyj:n hankkeessa?
- Selvittää miten akkuteknologian käyttöönotto vaikuttaa tuotantolaitoksen toimintaan. Tarkastelemalla esimerkiksi valmistus-, käsittely-, kuljetus- ja huoltoprosesseja vaadittujen toimintatapojen ja/tai määräysten asettamien lähtökohtien mukaisesti.
- Selvittää soveltuvin teknologia, millä tuotantolaitteiden prototyypeissä käyttöönotettava akkujärjestelmä kannattaisi toteuttaa turvallisen ja kustannustehokkaan toteutuksen lisäksi siten, että valittu teknologia palvelee myös mahdollisimman hyvin tuotantoprosessin ja prosessilaitteiden sähkötekniisiä vaatimuksia.
- Millä tekniikalla ja miten suunniteltava akkujärjestelmä kannattaisi toteuttaa. Piittää sisällään akkujen lisäksi akkujärjestelmän oheislaitteet, kuten erilaiset moottorikäytöt, tasa- ja vaihtosuuntaajat, DC/DC-konvertterit ja akustonhallintajärjestelmän sekä sisältää näiden komponenttien valinnan, mitoitus ja jännitetasojen määrittämisen
- Selvittää valitun tekniikan skaalautuvuus eri teho- ja energiatarpeille.
- Tarkastella akkujen lisäksi myös superkondensaattoreita teknillis-taloudellisesta näkökulmasta.
- Luoda toteutussuunnitelman yhteyteen akkukäyttöisiksi muunnettavien koneiden suunnittelua varten *hw-arkkitehtuuri* kahden tarkastelun kohteeksi valitun työkoneneen osalta.

Yhdessä tämän diplomityön kanssa käynnistyi Elematic Oyj:llä myös toinen opinnäyte-työ, jonka toteuttajaksi valittiin Tampereen ammattikorkeakoulun sähkötekniikan opis-

kelija Teemu Heiska. Hänen opinnäytetyönsä aiheena oli selvittää akkukäyttöisten tuotantolaitteiden latausjärjestelmälle asetettavat vaatimukset sekä tutkia latausinfra toteutumismahdollisuuksia, mutta opinnäytetyön toteutus jäi valitettavasti hieman vaillinaiseksi. Tämän johdosta Elematic Oyj:n puolelta esitettiin toivomus, että myös latausjärjestelmän kokonaisvaltainen tarkastelu toteutettaisiin tämän diplomityön yhteydessä. Vaikka tämän diplomityön alkuvaiheessa rajauksiin lukeutui myös virallisen sähkösuunnittelun tekeminen yhden tai useamman laitteen osalta, päädyttiin lopulta siihen tulokseen, että varsinainen sähkösuunnittelu voidaan korvata latausinfraa koskevan selvityksen tuomalla, sähkösuunnittelua suuremmalla, lisäarvolla. Latausjärjestelmän osalta tutkimuksen tavoitteiksi ja tutkimuskysymyksiksi asetettiin:

- Selvittää tarkempaan tutkimukseen valittujen kahden työkoneen osalta vaadittava latausteho ja akkukapasiteetti.
- Millä lataustekniikalla tuotantolaitosten latausjärjestelmä olisi kokonaistaloudellisesti järkevintä toteuttaa? Tutkimusaiheiksi valittiin hidas- ja pikalataus sekä tasa- ja vaihtovirtaa käyttävät laturit.
- Selvittää kuinka akkukäyttöjen mahdollinen lisääminen tulevaisuudessa pystyttäisiin huomioimaan nyt laadittavan latausaseman suunnittelussa siten, että latausjärjestelmä kykenee useamman, kuin nyt suunniteltavien kahden akkukäyttöisen laitteen yhtäaikaiseen lataamiseen
- Millaisia vaihtoehtoisia, mutta silti kaupallisia latausmenetelmiä on tällä hetkellä tarjolla (esim. induktiolataus)?
- Laatia kahden tutkimuskohteeksi valitun työkoneen osalta latausjärjestelmää koskeva luonnos, minkä pohjalta akkujen ja/tai superkondensaattoreiden lataaminen voidaan toteuttaa taloudellisesti, riittävällä latausteholla sekä akkutekniikalle tehdyn tilavarauksen mahdollistamalla tavalla.

Työssä käytetään sekaisin mm. termejä työkone, tuotantolaitteisto ja prosessilaitte sekä puhutaan yleisesti laitteista ja koneista, mutta näillä kaikilla tarkoitetaan nimenomaan Elematic Oyj:n valmistamien ja betonituoteteollisuudelle toimittamien tuotantolinjastojen, pääosin kiskoilla liikkuvia, työkoneita.

Tämä diplomityö antaa erittäin laajan ja kattavan selonteon siitä, kuinka akkukäyttöihin siirtyminen voidaan toteuttaa tinkimättä turvallisuus-, käytettävyy-, tai kustannustaloudellisista näkökulmista. Valtaosa tämän diplomityön aihealueista käsitellään nojautuen laajaan kirjallisuuskartoitukseen. Eri komponenttien ja osajärjestelmien tarkastelun yhteydessä huomioidaan lukuisia kaupallisia vaihtoehtoja, jotka kykenevät täyttämään erisuuruisten teho- ja energiatarpeiden vaatimukset sekä sopivat erilaisiin toimintaympäristöihin (esim. käyttölämpötilojen vaikutukset eri oheislaitteiden toimintaan). Näin ollen tämän diplomityön pohjalta voitaisiin suunnitella myös muiden kuin betonituoteteollisuuden linjastoilla käytettävien työkoneiden muuntamista akkukäyttöisiksi.

### 1.3 Diplomityön rakenne

Tässä diplomityössä lähdetään liikkeelle luvussa kaksi esiteltävästä akkutekniikkaa koskevasta teoriasen tarkastelusta siten, että työssä tulee esiteltä kaikki yleisimmin käytettävät akkutyyppit. Niiden ominaispiirteiden tarkastelun kautta pyritään löytämään Elematic Oyj:n työkoneisiin parhaiten soveltuva akkutyyppi. Kolmannessa luvussa esitellään akkutekniikkaan liittyviä oheislaitteita ja -komponentteja sekä teoriasella että potentiaalisimpien kaupallisten vaihtoehtojen esittelyn ja keskinäisen vertailun kautta. Näin pyritään rakentamaan kokonaisvaltaisesti Elematic Oyj:n toimittamiin tuotantolaitoksiin soveltuvin järjestelmä, joka täyttää sille asetetut vaatimukset. Neljännessä luvussa kuvataan erilaiset tuotantotuotantoprosessit ja esitellään kolme konseptimallin linjastotyyppiä ja linjastoilla käytettäviä työkoneita ja tehdään valinta kahden konetyypin ottamisesta mukaan syvempään tarkasteluun, millä ohjataan tutkimusta kohti kahden akkukäyttöisen työkoneen prototyypin suunnittelua. Viidennessä luvussa hyödynnetään Teemu Heiskan laatimia prosessilaitteiden energiankulutuslaskelmia ja käytävissä olevia latausaikoja akkutekniikalle asetettavien vaatimusten määrittelyssä ja luodaan katsaus soveltuvan latausinfran rakentamiseksi. Lopulta seitsemännessä luvussa tehdään varsinainen toteutus-suunnitelma, missä lähdetään rakentamaan aiemmissä luvuissa tutkittujen asioiden ja toimintamallien pohjalta kokonaistaloudellisesti kohtuullisen hintatason turvallista ja käytäjäystävällistä akkujärjestelmää, joka palvelee mahdollisimman tehokkaasti asiakasyritysten tarpeita.

## 2 AKKUJEN YLEISPIIRTEET

Akkuja käytetään energiavarastoina lukuisissa sovelluksissa aina kannettavasta pienelektroniikasta suuren kokoluokan moottorikäyttöihin ja sähköjärjestelmiin, joten akkuteknologian on katettava hyvin monipuolisten käyttösovellusten eroavat vaatimukset. Itse akkuteknologian juurten uskotaan yltävän vähintään 1700-luvun loppupuolelle, mutta tietävästi ensimmäinen uudelleenladattava akku kehitettiin vuonna 1859 ranskalaisen fyysikon Gaston Plantén toimesta [1]. Tämä ensimmäinen kehitysversio perustui happoliuokseen asetettuun lyijyelektrodiin ja siihen pohjautuvat vielä tänä päivänäkin laajasta käytössä olevat lyijyakut. Sittemmin kehitys on vienyt akkuteknologiaa roimasti eteenpäin, mikä voidaan havaita tarkastelemalla esimerkiksi avaruusluotaimissa käytettäviä litiumakustoja, lääketieteen tueksi kehitettyjä akuilla toimivia sydämentahdistimia tai sähkönlaadun parantamiseen ja keskeytymättömään sähkönsyöttöön käytettäviä suuren kokoluokan UPS-järjestelmiä.

### 2.1 Akkujen rakenne

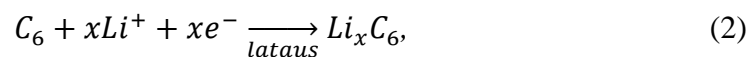
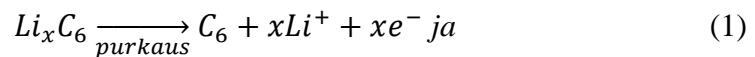
Rakenteeltaan lähestulkoon kaikki 2010-luvulla markkinoilla olevat sekä myös historian aikana kehitetyt akkutyypit pohjautuvat samaan perusteoriaan. Yksittäisen akkukennon sisälle on sijoitettuna kahdesta elektrodista, positiivisen navan katodista ja negatiivisen navan anodista, muodostuva sähkökemiallinen pari, jonka välissä on nestemäinen tai hyytelömäinen elektrolyytti. Elektrolyytin tehtävänä on toimia elektrodilta toiselle vaeltavien sähköisesti varautuneiden ionien kulkutienä. Tulevaisuudessa saatetaan nähdä kuitenkin yleistyvissä määrin myös turvallisempia ja akun elinikää pidentäviä kiinteitä elektrolyyttimateriaaleja, mutta haasteena on löytää tarpeeksi hyvin ioneja läpäiseviä kiinteitä materiaaleja. [2]

Akun koteloinnin sisälle on usein sijoitettuna useampia yksittäisiä kennoja, jotka voivat olla niin rinnan- kuin sarjaankytkettyinäkin. Rinnankytkettäessä kaksi samanlaista kennoa saadaan kaksinkertainen kapasiteetti, mutta kennojen yli vaikuttava jännite on sama kuin yhden kennon tapauksessa. Sen sijaan sarjaankytkentä kaksinkertaistaa kennojen yli vaikuttavan jännitteen, mutta pitää niiden kapasiteetin eli virranantokyvyn samana. Tyyppillisesti akuille on kuitenkin asetettu rajoituksia sen suhteen, kuinka monta akkua voidaan kytkeä sarjan- tai rinnan, jotta niiden lataamisen balansointi pysyy hallittuna. Esimerkkinä mainittakoon Troijan Battery Company:n valmistamat energiavarastointiin kehitetyt lyijyakut, joissa valmistajan suositus on asetettu neljän akustosarjan rinnankytkennän kohdalle [3].

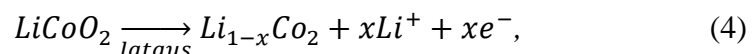
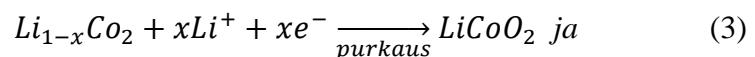
Kun tutkitaan akussa tapahtuvia kemiallisia reaktioita yksityiskohtaisemmin, havaitaan että ne tapahtuvat pääosin aivan elektrodien ja elektrolyytin välisessä rajapinnassa. Reak-

tiot ovat elektrodien muodostaman sähkökemiallisen parin pinnoilla tapahtuvia hapettumis- ja pelkistymisreaktioita, missä virtapiirin osaksi kytketyn varatun akun anodilla tapahtuu hapettumisreaktio katodimateriaalin pelkistyessä. Nyt hapettumisen yhteydessä vapautuu elektrodeja, jotka kulkevat ensin hyvin sähköä johtavaa elektrodia pitkin akun navalle ja siitä ulkoista virtapiiriä pitkin toiselle elektrodille eli katodille. Samalla anodilta katodille siirtyy elektrolyyttimateriaalin lävitse hapettumisreaktiossa vapautuneita ioneja ja akun varaustila laskee. Ladattaessa reaktiot tapahtuvat päin vastaisessa järjestyksessä ja akun jännitetaso nousee.

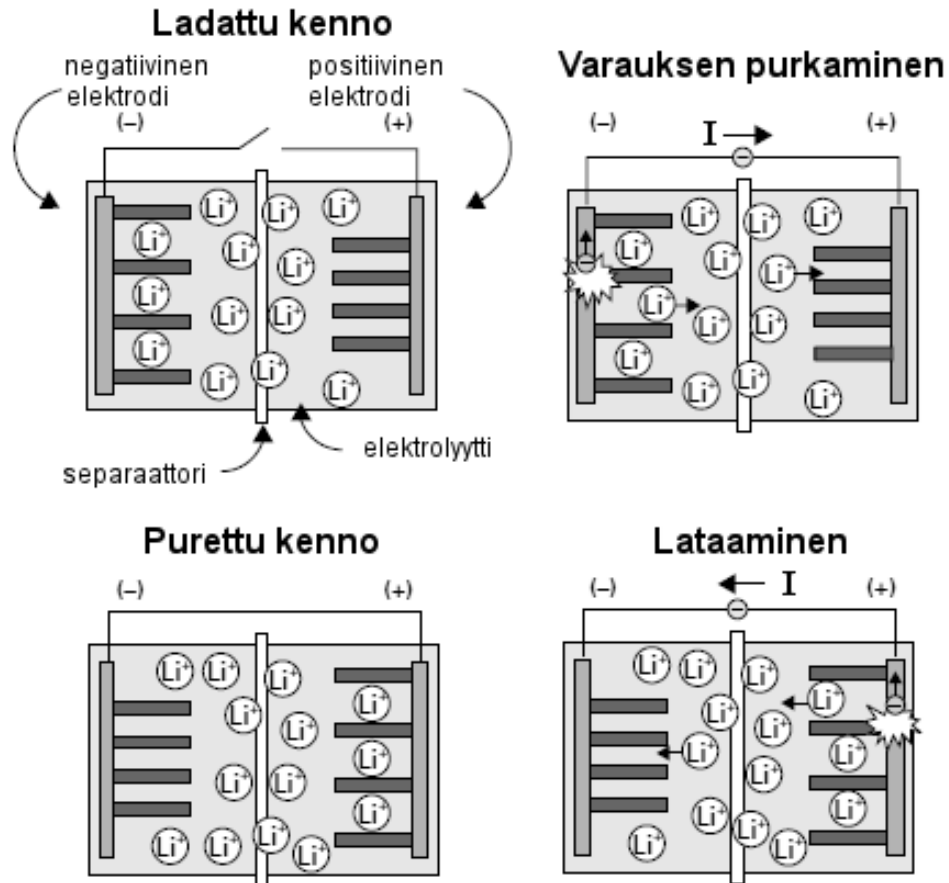
Esimerkiksi litiumioniakun tapauksessa voidaan elektrolyytinä käyttää litiumsuolalla saostettuja orgaanisia nesteitä, kuten litiumheksafluorofosfaattia ( $\text{LiPF}_6$ ). Ensimmäisen sukupolven litiumioniakkujen tapauksessa käytettiin katodimateriaalina kobolttioksidia ( $\text{LiCoO}_2$ ), kun taas yhä tänäkin päivänä käytetään lähes kaikkien kennotyyppien anodimateriaalina litioitua grafiittia ( $\text{LiC}_6$ ). Anodilla tapahtuvat kennoreaktiot voidaan nyt esittää muodossa [4]:



missä  $x$  edustaa reaktiokerrointa. Nyt havaitsemme grafiitista vapautuvan litium-ioneita sekä vapaita elektroneja, jotka matkaavat kennon toisella puolella sijaitsevalle katodille edellä esitetyllä tavalla. Katodilla puolestaan tapahtuvat reaktiot ovat [4]:



joista havaitaan litiumkobolttioksidin muodostuminen akkua purettaessa ja sen hajoaminen akkua ladattaessa. Kuvassa 2.1 on esitettyä vielä havainnekuva kyseisen akkutyyppin toiminnasta neljässä tarkastelutilanteessa, joita ovat akun lataaminen ja purkaminen sekä täyteen ladattu ja täysin purettu akkukkenno.



**Kuva 2.1** Litiumioniakun lataus-purkaussykli, missä separaattori tarkoittaa positiivisen ja negatiivisen elektrodin välistä huokoista eristelevyä, joka mahdollistaa ionien liikku-  
misen elektrodilta toiselle sekä akun elektrodien kytkemisen toisiinsa johtavan elektro-  
lyytin välityksellä ilman akun sisäistä oikosulkuu. Muokattu lähteestä [4, s. 179].

Eri käyttösovellukset asettavat akuille huomattavasti toisistaan eroavia vaatimuksia niin yksikkökustannusten kuin ominaisuuksienkin suhteen, joten käytännössä yhdellä tietyllä akkutyypillä ei voida luoda edellytyksiä kaikkiin akkuteollisuuden tarpeisiin. Tarvitaan siis materiaaleiltaan ja rakenteeltaan erilaisia akkutyyppejä, jotta jokaiseen käyttösovel-  
lukseen voidaan löytää toimiva ja kustannustehokas ratkaisu. Nämä eri akkutyypit eroa-  
vat toisistaan lähinnä käytettyjen elektrodi- ja elektrolyyttimateriaalien osalta, mikä puo-  
lestaan asettaa rajoitteita akkujen muotoilulle ja niiden teho- ja energiatihedelle sekä  
latautumis- ja varautumiskyvylle. Luvussa 2.2 tarkastellaankin teorialtasolla akkujen eri-  
laisia ominaispiirteitä ja niiden vaikutusta akkujen hyödyntämismahdollisuuksiin eri so-  
velluskohteissa.

## 2.2 Akkujen ominaisuudet

Tässä luvussa tarkastellaan muutamia yleisimmin käytettäviä ominaisarvoja, joiden  
kautta sekä erityyppisiä akkukemioita että eri valmistajien akkukennoja tai -paketteja voi-



daan vertailla keskenään. Luvussa tarkastellaan seuraavia akkujen ominaisuuksia: napajännitettä, energia- ja tehotiheyttä, kapasiteettia, varautumis- ja purkautumiskykyä sekä akkujen teoreettista elinikää ja ulkoisten tekijöiden vaikutusta akun elinkaareen.

### 2.2.1 Akun kenno- ja napajännite

Akun sisältämien yksittäisten kennojen jännite johdetaan akun koteloinnin ulkopuolelle ulottuviin akun napoihin ja näiden napojen välillä vallitsevaa potentiaaliero kutsutaan akun napajännitteeksi. Kuten edellä todettiin, voidaan yksittäisiä, saman jännitetason, kennoja sekä akkuja kytkeä sarjaan, jolloin akkupaketista saatava jännite on yhden kennon nimellisjännite kerrottuna sarjassa olevien kennojen lukumäärällä. Tämä yhdessä sen kanssa, että kennon nimellisjännite on riippuvainen käytetyistä materiaaleista eli toisin sanottuna akkutyypistä, auttaa useimmiten löytämään jokaiseen sovelluskohteeseen soveltuvan akkutyypin.

Tarkastellaan nyt hieman tarkemmin napajännitteen määräytymistä käytettyjen materiaalien funktiona, jotta voidaan ymmärtää paremmin syitä akkutyypien välisiin kennojännitteiden eroihin. Akun toiminta perustuu siis akkuun varastoituneen kemiallisen energian muuntamiseen sähköenergiaksi. Termodynamiikasta tunnetun Gibbs'n vapaan energian,  $\Delta G$  ( $\text{J mol}^{-1}$ ), lausekkeen avulla voidaan määrittää se osuus akun kemiallisesta energiasällöstä, joka on muutettavissa sähköenergiaksi [4]:

$$\Delta G = -nF_v E_{smv}, \quad (5)$$

missä  $n$  kuvaa yhtä moolia reaktanteja vastaan siirrettyjen elektronien määrää,  $F_v$  edustaa Faradayn vakiota ( $96,487 \text{ C mol}^{-1}$ ) ja  $E_{smv}$  sähkökemiallisen parin sähkömotorista voimaa. Mitä suuremman negatiivisen arvon lauseke antaa, sitä suuremmaksi voimme olettaa sähkökemiallisen reaktion tuottaman energian tulevan sekä olettaa reaktioiden tapahtuvan nopeammin [4, s. 58]. Akkuteollisuuden suurimpia haasteita onkin löytää sopiva kemiallinen pari, joka tuottaa riittävän voimakkaan sähkökemiallisen reaktion riittävän vakaasti ja turvallisesti myös materiaalien raaka-ainekustannukset huomioiden. Paras tapa tutkia potentiaalisesti yhteensopivia sähkökemiallisia pareja on listata eri materiaalien osalta kennon puolireaktioista saatavat potentiaalit negatiivisesta positiiviseen ja tämän jälkeen tutkia reaktioiden soveltuvuutta akkukäytössä. Esimerkiksi litiumin oksidoitumisreaktiosta [4],



näemme litiumatomin vapauttavan yhden elektronin ja tämän puolireaktion standardipotentiaaliksi ( $E^0$ ) on laskettu +3,04 voltia [4, s. 60]. Yhdistämällä kennojen molemmilla puolilla tapahtuvat puolireaktiot ja niistä lasketut standardipotentiaalit, saamme laskettua mille tahansa kennolle standardipotentiaalin, joka edustaa kennojännitettä standardiolosuhteissa. Yksinkertaistetusti tämän saa esitettyinä muodossa [4]:

$$V_{kenno} = E_{kenno} = E_k - E_a, \quad (7)$$

missä  $V_{kenno}$  edustaa kennojännitettä,  $E_k$  katodin potentiaalia ja  $E_a$  anodin potentiaalia.

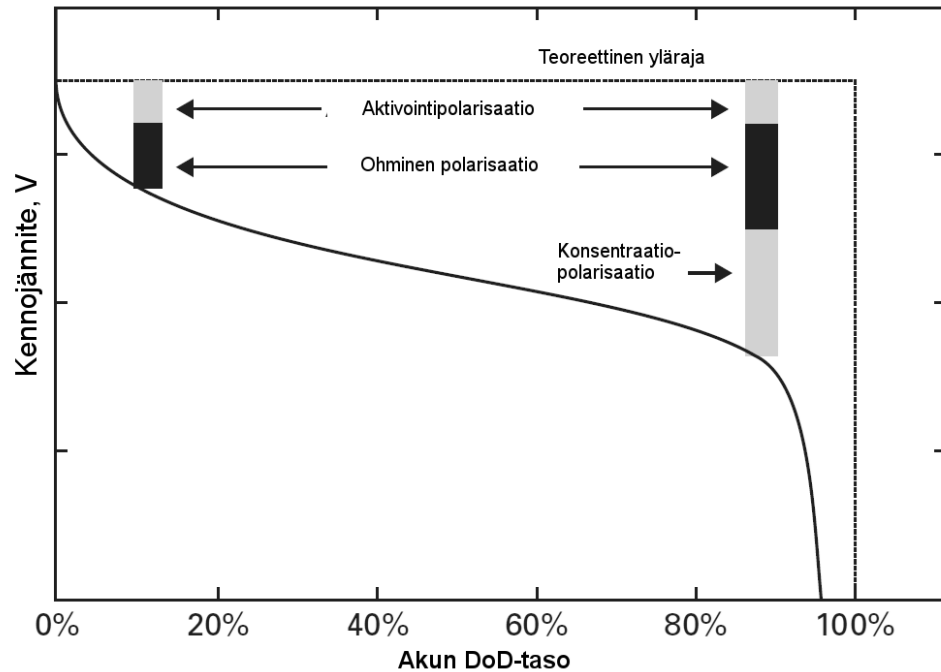
Akun kenno- ja napajännitteiden laskeminen kuormituksen seurauksena on kuitenkin tätä monimutkaisempi ilmiö, mitä lähdetään tarkastelemaan seuraavaksi. Käytännössä, kun akun terminaaleihin kytketään ulkoinen kuorma, jonka kautta akun varaustila alkaa vähitellen purkautua, laskee akun napajännite niin kutsutun polarisaatiojännitteen johdosta. Tämä havaitaan yhtälöstä:

$$V_{kenno} = E_{kenno} - E_p, \quad (8)$$

missä  $E_p$  kuvaa yllä mainittua polarisaatiojännitettä. Yksinkertaisimmin polarisaatiojännitteen muodostuminen voidaan kuvata jakamalla se osatermeihin:

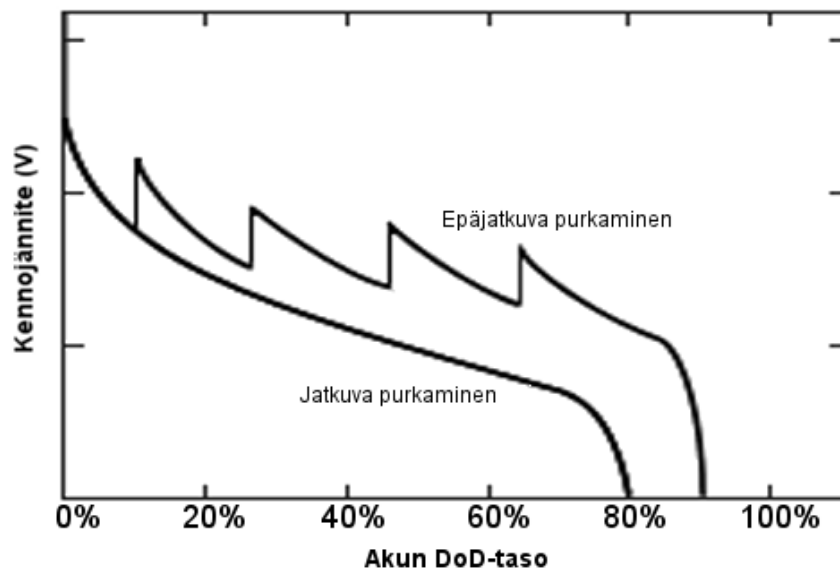
$$E_p = E_{ohm} + E_{akt} + E_{kon}, \quad (9)$$

missä  $E_{ohm}$  on ohminen polarisaatio,  $E_{akt}$  aktivointipolarisaatio ja  $E_{kon}$  konsentraatiopolarisaatio. Näistä tekijöistä ohminen polarisaatio on seurausta akun rakenteesta johtuvien sisäisten resistanssien luomasta vastuksesta, missä tapahtuva jännitehäviö on *Ohmin lain* mukaisesti sitä suurempi, mitä korkeampi on akun kuormitusvirta. Huomattavaa on, että akun elektrolyytti näyttelee huomattavan suurta osaa ohmisen polarisaation muodostumisessa, sillä myös elektrolyytissä kulkevien ionien kokema vastus lasketaan ohmiseen polarisaatioon. Koska akun sisäisessä vastuksessa kuluva hukkaenergia muuntuu suoraan lämpöenergiaksi, mikä voi johtaa akkujen vaaralliseen ylikuumentumiseen, pyritään akun sisäiset resistanssit saamaan huolellisella suunnittelulla, optimaalisella elektrolyyttimateriaalilla sekä laadukkaalla rakenteella minimoitua. Aktivointipolarisaatiolla kuvataan taas sitä energiaa, mikä vaaditaan akun elektrodireaktioiden käynnistämiseen ja ylläpitoon, mutta konsentraatiopolarisaatio on hieman vaikeaselitteisempi. Konsentraatiopolarisaation ymmärtämiseksi on syytä tarkastella uudelleen kuvaa 2.1, missä varauksen purkamisen yhteydessä anodilta katodille siirtyvät litiumionit liikkuvat elektrolyyttimateriaalin lävitse. Konsentraatiopolarisaatioissa on nyt kyse sekä elektrolyytin luomasta ionien massavirran vastuksesta että katodilla esiintyvistä reaktioesteistä. Tällöin kaikki katodille pyrkivät ionit eivät kykene saavuttamaan reaktioalustana toimivaa katodimateriaalin pintaa riittävän nopeasti, vaan ilmiön seurausta voidaan ajatella ikään kuin seinänä, mihin katodireaktioihin tarvittavat ionit törmäävät sitä enemmän, mitä nopeammin akkua puretaan. Kaikkiaan erityyppisten polarisaatiojännitteiden vaikutuksesta muodostuu akuille ominainen, niiden varauksen purkuastetta ilmaisevan DoD-tason kuvaaja kennojännitteen funktiona, mikä on esitettyä kuvassa 2.2. [4, s. 94-97]



**Kuva 2.2** Akun DoD-jännite -kuvaaja, mistä havaitaan polarisaation vaikutukset akun kennojännitteen, kun akkuun sitoutunutta varaus puretaan. Katkoviivalla merkitty teoreettinen yläraja kuvaa ideaalisen akun kennojännitettä, muokattu lähteestä [4, s. 97].

Kuvassa 2.2 esitetyistä polarisaatiosta johtuen akun kennojännite siis laskee yhtämittaisen purkamisen aikana, kunnes akku tyhjenee lopulta. Huomattavaa on kuitenkin, että mikäli akun purkaminen keskeytetään, elpyy akun kennojännite sen jäljellä olevasta varauksesta riippuen jonkin verran ylöspäin, mikä havaitaan tarkastelemalla kuvassa 2.3 esitetyjä tilanteita.



**Kuva 2.3** Jatkuvan ja epäjatkuvan purkamisen vaikutus akusta saatavaan kapasiteettiin. Litiumioniakkujen kennojännitteen havainnekuva, muokattu lähteestä [4, s. 99].

Eräs merkityksellinen, kuvasta 2.3 havaittava asia on myös se, kuinka epäjatkuvalle purkamisella saadaan lopulta enemmän kapasiteettia käyttöön. Tässä esimerkkitalanteessa on siis kuvattuna tilanne, missä akun yhtämittäisellä purkamisella akun kennojännite voi laskea akun uudelleen lataamista edellyttävälle tasolle jo 80 % DoD-tasolla, mutta toisaalta epäjatkuvalle käyttösyklillä tai hyvin maltillisella purkuvirralla voidaan tavoittaa jopa 90-100 % DoD-taso.

## 2.2.2 Akun energia- ja tehotehiys

Akkujen ominaispiirteistä toinen merkittävä tekijä napajännitteen ohella on sen energia- ja tehotehiys. Tehotehiyttä kuvataan yksiköllä W/kg ja energiatiheyden yksikkönä on Wh/kg tai Wh/l. Koska energiatiheys voidaan ilmaista molemmissa yksiköissä, on yksinkertaisempaa puhua akun ominaisenergiasta, joka ilmaistaan aina yksikössä Wh/kg.

Monista ilmaisutavoista johtuen on tärkeää tutkia akun soveltuvuutta käyttökohteeseen niissä yksiköissä, joka ovat sovelluksen kannalta merkittäviä, mutta tässä yhteydessä käydään kuitenkin läpi eri akkutyypin kaikki ominaisparametrit. Kyseisten painoyksikköä kohden ilmaistujen parametrien keskinäinen riippuvuus ja merkitys aukeakin parhaiten seuraavasta yhtälöstä [5],

$$\frac{Wh}{kg} = \frac{W}{kg} * h = \frac{A*V*h}{kg}, \quad (10)$$

missä  $h$  kuvaa kulunutta aikaa tunneissa,  $A$  akusta otettavaa virtaa ja  $V$  akun jännitettä, minkä johdosta mahdollisimman korkea purkuvirta ja/tai jännitetaso nostavat akun ominaisenergiaa. Tästä syystä erityisesti kannettavien laitteiden ja ajoneuvojen akustojen tuotekehityksessä pyritään löytämään elektrodi- ja elektrolyyttimateriaaleja, jotka mahdollistavat akun kuormittamisen käyttäen huomattavan korkeita purkuvirran arvoja.

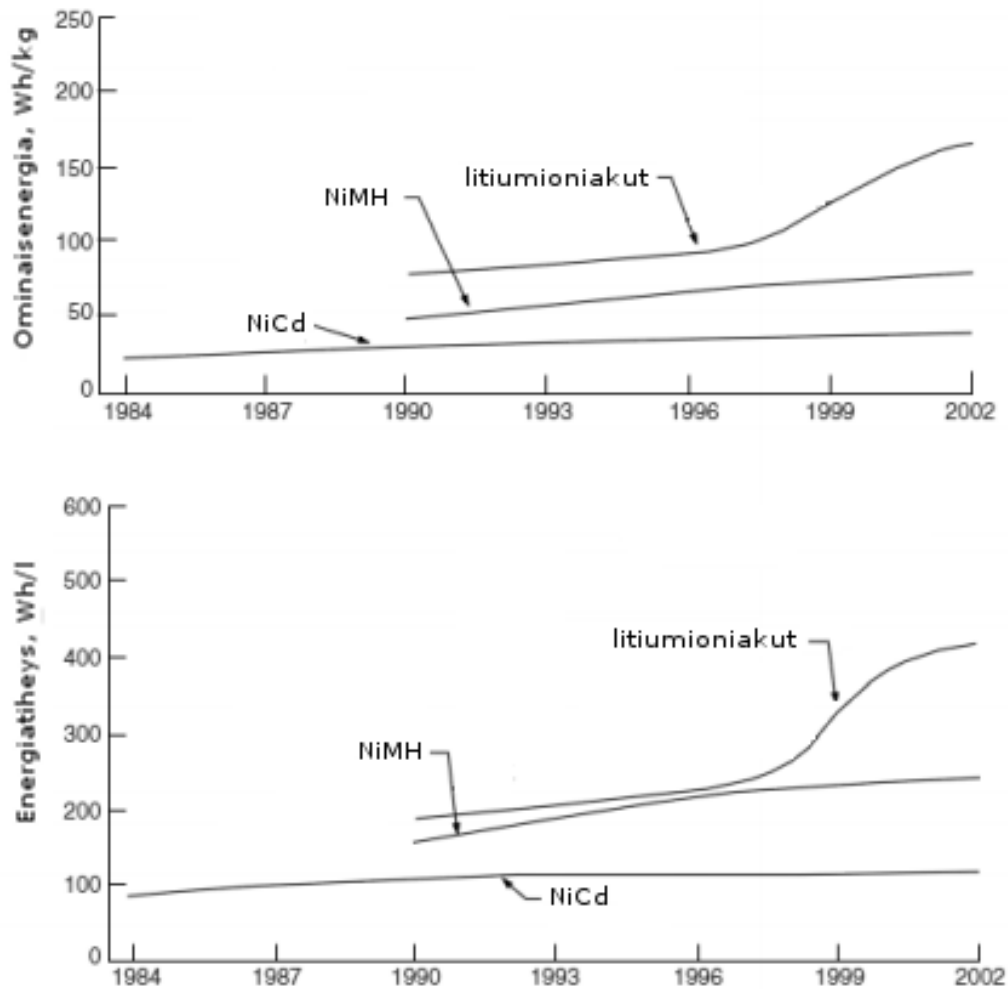
Taulukkoon 2.1 on listattuna yleisimpien akkutyypin energia- ja tehotehiydet, ominaisenergiat, nimellisjännitteet ja itsepurkautumisnopeudet, joista akkutyypin karkea vertailu käy suhteellisen helposti. Kyseisessä taulukossa esitetyt arvot ja niiden vaihteluvälit ovat lähdemateriaalissa ilmoitettuja arvioita, joihin vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi akun rakenne, nimelliskapasiteetti, kunto ja ikä, materiaalien laatu ja käyttöympäristön olosuhteet sekä akun kuormitustapa. Näin ollen kyseessä on vain suuntaa antava karakterisointi, minkä pohjalta ei vielä voida vielä tehdä lopullista arviointia Elematic Oyj:n sovelluskohteisiin soveltuvasta akkutyypistä.

**Taulukko 2.1.** Yleisimpien kaupallisten akkutyyppien välinen vertailu ominaisenergian, energia- ja tehotiheyden sekä nimellisjännitteen ja itsepurkautumisen osalta [4, s. 166-180]

Akku- tyyppi	Ominais- energia (Wh/kg)	Energiati- heys (Wh/l)	Tehotiheys (W/kg)	Nimellis- jännite (V)	Itsepurkau- tuminen (%/kk)
Lyijy- akku	10-44	50-111	100-120	2,0	2-6
NiCd	18-75	30-220	330-460	1,3	5-20
NiMH	23-92	32-332	500-800	1,2	15-25
Li-Ion	84-210	168-555	700-1 300	3,6-3,8	2-10

Eräs merkittävä tekijä, mikä tulee huomioida taulukon 2.1 tietojen tarkastelun yhteydessä, on se, että taulukossa mainitut tehotiheydet on laskettu lähdemateriaalissa pulssimuotoisen korkean purkuvirran arvoilla. Koska joidenkin akkukemioiden kohdalla nimellinen purkuvirta voidaan ylittää huomattavasti pidemmäksi aikaa kuin toisten (esim. 5s vs. 30s), ei tästäkään voida vielä tehdä kuin suuntaa antava arvioi tietyn tehotarpeen täyttämiseen vaadittavan akun painosta.

Koska monet akkukäyttöiset sovellukset koskevat joko liikutettavia laitteita tai liikenne-tekniologioita, on akuston paino yksi merkittävimmistä kriteereistä, minkä pohjalta akkutyyppien välistä valintaa suoritetaan. Lukuisat akkutekniikkaan liittyvät T&K -aktiviteetit pyrkivät tähtäämään akun ominaisenergian kasvattamiseen. Toinen merkittävä kriteeri on akun energiatiheys, sillä toisaalta monissa akkukäyttöisissä sovelluksissa on akuston kokoa pyrittävä pienentämään tilanpuutteen vuoksi, mutta sen sijaan mahdollisimman korkean tehotiheyden kehittäminen ei tämän diplomityön taustaselvityksen antamien näkemysten valossa esiinny niin korkean tason tavoitteena kuin mainittujen ominaisenergian ja energiatiheyden kasvattaminen. Toisaalta taulukosta 2.1 havaitaan, että lähtökohtaisesti akkuteknologiasta toiseen siirryttäessä, kasvavat sekä akuston ominaisenergia että sen energia- ja tehotiheys toisiinsa nähden melko lineaarisesti. Kuvassa 2.4 on vielä esitettyä NiCd-, NiMH- ja litiumioniakkujen ominaisenergian ja energiatiheyden kehityskäyrät 2000-luvun taitteeseen tultaessa.



**Kuva 2.4** NiCd-, NiMH- ja litiumioniakkujen energiatiheyden ja ominaisenergian kehitys vuosien 1984-2002 välisenä aikana, muokattu lähteestä [5, s. 567].

Vaikka kuvassa 2.4 akkujen energiatiheyden ja ominaisenergian kehitystä esittävät kaaviot ovatkin noin 15 vuotta vanhoja, kaaviot on hyvä esittää diplomityössä niiden selkeyden vuoksi. Ja kertoohan kuva kaiken oleellisen eli sen, kuinka nopeasti litiumioniakkujen kehitys lähti liikkeelle 2000-luvulle tultaessa sekä sen, kuinka NiCd- ja NiMH-akkujen kehitys on polkenut vuosikymmeniä lähes paikoillaan. Tämän diplomityön puitteissa tehdyn selvitystyön pohjalta voidaan allekirjoittaa lähes varauksetta kuvan 2.4 paikkansapitävyys vielä tänäkin päivänä, vaikka ensimmäisen sukupolven sähköautojen kehitys ja NiMH-akkujen valikoituminen niiden akkutyypiksi lisäsin mielenkiintoa kyseistä teknologiaa kohtaan. Tästä huolimatta ainoastaan litiumioniakustojen kehitys on jatkanut kasvuaan ja käytännössä kaikki 2020-luvun sähköautotkin käyttävät pelkästään litiumioniakkuja.

### 2.2.3 Akun kapasiteetti sekä varautumis- ja purkautumiskyky

Tarkastellaan nyt eri akkutyypin välisiä eroja niiden kapasiteetin sekä varautumis- ja purkautumiskykyjen välillä. Tässä yhteydessä tärkeää on ymmärtää akkuteorian taustalla olevat käsitteet, kuten Ah-, kWh- ja C-arvot, jotta eri akkuvalmistajien ilmoittamia nimellisarvoja voidaan vertailla keskenään. Määritetään seuraavaksi edellä mainitut käsitteet ja tehdään tämän jälkeen lyhyehkö vertailu eri akkukemioiden varautumis- ja purkautumiskykyjen välillä.

Akun kapasiteettia mitataan sen valmistajan ilmoittaman ampeerituntiarvon (Ah) tai kilowattituntien (kWh) mukaisesti, missä ampeeritunti kuvaa sitä virran arvoa, millä akun varaus tyhjentyisi laskennallisesti yhden tunnin aikana ja kilowattitunnilla tarkoitetaan puolestaan sitä ulkoiselle piirille syötettävän sähkötehon (kW) arvoa, mitä akun varaustila kykenee pitämään tunnin ajan yllä. Huomattavaa on, että akun ampeerituntimäärä on muunnettavissa kilowattitunneiksi kertomalla Ah-lukema akkukennon tai akuston jännitetasolla ja jakamalla saatu wattituntimäärä tuhannella.

Tässä yhteydessä sekä Ah- että kWh-arvojen laskemiseen käytetään oletusta, että akkua todellakin purettaisiin täydestä varauksesta täysin tyhjäksi vakiosuuruisella purkuvirralla tai -teholla, mikä ei ole mahdollista yhdenkään akkutyypin tapauksessa, ainakaan, jos akkua pyritään vielä tämän jälkeen lataamaan, joten kyse on vain laskennallisesta vakiosta. Yleensä yksittäisten akkukemiojen tai pienikokoisten akustojen kapasiteetti esitetään datalehdillä ja markkinointimateriaaleissa ampeeritunteina, kun taas suurempien energiavarojen akustojen kokoluokituksessa puhutaan lähes yksinomaan kilowattitunneista. Kapasiteettia voidaan kuitenkin kasvattaa kytkemällä useita akkukemioita rinnan, mitä tarkastellaan vielä tarkemmin lukujen 3 ja 6 yhteydessä.

C-arvo kuvaa puolestaan akun kapasiteetin purkamiseen käytettävää aikaa siten, että 1C tarkoittaa akun purkamista sen suuruisella virralla, jolla akun nimelliskapasiteetti purkaantuisi yhden tunnin aikana. Myös C-arvo on täysin laskennallinen, kuten Ah- ja kWh-arvojen tapauksessakin esitettiin. Käytännössä jokainen akkuvalmistaja ilmoittaa omille tuotteilleen nimellisen C-arvon, joka voi esittää myös jonkin suuruisia vaihteluvälisiä. Tämä kertoo suoraan sen, kuinka nopeasti akku voidaan purkaa ja ladata kuitenkin vahingoittamatta akkua pysyvästi. Huomattavaa on kuitenkin, että monille akuille on tämän lisäksi ilmoitettu valmistajan toimesta erikseen latauksen ja varauksen purkamisen osalta vielä erikseen suurin sallittu hetkellinen C-arvo ja tyypillisesti joidenkin sekuntien suuruisen aikaraja, millä kyseistä C-arvoa voidaan käyttää turvallisesti, mutta lähes kaikkien akkujen elinkaari lyhenee aina huomattavasti nimellistä C-arvoa korkeammilla purku- ja latausvirroilla.

Käytännössä akkuvalmistajat testaavat akkunsaa lataamisen ja purkamisen vähintään 0,5-1C virroilla, mutta erityisesti lyijyakkujen tapauksessa 1C arvoa lähestyvät purku- ja la-

tausvirrat heikentävät akun elinkaari-ikää merkittävästi. Tämän lisäksi akkujen käytettävissä oleva kapasiteetti laskee kuvan 2.2 mukaisesti sitä enemmän mitä suurempaa C-arvoa varauksen purkamisessa käytetään. Esimerkiksi alankomaalainen akkuvalmistaja Victor Energy ilmoittaa lyijyakkujensa datalehdellä [6], kuinka erityyppisten lyijyakkujen varauksen purkunopeus vaikuttaa akusta saatavaan kapasiteettiin sekä akun jännitetasoon. Datalehdhen esittämät tiedot ovat kuvattuna taulukossa 2.2.

***Taulukko 2.2.** Lyijyakkujen purkunopeuden vaikutus akusta saatavaan kapasiteettiin ja jäljelle jäävään jännitetasoon, kun akun nimellisjännite on 12 V<sub>DC</sub>. [6]*

Akun varauksen purkunopeus (C-arvo)	Käytettävä akkutyypin ja akusta saatava kapasiteetti (%:a nimellisestä)			Jäljelle jäävä akkujännite (V <sub>DC</sub> )
	AGM ”Deep Cycle”	Geeli ”Deep Cycle”	Geeli ”Long Life”	
0,05C	100	100	112	10,8
0,1C	92	87	100	10,8
0,2C	85	80	94	10,8
0,3C	78	73	79	10,8
1C	65	61	53	9,6
2C	55	51	45	9,6
4C	42	38	29	9,5

Litiumioniakut eroavat erityisesti taulukoissa 2.2 esitetyistä lyijyakuista siinä mielessä, että kun lyijyakkujen suositeltu nimellinen C-arvo on useimmiten luokkaa 0,05C, on se litiumioniakuilla käytännössä aina vähintään 0,5C. Verratessa esimerkiksi LFP -akkuja taulukossa 2.2 esitettyihin AGM- ja geeliakkuihin, säilyy niiden nimelliskapasiteetti käytössä vähintään 1C arvoon saakka, kun lyijyakuilla käytössä on enää noin 50-65 % niiden nimelliskapasiteetista. [7]

## 2.2.4 Teoreettinen elinikä ja ulkoisten tekijöiden vaikutus

Uudelleen ladattavien akkujen odotettua elinikää mitataan pääosin kahdella kriteerillä, jotka ovat aikaperustainen, yleensä noin 5-10 vuoden käyttöikä, sekä lataus-purkaussyklien määrä. Tämän diplomityön kirjoitusprosessin aikana, käytiin Tampereen teknillisellä yliopistolla 13.4.2016 asiantuntijakeskustelu yhdessä kolmen akkutekniikan tutkimuksen parissa työskentelevän yliopistotason tutkijan kanssa, mikä vahvisti odotuksia epälineaaristen akkujen vaikeasta ennustettavuudesta. Vaikka saman akkutyypin välillä voidaan nähdä suuriakin valmistajakohtaisia eroja, voidaan rasiutesteillä nähdä merkittäviä eroja myös samaan tuotantoerään kuuluvien kennojen sisällä. Tämä yhdistettynä lukuisiin erimittausapoihin johtaa siihen, että akkuvalmistajien ilmoittamiin elinkaariennusteisiin tulee suhtautua pienellä varauksella eikä mahdollisten simulointimallienkaan kautta tehtävät eliniän ennusteet ole muuta kuin suuntaa antavia ennusteita käytännön kuormituslanteiden moninaisista vaihteluista sekä käyttöympäristön sekä mittauspaikan eriävistä olosuhteista. [8]



Merkittävimmät syyt saman akkutyypin välillä esiintyville eroille hyödynnettävissä olevien lataus-purkaussykliä suhteen ovat akun lataamiseen ja purkamiseen käytetty C-arvo, ympäristön lämpötila sekä se, mihin DoD-arvoon saakka akkua puretaan latausvaiheiden välissä. Kyse on ennen kaikkea todennäköisyyslaskentaan kuuluvasta suureesta, joten etukäteen ei elinikää koskaan pystytä selvittämään täysin täsmällisesti. Taulukkoon 2.3 on pyritty koostamaan eri akkutyypin osalta lukuisista tieteellisistä julkaisuista ja kaupallisista markkinointimateriaaleista kerättyjä tietoja akun syklisen eliniän ennusteen suhteesta käytettävään DoD-tasoon nähden.

**Taulukko 2.3.** Yleisimpien akkutyypin syklisen eliniän ennusteen odotusarvo erilaisilla DoD-tasoilla [9-14].

Akku- tyyppi	Akuston syklisen eliniän ennuste käytettävän DoD-tason suhteen					
	10 %	30 %	50 %	70 %	80 %	100 %
AGM	3 000	1 500	800	300	250	-
DCLA	5 000	2 000	1 000	550	500	-
NiMH	>100 000	-	-	-	>1 000	>500
LFP	-	7 000	5 000	3 000	2 200	>1 000
LCO	-	10 000	6 500	3 500	3 000	>500
LMO	-	-	-	-	-	>500
LNCA	-	-	-	-	-	>500
LNMC	-	-	-	-	8 000	>500
LTO	>30 000	-	-	-	>10 000	>4 000

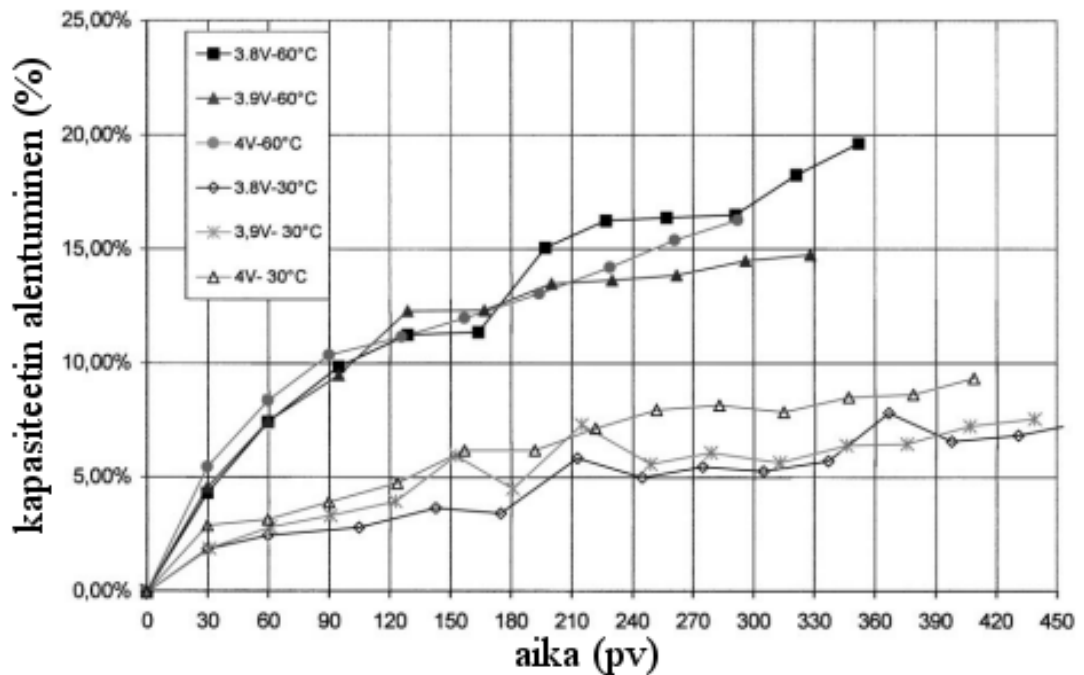
Taulukosta 2.3 voidaan havaita, kuinka merkittävästi käytettävä DoD-taso todellisuudessa vaikuttaa kaikkien akkutyypin sykliseen elinikään riippumatta siitä käytetäänkö lyijy-, NiMH- vai litiumioniakkuja. Edellä mainittujen syiden johdosta taulukon 2.3 tietoihin tulee kuitenkin suhtautua varauksella, sillä jo valmistajien ja tutkimuslaitosten väliset erot mittauksissa ovat merkittäviä. Taulukon pohjalta on kuitenkin tehtävissä muutamia johtopäätöksiä:

- Akun eliniän lasketaan päättyvän siinä vaiheessa, kun sen kapasiteetista on pysyvästi kadonnut joko 20 tai 30 prosenttia
- Testausympäristön lämpötila on vakio, 25 °C huoneenlämpö
- Akkujen elinkaarta testataan lähes poikkeuksetta 0,5C arvoilla
- LTO-kennojen testauksessa käytetään usein nestejäähdytystä
- NiMH ja Li-Ion -kennojen testeissä vakiintunut DoD-taso on 80 % ja syväpurkaustestien tapauksessa käytettävä DoD-taso on peräti 100 %

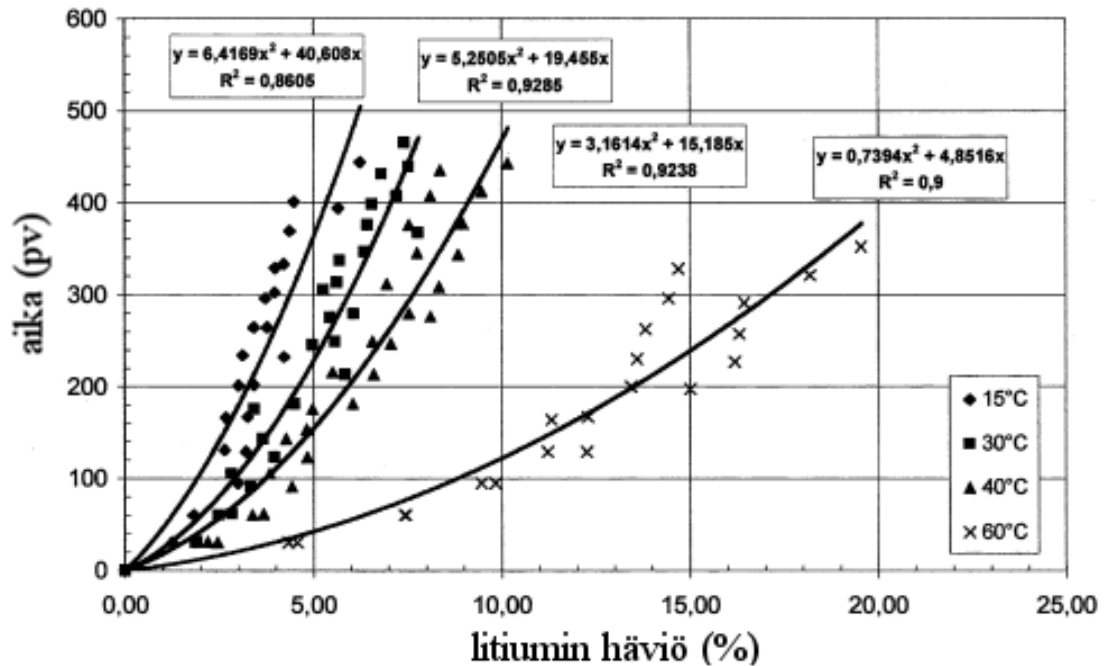
Taulukosta 2.3 havaitaan, että lyijyakkujen tapauksessa yli 1 000 syklin elinkaaren ei päästä yli 50 % DoD-tasoilla, minkä johdosta akuston nimelliskapasiteetti on ylimitoitettava huomattavan suureksi, jotta syklinen elinkaari olisi edes jollain tasolla kohtuullinen. Vaikka sama elinkaaren jatkamiseksi tehtävä kapasiteetin ylimitoittamisen tarve pätee

osittain myös litiumioniakkuihin, voidaan taulukosta 2.3 havaita kuitenkin, että esimerkiksi jo 80 % DoD-tasolla päästään käytännössä ainakin LFP- ja LNMC-kennojen tapauksessa useiden tuhansien syklien käyttöikään. Sen sijaan syklisen eliniän osalta erittäin houkuttelevalta vaikuttavien LTO-kennojen tapauksessa voidaan päästä jopa yli 10 000 syklin käyttöikään, vaikka akkua purettaisiin toistuvasti 80 % DoD-tasoon saakka.

Eräissä testissä [15] testattiin lisäksi korkeamman varastointilämpötilan ja varastointijännitteen merkitystä kennojen ikääntymiseen. Testattavana oli nimellisjännitteeltään 3,8 V särmiön muotoinen 5 Ah kapasiteetin litiumioni-kenno, jonka elektrodimateriaaleina toimivat  $\text{LiCoO}_2$  ja grafiitti. Kuvassa 2.6 on esitettyä kenno kapasiteetin laskeminen ajan suhteen kahdessa eri varastointilämpötilassa ja kolmella eri jännitetasolla, kun alentuvaa kapasiteettia tarkisteltiin kuukauden väliajoin. Toisessa tarkastelutilanteessa, jonka tulokset ovat esitettyä kuvassa 2.7, tutkittiin samaisen kenno litiummateriaalin katoaminen ajan suhteen, mikä on myös johdettavissa alentuvaan kapasiteettiin.



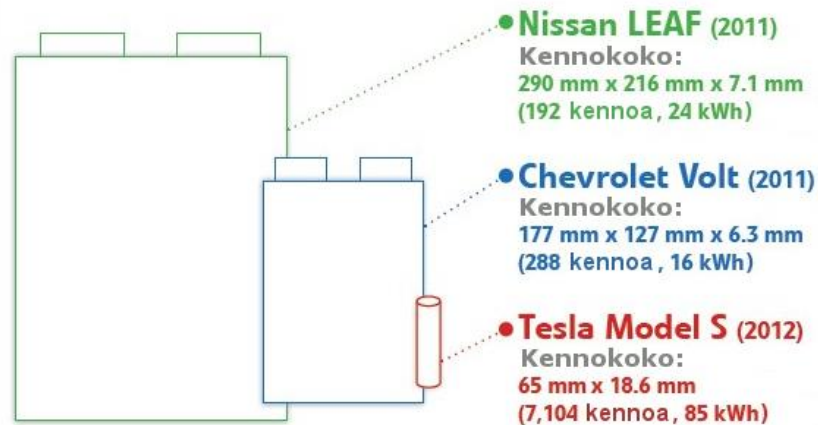
**Kuva 2.6** Varastointilämpötilan ja -jännitteen vaikutus LCO-kennon kapasiteettiin, muokattu lähteestä [15].



**Kuva 2.7:** Varastointilämpötilan vaikutus LCO-kennon litiumin häviämiseen, muokattu lähteestä [15].

Kuvista 2.6 ja 2.7 havaitaan, että varastointijännitteen vaikutus kapasiteetin alenemiseen on hyvin maltillinen, mutta taas 40 Celsius-asteesta 60 asteeseen nouseva lämpötila kiihdyttää kennossa tapahtuvia reaktioita jo niin paljon, että sekä litiumin katoaminen että itse kapasiteetin lasku on merkittävää. Huomattavaa on kuitenkin, ettei niiden Elematic Oyj:n valmistamien tuotantolaitosten, joissa akkutekniikan käyttöönotto on tarkoitus suorittaa, käyttölämpötila ylitä käytännössä +30 °C tasoa. Näin ollen voidaan todeta, että noin +30 °C käyttölämpötilan olosuhteet eivät ainakaan LCO-kennojen tapauksessa näytä olevan merkittävästi haitaksi akkujen eliniälle, mutta silti akuston suunnittelussa on hyvä tarkistaa, millainen lämpötilataso vallitsee varsinaisten työkoneiden yhteyteen tehtävän akkukaapin sisällä.

Käytännössä akkuvalmistajat ilmoittavat vain omat arvionsa, jotka pohjautuvat standardiolosuhteissa tehtyihin mittauksiin, mutta näiden pohjalta on erittäin vaikeaa tehdä päätelmiä eri akkuvaihtoehtojen eliniästä standardiolosuhteiden ulkopuolella. Vielä haastavampaa on ennustaa yksittäisten kennojen elinikää, joka erityisesti pienissä litiumionikenoissa on osoittautunut toisinaan hyvin vaihtelevaksi. Tämä on varmasti yksi niistä syistä, joiden vuoksi esimerkiksi luksusluokan autovalmistaja Tesla Motors on päättänyt käyttämään pieniä Panasonicin valmistamia NCA-tyypin litiumionikenoja omassa Model S automallissaan [16]. Tästä johtuen kyseinen akku sisältää jopa 7 104 kennoa, joten yksittäisten kennojen voittuessa ne ohitetaan, eikä suurta vaikutusta akuston suorituskykyyn näin ollen synny. Kuvassa 2.8 on vielä Tesla Model S:n, Chevrolet Voltin ja Nissan Leafin akustoissa käytettävien kennotyyppien keskinäinen kokoverailu.



*Kuva 2.8 Kennokokojen vertailua muutamien 2010-luvun sähköautojen osalta, muokattu lähteestä [17].*

Eri akkutyypin väliset eroavaisuudet aikaperustaisessa vanhenemisessa eivät kuitenkaan ole niin suuria kuin niiden syklisessä kestossa nähtävät erot. Näin ollen useimmissa käyttösovelluksissa joudutaan eri akkutyypin välisiä kustannuseroja pohtimaan syklisen keston kautta, mikäli akustot ovat päivittäisessä käytössä, jolloin syklinen elinikä tulee vastaan ennen kalenteri-ikä.

## 2.3 Akkutyypin esittely

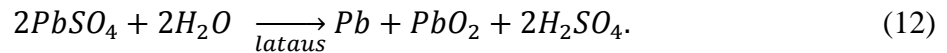
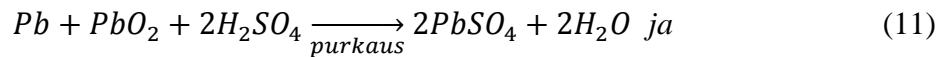
Tässä luvussa tarkastellaan pääpiirteittäin niin lyijy-, nikkelikadmium- ja nikkelimetallihydridi- kuin myös litiumioniakkujen rakennetta, materiaaleja, kennoreaktioita ja ominaispiirteitä sekä toimintaperiaatteita. Koska luvun 2.2 yhteydessä käytiin kattavasti läpi eri akkutyypin kohdalla ilmeneviä ominaispiirteitä, tuodaan tämän luvun yhteydessä esille vain akkutyypin ominaisuuksia tarkentavia seikkoja, jotka tukevat luvussa 2.2 esitettyjä eroavaisuuksia.

Huomattavaa on vielä luvussa 2.3.4 litiumioniakku -tekniikkaa kohtaan tehtävä syventävä tarkastelu, missä käydään läpi kaikkien yleisimpien litiumioniakkujen toimintaperusteita ja soveltuvuutta eri teho- ja energiatarpeisiin niin latauksen kuin kuormituksenkin osalta. Samalla täsmennetään eri litiumioniakkujen välisiä eroja, minkä pohjalta voidaan luvun 6 yhteydessä tehdä arviointia Elematic Oyj:n sovelluskohteisiin soveltuvan akkutyypin valinnasta.

### 2.3.1 Lyijyakut

Tämän akkutekniikkaa käsittelevän luvun johdannossa mainittu R. Plantén kehittämä akkutyypin oli juuri lyijyakku, jonka 150-vuotismarkkipäivää saatiin viettää vuonna 2009. Huolimatta uusien akkutekniikoiden tulosta markkinoille ja siitä, että lyijyakut ovat pysyneet perusrakenteeltaan melko muuttumattomina, ovat lyijyakut säilyttäneet markkinaosuutensa myös 2000-luvulla, sillä lyijyakkujen markkinaosuus oli yli puolet kaikista ladatavista akkutyypeistä vielä vuonna 2007. [4, s. 161]

Tavallisten lyijyakkujen rakenteessa olevat aktiiviset materiaalit ovat positiivisella elektrodilla lyijyoksidin ja negatiivisella elektrodilla metallinen lyijy, missä elektrodin pinta-ala pyritään saamaan mahdollisimman suureksi. Elektrolyyttinä käytetään puolestaan rikkihappoliuosta, mistä kennoreaktioiden yhteydessä vapautuvat sulfaatti-ionit ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) osallistuvat akun kennoreaktioihin muodostaen lyijysulfaattia ( $\text{PbSO}_4$ ). Lyijyakkujen kennoreaktiot ovat näin ollen esitettävissä muodossa:



Perinteisten nestemäistä elektrolyyttiä käyttävien lyijyakkujen rinnalla ovat kuitenkin yleistyneet huoltovapaat ja paremmin syväpurkausta kestävä kiinteää elektrolyyttimateriaalia käyttävät geeli- ja AGM-akut, joita tarkasteltiin jo taulukoiden 2.2 ja 2.3 yhteydessä. Nykyisin näiden osuus kiinteiden energiavarastojen lyijyakkustoista on jo yli 80 prosenttia johtuen suurelta osin huoltovapaudesta. Toinen tähän vaikuttava tekijä on se, että suljettujen lyijyakkujen tapauksessa yli 95 prosenttia latauksen aikana vapautuvasta vetykaasusta saadaan pidettyä akun sisällä, mikä tekee niistä käytännössä ainoan lyijyakkutyypin, joka soveltuu myös korkean jännitetaso-akkuvarastoissa käytettäväksi. [5, s. 571]

Yhtenä puheenaiheena on ollut viime aikoina EU:n esitys lyijyakkujen kieltämisestä ajoneuvojen käynnistysakkuina, mitä on perusteltu lyijyn kuulumisella raskasmetallien joukkoon. Asiasta on keskusteltu jo aiemmin vuonna 2010, jolloin autovalmistajat saivat puhuttua asialle viiden vuoden jatkoajan [18]. Vaikka tämän vuoden päätös toisikin artikkelissa [18] mainitun 5-8 vuoden jatkoajan, näyttäisi siltä, että lyijyakkujen kieltö astuu voimaan viimeistään 2020-luvulla. Tätä puoltaa jo vuonna 2014 Green Car Congress -julkaisussa esitetty litiumionitekniikkaa hyödyntävä käynnistysakku, jonka valmistajaksi esittäytyi maailman suurin litiumakkujen valmistaja japanilainen GS Yuasa -yhtiö [19].

Huomionarvoista onkin tällaisen kiellon vaikutus lyijyakkujen globaaliin hintakehitykseen erityisesti niiden sovellusten osalta, joissa lyijyakut mahdollisesti vielä tulevaisuudessa sallittaisiin. Näin ollen puhuttaessa lyijyakkujen globaaleista markkinoista ja tulevaisuuden hintakehityksestä, koskettaisi kyseinen kieltö sen laajuudesta riippuen mahdollisesti niin suurta markkinasegmenttiä, että tämän akkutyypin valmistusmäärät voisivat romahtaa merkittävästi nostamalla jäljelle jäävien akkujen hintatasoa merkittävästi.

### 2.3.2 Nikkelikadmiumakut

Nikkelikadmiumakut olivat pitkään suosiossa etenkin pienten kannettavien laitteiden akkuina, mutta sittemmin niiden korvaajaksi tulivat monin paikoin nikkelimetallihydridiakustot. Suurin syy nikkelikadmiumakkujen korvaamiseen NiMH-akuilla oli kadmiumin

liittäminen RoHS-direktiivin [20] pariin 1. heinäkuuta 2006, jolloin sen raja-arvoksi asetettiin 0,002 %. Tuolloin johdottomat sähkötyökalut saivat vapautuksen kadmiumin raja-arvosta, mutta tämäkin vapautus on voimassa enää 31.12.2016 saakka.

Nikkelikadmium akkujen ongelmana on tämän lisäksi myös niin sanottu muisti-ilmiö, joka voi johtaa helposti akuston vaurioitumiseen. Tällä termillä kuvataan akun kapasiteetin pysyvää alentumista tilanteessa, missä akkua puretaan ja ladataan jatkuvasti ilman, että sitä purettaisiin välillä täysin tyhjäksi. Näiden syiden pohjalta ei tätä akkutyyppeä tulla valitsemaan diplomityössä tarkasteltavaan sovellutukseen eikä sitä esitellä tässä työssä tämän tarkemmin, vaikka NiCd-akkujen ominaispiirteitä esiintyykin joissakin lähdemateriaaleissa otetuissa kuvaajissa.

### 2.3.3 Nikkelimetallihydriakut

Kiinnostus NiMH- eli nikkelimetallihydridiakkuja kohtaan lisääntyi merkittävästi 1990-luvulla, kun ilmastostrategisista syistä johtuen alettiin globaalisti tukemaan sähköautojen kehitystyön tutkimusta merkittävästi aikaisempia vuosikymmeniä kiivaammin. Tässä vaiheessa NiMH-akkuja oltiin kuitenkin jo käytetty useissa kannettavissa laitteissa NiCd-akkujen ohella. Koska 2000-luvun taitteessa sekä NiMH- että ensimmäistä litiumioniakkujen sukupolvea edustavilla LCO-akuilla päästiin noin 500 lataus-purkaussyklin elinkaareen, on ymmärrettävää, että silloisella yksikkökustannustasolla noin 2-3 kertaa litiumioniakkuja edullisemmat noin 1 500 \$/kWh maksaneet NiMH-akut valittiin juuri ensimmäisten kaupallisten sähköautojen hybridimallien akkutyypiksi. [5, s. 876-890]

Kuten taulukosta 2.1 havaittiin, on NiMH-akkujen itsepurkautuminen noin neljä kertaa litiumioniakkujen itsepurkautumista nopeampaa. Tämän lisäksi niiden syklinen elinkaari jää yhä tänäkin päivänä 80 % DoD-tasolla vain noin 600-1 200 syklin paikkeille, vaikka 10 % DoD-tasolla voitaisiinkin saavuttaa jopa yli 90 000 syklin käyttöikä [5, s. 902]. Teollisuusluokan NiMH-kennojen hintataso on vieläkin noin 700-1200 \$/kWh välillä [21], kun taas litiumioniakkujen massatuotannon hintataso alkaa pikkuhiljaa lähestyä 500 \$/kWh tasoa [22]. Korkeaa DoD-tasoa käyttävissä rasiustesteissä nähtävä NiMH-akkujen kapasiteetin eksponentiaalinen laskeminen on syynä siihen, että siirryttäessä hybridisähköautojen kehityksestä kohti täyssähköautojen kehitystaivalta, vaihtui myös käytettävä akkutyyppe nikkelimetallihydridistä litiumioniakkuihin. Tästä johdosta NiMH-akut soveltuvat varsin huonosti myös liikkuvien työkonien akkutyypiksi, ellei voida varmistua siitä, ettei akkua tulla purkamaan täysin tyhjäksi.

### 2.3.4 Litiumioniakut

Litiumioniakkujen kehitys alkoi vuonna 1991 LCO-akkujen tullessa markkinoille ensimmäisenä kaupallisena litiumioniakkutyypinä. Kyseinen akkutyyppe pitää yllä yhä tänäkin päivänä asemaansa lukuisten pienikokoisten kannettavien laitteiden akkutyypinä. Akkuteknologioiden kehityksen keskiössä on ominaisenergian kasvattamisen ohella ollut

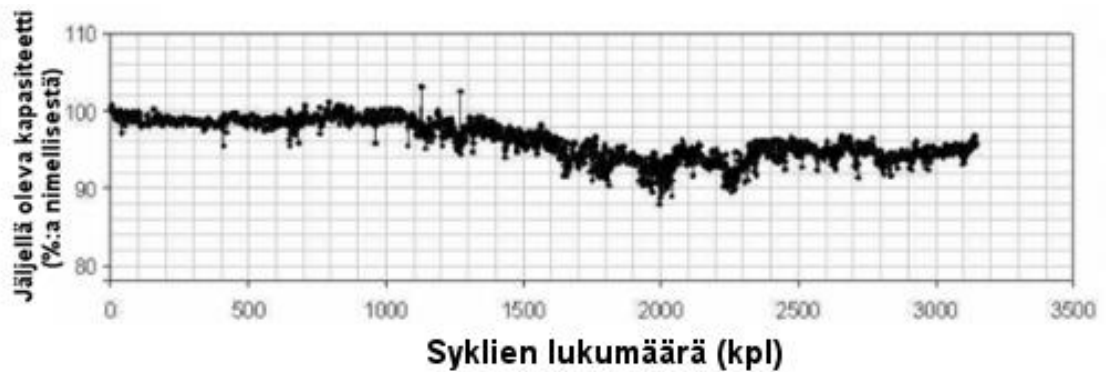
kuitenkin mahdollisimman korkean syklisen eliniän tavoittelu, mikä on erityisen oleellinen kriteeri kehitettäessä pienikokoisia, korkeaa DoD-tasoa käyttäviä, sähköautojen akkupaketteja. Kehitystyö onkin tuottanut LCO:n rinnalle useita vaihtoehtoisia anodimateriaaleja, jotka käytännössä määrittelevät akkutyypin nimityksen, mutta litonoitu grafiitti on silti pitänyt pintansa vakiintuneena katodimateriaalina. Poikkeuksen tekee LTO-ke- mian akkutyypin, missä LMO-tyypin akuston grafiitti on korvattuna litiumtitanaatilla [14].

Taulukossa 2.4 on esitettyä käytännössä kaikkien tämän diplomityön kirjoitushetkellä löytyvien kaupallisten litiumioniakkujen kehitysvuodet, nimellisjännitteet, ominaisenergiat sekä karkeat arviot kyseisten akkutyypin nimellisistä lataus- ja purkuvirroista C-arvoilla ilmaistuna.

*Taulukko 2.4. Litiumioniakkutyypin vertailu ominaisarvojen perusteella [23].*

<b>Akkutyypin ja -kemian</b>	<b>Kaupallistumisajankohta</b>	<b>Nimellisjännite (V)</b>	<b>Ominaisenergia (Wh/kg)</b>	<b>Nimellinen latausvirta (C-arvo)</b>	<b>Nimellinen purkuvirta (C-arvo)</b>
LCO (LiCoO <sub>2</sub> )	1991	3,6	150-200	0,7-1C	1C
LMO (LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	1996	3,7	100-150	0,7-3C	1-10C
LFP (LiFePO <sub>4</sub> )	1996	3,2-3,3	90-120	1C	1-25C
LNCA (LiNiCoAlO <sub>2</sub> )	1999	3,6	200-260	0,7C	1C
LNMC (LiNiMnCoO <sub>2</sub> )	2008	3,6-3,7	150-220	0,7-1C	1-2C
LTO (Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )	2008	2,4	70-80	1-5C	10C

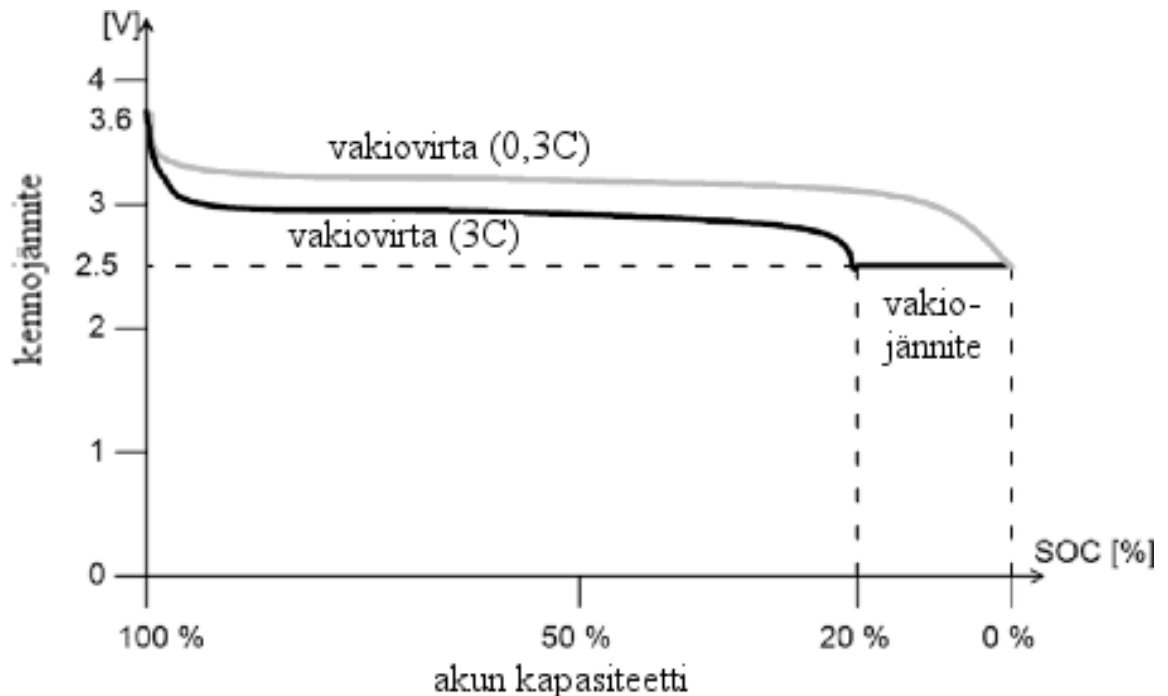
Taulukosta 2.4 havaitaan jo luvun 2.4 yhteydessä mainittujen LTO-kennojen ylivoimainen suoriutuminen korkean lataus- ja purkausvirran sovelluksissa, mutta myös LFP-kennoilla voidaan päästä yhtä korkeisiin purkuvirtoihin, vaikkei asia ole yhtä ilmeinen kuin LTO:n tapauksessa. LTO-kennojen korkeaa virranantokykyä voidaan selittää niiden edistyksellisellä rakenteella, missä anodimateriaalina käytetyn litiumtitanaattioksidin nanomittakaavan kiderakenne mahdollistaa akkukennon pinta-alan kasvattamisen. Tällöin voidaan päästä jopa 100 m<sup>2</sup> kennoalaan grammaa kohden, mikä on yli 30-kertainen perinteiseen LCO-kennoon nähden [24]. Tämä puolestaan mahdollistaa pienemmät polarisaatiohäviöt ja korkean syklisen käyttöiän, joiden vaikutuksia akun toimintaan tarkasteltiin luvun 2.2.1 yhteydessä. Kuvassa 2.9 on esitettyä LTO-kennojen rasiustesti 5C purkuvirralla.



**Kuva 2.9** LTO-kennojen kapasiteetin aleneminen syklisessä rasitustestissä, missä käytettiin 1C latausvirtaa ja 5C purkuvirtaa, muokattu lähteestä [24].

Kuvasta 2.9 havaitaan, kuinka edes 5C purkuvirralla ei LTO-kennojen tapauksessa havaita merkittävää kapasiteetin alenemista, sillä 1 000 sykliin saakka säilyy kapasiteetti täysin nimellisessään ja vielä 3 000 syklin kohdalla on noin 95 % kapasiteetista tallella.

Toinen, kaikille litiumioniakuille yleinen piirre on siinä, että niiden käytettävissä oleva kapasiteetti säilyy yksittäisen purkusyklin aina vähintään 80 prosentissa, vaikka akkua purettaisiinkin kohtalaisen suurella C-arvolla. Tämän lisäksi akkuun jäljelle jäävä 20 prosentin kapasiteetti on purettavissa pienemmällä virralla, mutta vakiosuuruisella kuormitusvirralla, mikä havaitaan kuvista 2.10 ja 2.11.



**Kuva 2.10** Litiumioniakun SoC-kennojännite -kuvaaja, missä akkua puretaan ensin vakiovirralla ja tämän jälkeen vakiojännitteellä, muokattu lähteestä [25].

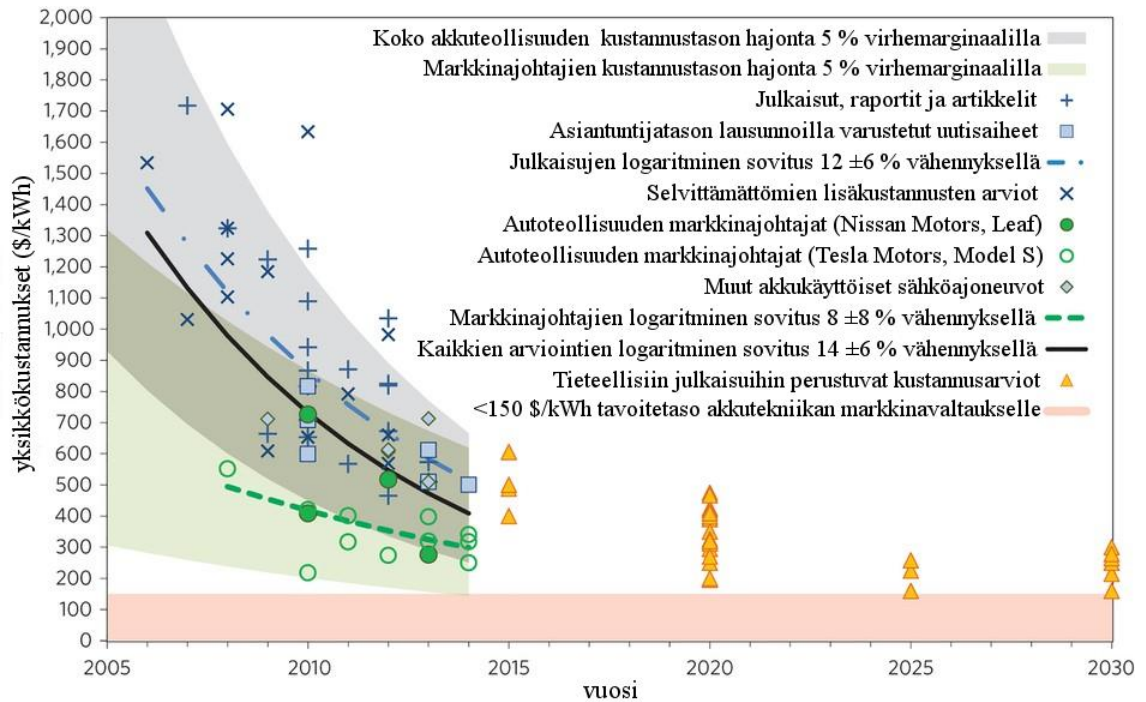




Yksi tärkeä huomio, mikä kuvasta 2.12 voidaan tehdä, on litiumioniakkujen vaatimus vakiosuuruiseen latausjännitteeseen ja siten latausvirran eksponentiaaliseen pienentämiseen noin 90 % SoC-tason jälkeen. Tästä johtuen 1C latausvirralla ei saavuteta kapasiteetin täyteen lataamista tunnissa, vaan lataukseen kuluu kokonaisuudessaan aikaa noin kolme tuntia. Myös tämä asia puoltaa sitä, että litiumioniakuston käyttöaste tulisi pitää noin 15...90 % SoC-tasolla, jolloin nimellisellä 1C latausvirralla saadaan tarvittava kapasiteetti ladataksi yhden tunnin aikana.

## 2.4 Akkujen hintakehitys ja uudet akkutyypit

Seuraavien vuosikymmenten aikana, eli 2020- ja 2030-lukujen taitteessa, odotetaan niin akkutekniikoiden kehittymisen myötä huomasti kasvaa energiatiheyttä kuin myös esimerkiksi sähköajoneuvojen yleistymisen myötä akkuteollisuudelle kohdistuvia kysyntäpaineita, joiden voidaan olettaa vaikuttavan akkujen hintaan laskevasti. Kyseisestä aiheesta TTY:n tutkimushenkilökunnan kanssa käydyin keskustelun [8] pohjalta voidaan todeta, että lähes kaikki tällä vuosikymmenellä tehdyt innovaatiot ja tutkimukset ovat koskettaneet juurikin litiumioniakkuja. Oikeastaan litiumionitekniikoiden noususuhdanne alkoi jo 1990-luvun loppupuoliskolla, mikä nähtiin kuvassa 2.4 nähtävistä ominaisenergian ja energiatiheyden kehittymistä esittävästä kuvaajista. Akkujen yksikköhinnittelussa (kustannukset/kWh) nähtävä laskusuhdanne voidaan puolestaan havaita tarkastelemalla kuvassa 2.13 esitettyä kaaviota, mistä on nähtävissä selvästi odotettavissa oleva kustannusten madaltuminen erityisesti vuosien 2020-2030 aikavälille tultaessa. Yksi huomionarvoinen asia on kuitenkin siinä, että vaikka jatkuva kiinnostus litiumionitekniikkaa kohtaan lisääkin valmistusmääriä sekä tuotekehitystä huomattavasti ja saa näin madallettua teknologioiden valmistuskustannuksia, voi lisääntyvä mielenkiinto myös johtaa kysynnän nousemiseen mahdollisia tuotantomääriä korkeammaksi. Tällöin pelkona on, että akkujen hinnoittelua lähdetään nostamaan, mutta tämän ennustaminen on tässä vaiheessa pelkkää spekulatiota ja todennäköisesti vain hetkellisesti nähtävissä.



**Kuva 2.13** Akkujen yksikköhinnan kehitystrendi ja tulevaisuuden ennuste, muokattu lähteestä [22].

Nykyisessä T&K -toiminnassa näkyy nykyisten akkutekniikoiden kehittämisen lisäksi koko joukko uusista elektrodimateriaaleista kehitettäviä akkutekniikoita, joilla pyritään vastaamaan teollisuuden tarpeisiin. Pääasiallisina vaatimuksina uusille akkutekniikoille on kehittää mahdollisimman turvallinen, huoltovapaa, pitkäikäinen ja korkean energiatiheyden sekä ominaisenergian omaava akku, joka kestäisi samalla suuria purku- ja latausvirtoja.

Pääosa kehitystyöstä suuntautuu tällä hetkellä sähköautopuolen hankkeisiin, sisältäen ajoneuvotekniikan ohella myös latausasemien standardisoinnin ja latausinfrastruktuurin kehittämisen. Tätä kehitystä voidaan pitää hyödyllisenä myös tämän tutkimuksen osaluueille, sillä uusien akkutekniikoiden kehityksen sekä lisääntyvän kysynnän myötä pystytään jokaiselle teollisuuden alalle tarjoamaan kustannustehokkaasti erityyppisiä akkuratekaisuja. Kehittyvät akkujärjestelmät tulevat myös osaltaan edesauttamaan seuraavien vuosikymmenten aikana älykkäiden sähköverkkojen eli *smart grid* -järjestelmien yleistymistä yhdessä hajautetun ja uusiutuvan energiantuotannon kanssa.

## 3 AKKUKÄYTTÖJEN OHEISLAITTEET

Tässä diplomityössä myötä tehtävät suunnitelmat kahden tuotantokoneen muuntamisesta akkukäyttöisiksi eivät suinkaan rajoitu vain akkutyypin valintaan ja sen ympärillä tapahtuvaan teknis-taloudelliseen tarkasteluun, vaan laadittavaa akkujärjestelmää on ajateltava yhtenä suurena kokonaisuutena, jossa niin mekaanisen kuin sähkötekniikan suunnittelun myötä myös erityyppiset laitetekniset osa-alueet sitoutuvat yhteen. Selkeintä on siis puhua akkujärjestelmästä, jossa rinnan ja sarjaan kytkettyjä akkuja käsitellään akkupaketina tai akustona ja näiden yhteyteen liitettäviä laitekokonaisuuksia kuvataan akkujärjestelmän oheislaitteina.

Tässä luvussa käsitellään akkujärjestelmän keskeisimpiin osa-alueisiin kuuluvia oheislaitteita, kuten vaihto- ja tasasuuntaajia, sekä akuston latauksen balansointiin ja sen kunnonvalvontaan käytettäviä järjestelmiä. Yhtenä osa-alueena tässä kappaleessa käsitellään myös sähkömoottoreita, jotka ovat oleellinen tekijä sovelluskohteiden akkukäyttöjen tarkastelussa. Tästä viimeksi mainitusta järjestelmästä käytetään useimmiten termiä BMS (eng. Battery Management System) tai vaihtoehtoisesti BMU (eng. Battery Management Unit), joista ensimmäinen on kuitenkin valittu tässä diplomityössä käytettäväksi termiksi.

### 3.1 Sähkömoottorit

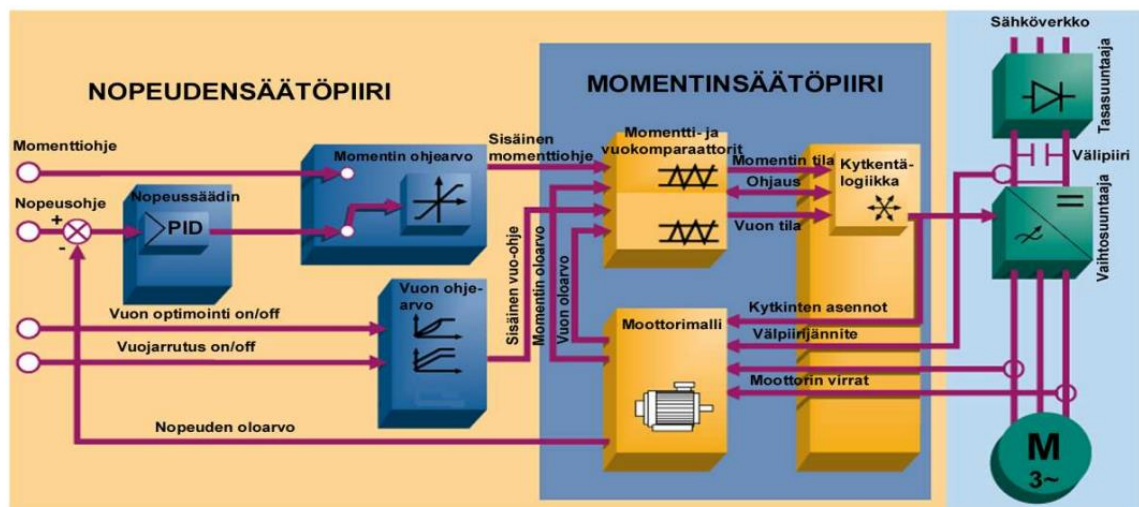
Sähkökoneet luokitellaan kahteen yläkategoriaan, tasasähköä käyttäviin DC-koneisiin sekä vaihtosähköä käyttäviin AC-koneisiin, vaikka useimmissa nykyaikaisissa koneissa käytetään eri toimintoihin sekä vaihto- että tasavirtaa ja näiden muunnokset hoidetaan erillisten vaihto- ja tasasuuntaajien avulla.

Ensimmäiset laajasti käytetyt ja kaupallistuneet sähkömoottorit olivat harjallisia DC-moottoreita ja niiden suosion taustalla olivat niin aikanaan sähkönsiirtoon yleisesti käytetty tasasähköverkko sekä yksinkertaisesti se, ettei teknisesti edistyneempiä ratkaisuita ollut saatavilla tai ne olivat vielä kaupallisesti kannattamattomia. Myöhemmin vaihtosähköä on käytetty sähkösiirrossa erittäin laaja-alaisesti ja vaihtosähkön suosio on näkynyt myös moottoreiden valinnoissa, joista suosituimmaksi on noussut nykyisin erittäin edullinen ja huoltovapaa induktiomoottori.

Puhuttaessa tämän päivän sähköjärjestelmien moottorikäytöistä, lienee oletettavissa, etteivät harjalliset DC-moottorit täytä useinkaan vaadittuja kriteereitä, etenkin ajoneuvoikäytössä. Syyt löytyvät tämän moottorityypin useista heikkouksista, kuten tiheistä huoltoväleistä, suuresta koosta suhteessa moottorin teholuokkaan sekä matalasta hyötysuhteesta. Sen sijaan sähköajoneuvoissa potentiaalisiksi moottorivaihtoehdoiksi ovat nousseet niin perinteiset induktiomoottorit, harjattomat tasavirtamoottorit kuin kestopäät-

timoottoritkin [28, s. 54-55]. Tasavirtamoottoreiden osittainen paluu tapahtuikin tuulivoiman yleistymisen kautta, kun helposti hajoavien vaihdelaatikoiden tilalle haluttiin löytää generaattoriratkaisu, joka ei vaatisi vaikeasti huollettavaa ja kallista vaihteistoa. Tällöin yhdeksi vaihtoehdoksi tulikin kallis, mutta luotettava kestopagneettigeneraattori. Nykyään tehdään myös paljon tieteellistä tutkimusta korkeajännitteisen tasasähköverkon parissa, jonka hyödyt näkyvät niin pitkien välimatkojen siirtoyhteisissä, kuin myös älykkään ja hajautetun sähköverkon luomisessa [29], minkä lisäksi yleistyvät sähköajoneuvot luovat potentiaalia tasavirtalaitteiden kehitykselle. Näiden seikkojen vaikutuksia tulevaisuuden moottoritekniikoihin on osin vaikeaa ennustaa, mutta havaittavissa on selkeää kiinnostusta sekä myös osittaista potentiaalia niin DC-moottoreiden käytössä, vaikka edullisen ja toimintavarmen oikosulkumoottorin korvaajaksi siitä ei vielä nykyisellään ole.

Vaihtovirtamoottorikäyttöjen ohjaaminen on selvästi yksinkertaisempaa kuin tasavirtamoottorikäyttöjen. Esimerkkinä mainittakoon ABB:n kehitelemä DTC (Direct Torque Control) -teknologia, joka tarjoaa oikosulkumoottorikäyttöille vuovektorisäädön ilman takaisinkytkentää. Siinä säätöyksikköön ohjelmoidun moottoriteorian avulla lasketaan moottorin pyörittämän akselin momentti ilman modulaatiota, takometriä, saati moottorin akselin nopeutta tai asentoa mittaavaa asentoanturia ja sen takaisinkytkentää, jolloin moottorin säätösuureiksi jäävät sen magneettivuo sekä momentti. Kyseessä on siis jo nimensä mukaisesti suora momenttisäätö, missä moottorin käämivuon säädön kautta pysytään säätämänä suoraan moottorin momenttia. Mittaussuureina ovat kuitenkin aina vähintään moottorin kahden vaiheen virrat sekä välipiirin tasajännite. Suoran momenttisäädön ansiosta voidaan järjestelmässä hyödyntää pitkälle kehittyneitä moottorimalleja yhdessä nopeiden signaalikäsitteilylaitteiden kanssa, jolloin DTC-käyttöillä voidaan toteuttaa jopa kymmenen kertaa nopeampi momenttivaste kuin perinteisillä vaihtovirta- tai tasamoottorikäyttöillä. Järjestelmän kytkentöjen lohkoakaavio on esitettyä kuvassa 3.1. [30, 31]



*Kuva 3.1 ABB:n DTC -ohjausjärjestelmän lohkoakaavio [30, s. 26].*

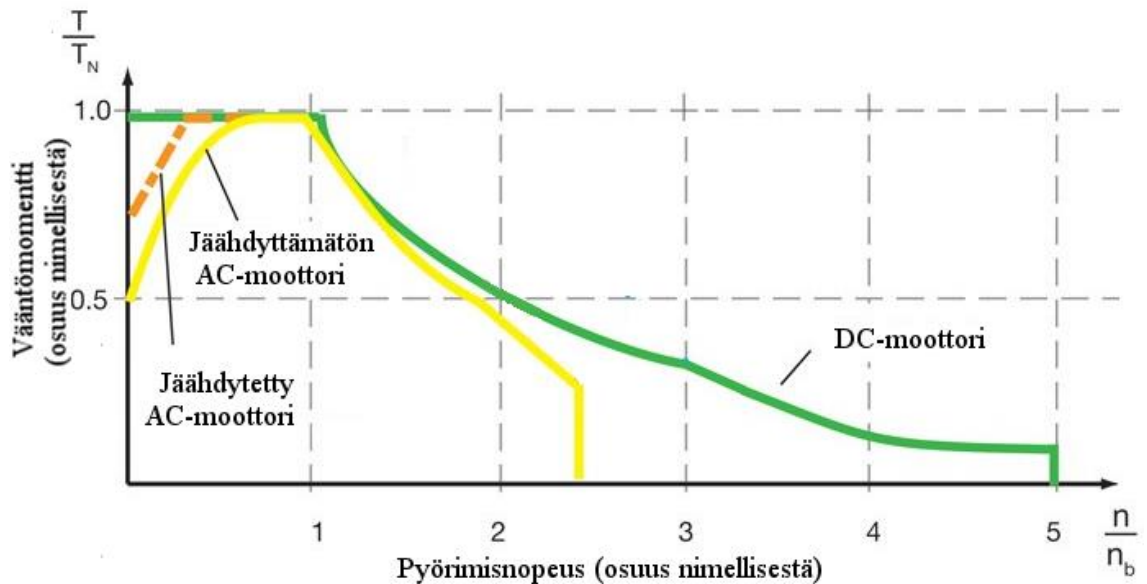
Tästä aiheesta käyty keskustelu TTY:n sähkömoottorikäyttöjä koskevasta kurssista vastuussa olevan Jenni Rekolan kanssa [32] antoi uutta tietämystä AC-moottorin korvaamisesta DC-moottorilla. Rekolan mukaan järjestelmästä saadaan näin huomattavasti yksinkertaisempi, kun invertterin sijasta voidaan käyttää pelkästään boost-hakkuria eli käytännössä DC/DC-boosteria moottorin ohjaamiseen. Ongelmaksi muodostuukin soveltuvan DC/DC -hakkurin löytäminen kustannustehokkaasti, mutta näiden kustannustasoon syvennyttään tarkemmin luvun 3.3 yhteydessä.

Samalla oltiin yhteydessä myös Leroy-Somersin valmistamia LSK-tasavirtamoottorikäyttöjä toimittavan SKS Group Oy:n myyntiosastoon [33], jotta harjallisten LSK:n moottorikäyttöjen huolto-ohjelma saatiin selvitettyä. Tätä kautta saatiin yhteys SKS:n teknisestä myynnistä vastaavaan Timo Laitiseen, joka kertoi kyseisten moottorikäyttöjen hiiliharjojen huoltovälin olevan käyttöön otosta 200 tuntia ja tästä eteenpäin 500 tunnin välein, mikä tarkoittaa esimerkiksi 8 h/pv ja 5pv/vko käytöllä noin 3 kuukauden huoltoväliä, mikä asettaa rajoitteita myös Elematic Oyj:n sovelluskohteissa. Kyseisten LSK:n harjallisten DC-moottoreiden mallivariaatiot on kategorisoitu niiden tehoalueen ja pyörimisnopeuden mukaan liitteessä 1. Näistä soveltuvien moottorikäyttö Elematic Oyj:n sovelluskohteisiin vaikuttaisi olevan LSK 1124, jonka mallivariaatioiden tehoalue ulottuu 3,5-20 kW välille ja pyörimisnopeus puolestaan välille 570-3 690 rpm [34]. Valitettavasti Laitinen ei osannut kertoa vielä tässä vaiheessa moottorille hintaa tuntematta tarkkoja vaatimuksia. Datalehdeltä huomataan kyseisen moottorikäytön 3,5 kW malliluokalle ilmoitetuksi maksimiväännöksi 59 Nm [34, s. 87].

Yhtenä huomiona oli Jenni Rekolan mukaan se, että DC-moottoreiden hyötysuhde on kuitenkin huonompi kuin oikosulkumoottoreiden, noin 80-90 prosenttia verrattuna 95 prosenttiin, mutta eroa tasoittaa DC/DC-hakkurin invertteriä parempi hyötysuhde [32]. Näin ollen ero moottorikäyttöjen välillä jää hyvin pieneksi ja vaikka tarkat hyötysuhteet voitaisiinkin laskea moottoreiden datalehdiltä jokaista käytettävää kierrosaluetta vastaavasti, ei tämän diplomityön puitteissa moottorikäyttöjä tarkastella niin syvällisellä tasolla. Nykyisellään useissa Elematic Oyj:n laitteissa käytetään kuitenkin oikosulkumoottoreiden ohella myös hydraulikkamoottoreita, joiden huonona puolena on vielä DC-moottoreidenkin hyötysuhteita heikommalla hyötysuhteella. Vaikka hydraulikkalaitteiston hyötysuhteen tarkempi selvittäminen tehdäänkin luvun 4 yhteydessä, mainittakoon myös tässä yhteydessä, että hydraulikkamoottorin hyötysuhde liikkuu 75 prosentin paikkeilla, joten kyseisille moottorikäyttöille pyritään 4 luvun yhteydessä löytämään paremmin akkutekniikan kanssa yhteensopiva ratkaisu.

Koska Elematic Oyj:n sovelluskohteissa pääosa moottorikäytöistä lukeutuu raskaiden ja hidashiikkeisten työkoneiden ajomoottoreiksi, edellytetään moottorilta koneen liikkeelle lähdössä suurta vääntömomenttia. Tästä syystä seuraavaksi tarkastellaan AC- ja DC-moottoreiden eroja erityisesti hitaiden pyörimisnopeuksien momenttien osalta. Kuvassa 3.2 on hahmoteltu näiden moottorikäyttöjen vääntömomentin suhdetta moottorin nimelliseen vääntömomenttiin eri kierrosalueilla, mistä havaitaan, että nimelliskierrosalueella

saavutetaan sekä AC- että DC-moottoreilla kyseisten moottorikäyttöjen nimellinen vääntömomentti.



**Kuva 3.2** Ilmajäähdytteisen ja jäähdyttämättömän oikosulkumoottorin vääntömomentti suhteessa tasavirtamoottorista saatavaan vääntömomenttiin moottorin kierrosalueen ja nimellisen kierrosalueen suhteen funktiona, muokattu lähteestä [35].

Vaikka tämän diplomityön kirjoitusprosessin aikana ei lähdemateriaalista selvinnytkään Elematic Oyj:n nykyisten moottorikäyttöjen edellyttämää vääntömomenttia, on kuvan 3.2 perusteella selvää, että tasavirtamoottorikäyttöjen vääntömomentti tulee riittämään myös pienillä kierrosalueilla, mikäli niiden nimellinen vääntömomentti on edes likimain saman suuruinen kuin käytettyjen oikosulkumoottoreiden tapauksessa. Tarkastellaan seuraavaksi matalan jännitetasen harjattomien tasavirtamoottoreiden (BLDC) vääntömomentteja matalan jännitetasen tapauksessa. Tätä varten on taulukkoon 3.1 kerätty tietoa kinaalaisen Golden Motor Technology Co Ltd.-yhtiön 258 dollarin hintaisten, servotyypisten BLDC-moottoreiden datalehdiltä [36, 37] kerättyjen vääntömomenttien suhteesta pyörimisnopeuteen sekä kyseisellä kierrosalueella saatavasta hyötysuhteesta. Esimerkiksi on otettu sekä 48 V<sub>DC</sub>, että 72 V<sub>DC</sub> jännitetasen 3 kW moottorikäytöt, joista ensimmäisen nimellinen pyörimisnopeus on 4 000 rpm ja toisen 3 800 rpm.

**Taulukko 3.1.** Matalan jännitetasen harjattomien tasavirtamoottoreiden vääntömomenttien tarkastelu valmistajan mittausten pohjalta. Taulukossa vasen sarake kuvaa 48 V moottorin ja oikea sarake taas 72 V moottorin mittauspisteitä [36, 37].

Jännite (V)	48		72	
Pyörimisnopeus (1/min)	M (Nm)	$\eta$ (%)	M (Nm)	$\eta$ (%)
1 508 / 1 630	20,8	73,7	25,1	83,4
2 167 / 2 285	16,8	85,4	21,0	88,2
2 632 / 2 813	14,0	85,1	17,6	90,2
3 170 / 3 202	12,2	90,0	15,4	90,2
3 914 / 3 908	10,0	90,5	6,9	88,7
4 119 / 4 108	7,3	92,0	3,6	80,6
4 308 / 4 288	4,0	87,8	0,6	39,9

Taulukosta 3.1 havaitaan nyt, kuinka matalan jännitetasen tasavirtaisilla servomoottoreilla saadaan huomattavasti korkeampi vääntömomentti matalilla kierrosaluilla, kuin mitä moottorin nimellisellä pyörimisalueella pystytään tuottamaan. Huomattavaa on myös, että paras, noin 90 prosentin hyötysuhde saavutetaan kuitenkin nimelliskierrosluvun tietämällä, kun taas moottorille testatun alhaisimman kierrosalueen kohdalla saavutettava hyötysuhde jää heikoksi, noin 75-85 % tasolle.

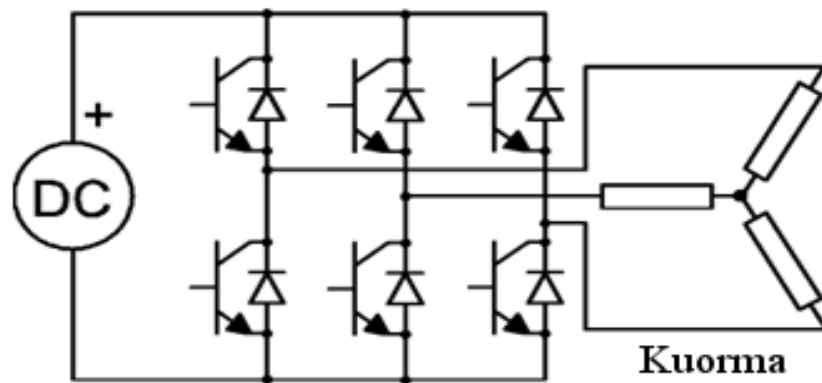
Tässä kohtaa voitaisiin tarkistella myös kestopagneettimoottorikäyttöjä, joita on viime vuosina käytetty paljon lisääntyvien tuulivoimaloiden yhteydessä, mutta niiden korkeasta kustannustasosta johtuen, on niiden tarkastelu jätetty pois tämän diplomityön yhteydestä. Kaikista todennäköisimmin Elematic Oyj:n sovelluskohteiden akkukäyttöisten työkonoiden prototyyppien yhteydessä pysytään oikosulkumoottoreissa siltä osin kuin niitä on tähänkin saakka käytetty, mutta selvitystyötä tasavirtamoottorikäyttöjen eteen tullaan kuitenkin jatkamaan. On kuitenkin todettava, että tasavirtamoottorikäyttöjä kohtaan ilmennyt kiinnostus vaikuttaisi olevan jatkuvasti kasvussa. Tästä esimerkkinä on ABB:n DC-moottorikäyttöjen erikoisosajaan, DI Bob Simonin helmikuussa 2010 julkaisema lehtiartikkeli tasavirtamoottorikäyttöjen nykytilasta, minkä yhteydessä Simon totesi [35]:

*“Tänä päivänä DC-moottoreita käytäviä sovelluskohteita on selvästi vähemmän kuin aikoinaan. Kuitenkin niiden ominaisuudet, kuten korkea teho-  
tiheys, matala hitausmomentti ja AC-moottoreita korkeammat pyörimisnopeudet, ovat tehneet DC-moottoreista jälleen useiden konevalmistajien suosiman moottorityypin.”*



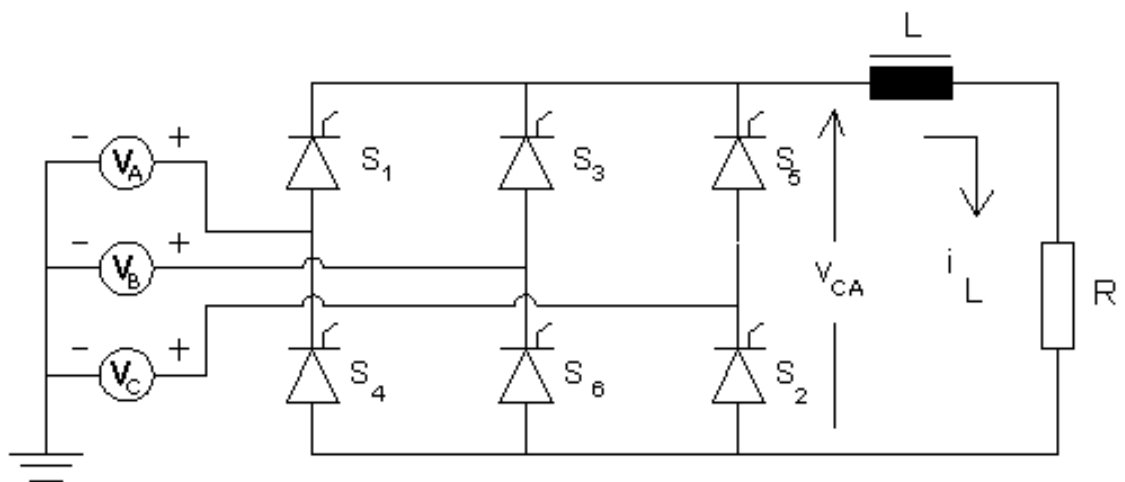
### 3.2 Tasa- ja vaihtosuuntaajat

Kuten luvussa 3.1 esitettiin, ovat tämän päivän moottorikäytöt hyvin pitkälti AC-moottoreita, joita ei voida suoraan syöttää tasavirtaa tarjoavilla akuilla. Tarvitaan vaihtosuuntaajia, joilla tasajännite saadaan muunnettua vaihtojännitteeksi. Vaihtosuuntaajat luokitellaan 1- ja 3-vaiheisiin sen mukaan, tahdotaanko ulostulojännitteestä 1- vai 3-vaiheista. Koska tämän diplomityön tarkastelun kohteena olevien laitteiden moottorikäytöt ovat kaikki 3-vaiheisia suurehkoja oikosulkumoottoreita, tarkastellaan tässä luvussa lähinnä 3-vaiheisia vaihtosuuntaajia. Kuvassa 3.3 on esitettynä tyypillinen IGBT-transistoreista koottu tasasuuntaaja, mihin kuorma on kytketty tähtikytkennällä.



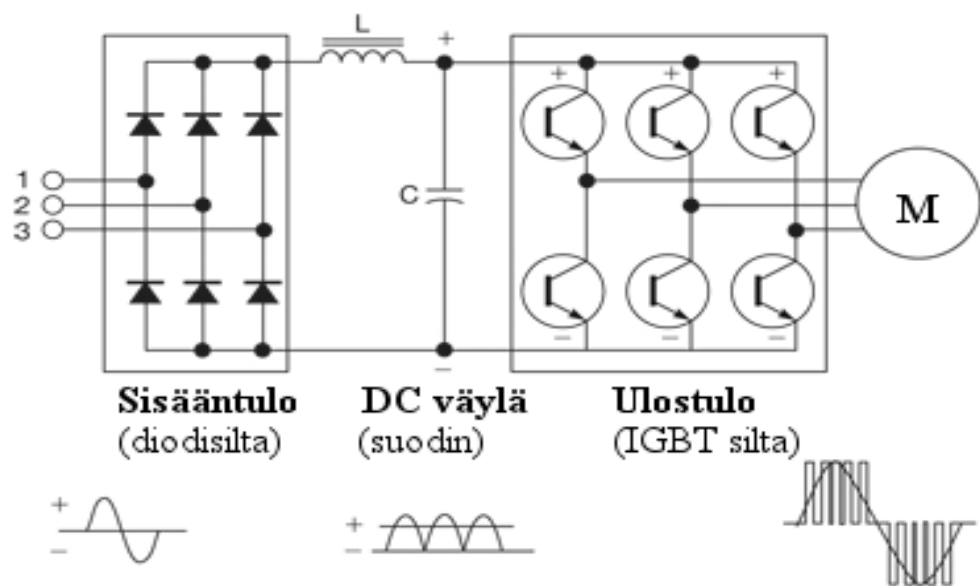
*Kuva 3.3 IGBT-ohjattu vaihtosuuntaajasilta komponentteineen, muokattu lähteestä [38].*

Tasasuuntaaja toimii täysin vastaavalla, mutta käänteisellä periaatteella vaihtosuuntaajaan nähden. Sen tehtävänä on nimensä mukaisesti muuntaa vaihtojännite tasavirtaa käyttävän kuorman syöttöön käytettäväksi tasajännitteeksi. Luonnollisesti myös yksivaiheisia tasasuuntaajia löytyy markkinoilta, mutta tässä yhteydessä esitellään vain kuvassa 3.4 näkyvä 3-vaiheinen, tyristoriohjattu tasasuuntauspiiri.



*Kuva 3.4 Tyristoriohjattu tasasuuntauspiiri, muokattu lähteestä [39].*

AC-moottoreiden ohjauksessa käytetään tyypillisesti kuvan 3.5 mukaista taajuusmuuttajaa, millä sisääntulon sinimuotoinen ja 50 Hz taajuinen vaihtojännite ensin tasasuunnataan diodisillalla, minkä jälkeen sen välipiiriin asetetut suotimet tasaavat muunnetusta jännitteestä epätoivottuja komponentteja, kuten yliaaltoja. Tämän jälkeen ulostulopiiriin transistoreista (esim. IGBT) koottu vaihtosuuntaussilta muuntaa tasajännitteen jälleen moottorikäyttöä syöttäväksi vaihtojännitteeksi, joten taajuusmuuttaja sisältää jo itsessään sekä tasa- että vaihtosuuntaamiseen käytetyt komponentit. Koska IGBT-transistorit ovat ohjattavissa, pystytään ulostulojännitteen taajuutta säätämään, mitä käytetään hyödyksi moottorin ohjauksessa. Taajuusmuuttajien valikoimasta löytyy sekä virta- että jännitevälipiirillisiä malleja, mutta näistä virtavälipiirillinen on yleisimmin käytössä vain nopeakäyntisten tahtimoottoreiden ohjauksessa [40, s. 39], joten tässä luvussa keskitytään vain jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin, jollainen on esitettyä kuvassa 3.5.



**Kuva 3.5** Taajuusmuuttajan piirikaavio ja jännitteen aaltomuodot, muokattu lähteestä [41].

Kuten luvun 3.1 yhteydessä todettiin, ohjataan lähes kaikkia nykypäivän oikosulkumoottorikäyttöjä kuvan 3.5 mukaisella taajuusmuuttajalla. Sama ohjausperiaate on käytössä myös Elematic Oyj:n työkoneneiden oikosulkumoottoreiden ohjauksessa. Tässä ohjaustavassa jokainen moottori vaatii kuitenkin käytännössä aina oman taajuusmuuttajansa, koska mikäli yhdellä taajuusmuuttajalla yritettäisiin syöttää useampaa moottoria, kohdattaisiin muutamia ongelmia. Ensinnäkin moottoreiden yhteenlasketun tehon sekä kuormitusvirtojen summien tulisi pysyä taajuusmuuttajan nimellistehon ja -virran alapuolella. Tämän johdosta soveltuvan taajuusmuuttajan löytäminen hankaloituu, kun moottorikäyttöjen yhdistäminen nostaa taajuusmuuttajalle asetettuja vaatimuksia, mutta on silti mitoitettavissa useimpien moottorikäyttöjen osalta. Toisena tekijänä on moottorikohtaisen ohjauksen puuttuminen, sillä ohjattaessa useita moottorikäyttöjä vain yhdellä taajuusmuuttajalla, joudutaan ohjauksessa tyytymään skalaariohjaukseen. Skalaariohjauksessa moottoreille syötetään vain taajuuden mukaan määriteltä jännitettä, jolloin moottoreiden

kuormituksien ja pyörimisnopeuksien säätö vaikeutuu [42, s. 28]. Monimoottorikäytöissä skalaariohjaus voi kuitenkin olla sovelluskohteesta riippuen täysin toimiva ratkaisu ja sitä käytetään myös useissa Elematic Oyj:n työkoneissa.

Yhtenä lähtökohtana tämän diplomityön tarkastelun kohteena olleiden laitteiden toteutukselle, on ollut syöttää akuston tasajännite suoraan DC-väylän välipiiriin. Näin akkutekniikan sovittamiseen vaadittavista komponenteista voidaan jättää yksi, heti akuston jälkeen tuleva, vaihtosuuntaaja pois ja järjestelmästä saadaan sekä yksinkertaisempi että kustannustasoltaan alhaisempi. Tasasuunnatun DC-väylän jännite noudattelee ideaalissa tilanteessa kaavaa 13 [40, s. 41]:

$$U_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \approx 1,35V_{LL}, \quad (13)$$

missä  $V_{LL}$  on taajuusmuuttajaa syöttävän sähköverkon pääjännite. Käytännössä suuntaajan tuottama tasajännite on kuitenkin alhaisempi, mikä johtuu suuntaussillan diodien joltavaan tilaan siirtymistä kuvaavasta kommutointikulmasta ( $\mu$ , *eng. overlap angle*), mikä saadaan laskettua yhtälöstä 3.2 [40, s.41]:

$$\cos \mu = 1 - \frac{2\omega L_s I_d}{\sqrt{2}V_{LL}}, \quad (14)$$

missä  $\omega$  on syöttävän verkon kulmataajuus,  $2L_s$  on kommutointipiirin induktanssi ja  $I_d$  suuntaajan tasavirta. Näin ollen tasasuuntauspiirissä tapahtuvasta virran kulkureitin vaihtumisesta diodilta toiselle käytetään nimitystä kommutointi ja mikäli tasasuuntauspiiri olisi toteutettu diodien sijaan ohjattavilla tyristorilla, vaikuttaisi myös tyristorien ohjauskulma ( $\alpha$ , *eng. delay angle*) välipiirissä ilmenevän tasajännitteen suuruuteen.

Myös jarrutusenergian talteenoton mahdollisuudet kannattaa ottaa huomioon suunniteltaessa järjestelmiä, joissa yhdistetään akkutekniikka liikkuviin laitteisiin. Esimerkiksi hidastettaessa liikkuvaa massaa saadaan tähän kuuluva jarrutusenergia laskettua kyseisen liikkuvan esineen omaavan kineettisen energian muutoksesta  $\Delta E_{kin}$  ja vastaavasti laskuliikkeessä syntyvä jarrutusenergia saadaan kappaleen potentiaalienergioiden erotuksesta  $\Delta E_{pot}$ . Tämän diplomityön sovelluskohteina olevissa laitteissa tarvittava etenemisliikkeen hidastaminen tehdään normaalitilanteissa aina laitteen nimellisuudesta pysähdyksiin saakka ja kappaleiden pystysuuntainen liike vastaavasti aina koko liikeradan mukaisesti, jolloin jarrutusenergiat saadaan kaavoista 15-16:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{ja} \quad (15)$$

$$E_{pot} = mgh, \quad (16)$$

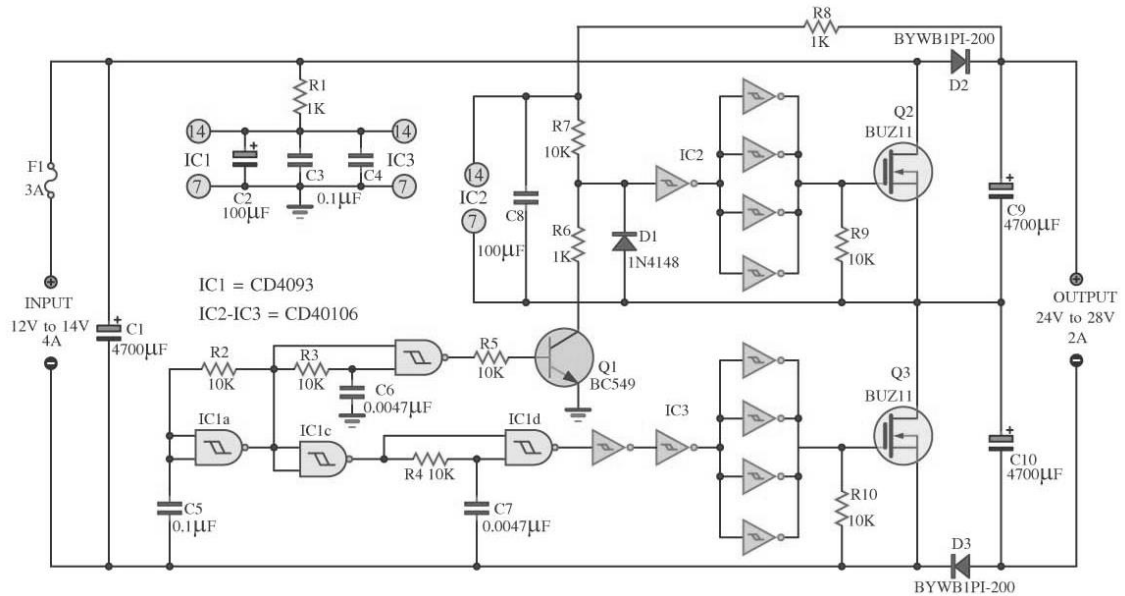
missä  $m$  on hidastettavan tai laskettavan kappaleen massa,  $v$  on hidastettavan kappaleen alkunopeus,  $g$  on gravitaatiokiihtyvyyys ja  $h$  puolestaan edustaa sitä korkeutta, mistä kappale lasketaan nolatasoon.

Esimerkiksi sähköisissä nosturikäytöissä joudutaan kuorman laskemisessa vapautuva energia kuluttamaan erillisessä jarruvastuksessa, joka on yleensä kytketty välipiirin kondensaattorin rinnalle. Tällöin välipiiriin generoituva jännite johdetaan jarruvastukselle, joka lämpenee kuluttaen samalla välipiiriin syötettävää sähköenergiaa. Suurissa nosturikäytöissä vapautuva energia on kuitenkin niin suuri, että taajuusmuuttajaan integroitu jarruvastus joudutaan usein korvaamaan jopa ulkoisella jarruvastuksella tai vaihtoehtoisesti käyttämällä tasasuuntauspiirin tilalla vaihtosuuntauspiirin tavoin aktiivisista komponenteista koottua verkkosuuntaussiltaa, jolloin tehoa voidaan syöttää myös takaisin verkkoon päin. [26]

Koska tämän diplomityön tutkimuksen kohteena oleviin käyttösovelluksiin suunnitellaan kuitenkin akustoa syöttämään sähkömoottoreita, ei jarruvastusta tai aktiivista tasasuuntauspiiriä tarvita, vaan mahdollisesti talteen otettava energia voidaan syöttää suoraan taajuusmuuttajan välipiiriin kautta takaisin akuille. Tämän lisäksi ainoa kohde, missä laskuliikkeen potentiaalienergiaa olisi edes teoriatasolla mahdollista ottaa talteen, ovat luvun 4 yhteydessä tarkemmin kuvattavat poikkisiirtopalkit, joita käytetään Elematic Oyj:n valmistamien tehdaskonseptien seinälaattalinjastolla muottipöytien siirtoon. Ongelmana on kuitenkin, että näissä poikkisiirtopalkeissa nosto- ja laskuliike hoidetaan hydraulisilla nostimilla, eikä vielä ole olemassa kaupallista ratkaisua, millä laskuliikkeen energiaa saataisiin regeneroitua hydraulisen nostinkäytön tapauksessa. Hydraulisen nosturin regenerointimahdollisuutta on kuitenkin tutkittu jonkin verran, sillä aiheesta on jätetty kiihdyvällä tahdilla patenttihakemuksia 2000-luvun aikana [43]. Tämän lisäksi Bucher Hydraulics -yhtiö on julkaissut kehittäneensä eräälle saksalaiselle autotehtaalle hydraulisen nostimen yhteyteen järjestelmän, jolla saadaan kerättyä laskettavan kappaleen potentiaalienergiasta noin 30 prosenttia talteen [44].

### 3.3 DC/DC -muuntimet

DC/DC-muuntimella tarkoitetaan tämän diplomityön yhteydessä DC-boosteria eli laitetta, jonka tehtävänä on muuntaa tasajännite korkeammalle jännitetasolle eli jännitteen aallonmuodon muutosta ei laitteella suoriteta, toisinkuin suuntaajien tapauksessa. Vaikka tällaisen DC/DC-muuntimen toimintaperiaate voi kuulostaa hyvin yksinkertaiselta, sisältää laitteisto usein huomattavasti enemmän komponentteja kuin esimerkiksi tasa- tai vaihtosuuntaajat. Tämä havaitaan hyvin vertaamalla kuvassa 3.6 esitettyä 12/24 V<sub>DC</sub> -muuntimen piirikaaviota luvussa 3.2 esitettyihin piirikaavioihin.



**Kuva 3.6** DC/DC-muunnin, joka muuntaa 12-14 V lähtöjännitteen 24-28 V ulostulojännitteeksi [45].

Koska ajatuksena oli kasvattaa akustosta saatavaa jännitetasoa DC/DC-muuntimella vähintään 312 V tasolle, jotta se riittäisi taajuusmuuttajan välipiirin syöttämiseen, asettuu laitteelle lukuisia vaatimuksia. Ensinnäkin muuntimen sekä ulostulo- että sisääntulojännitteen pitäisi ulottua vaaditulle tasolle, mutta tämän lisäksi myös laitteen tehonkeston pitäisi riittää vaadittavalle tasolle. Esimerkiksi tarkasteltaessa luvun 4 yhteydessä esiteltävää Prepareria ja sen n. 20 kW tehotasoa sekä akuston järkeväksi jännitetasoksi ajateltavaa 120...250 V<sub>DC</sub> jännitetasoa yhdessä taajuusmuuttajan välipiirin vaatiman 312 V<sub>DC</sub> jännitteen kanssa, syntyy DC-boosterille niin kovat vaatimukset, että lukuisat kaupalliset muuntimet osoittautuivat sopimattomiksi tähän tehtävään. Tästä esimerkkinä mainittakoon Schaefer Power yhtiön tarjoamat lukuisat mallivaihtoehdot [46], joiden jännitealueet ulottuvat 10-800 V tasolle sekä aina 40 kW asti ulottuvaan tehoon. Tästä huolimatta 15 kW rajan ylittyessä, ei kyseisellä yhtiöllä ole valikoimissa lainkaan DC-boosteria, jonka sisääntulojännite olisi alle 320 V.

Tämän diplomityön sovelluskohteeseen mahdollisesti sopivina DC/DC-muuntimina voidaan pitää Siemensin ja ABB:n esittelemiä vaihtoehtoja. Näistä ensimmäisenä esitellään kuvassa 3.7 olevat, Siemensin tarjoamat vaihtoehdot ja lopuksi tutustutaan ABB:n esittelemään tuotekategoriaan.

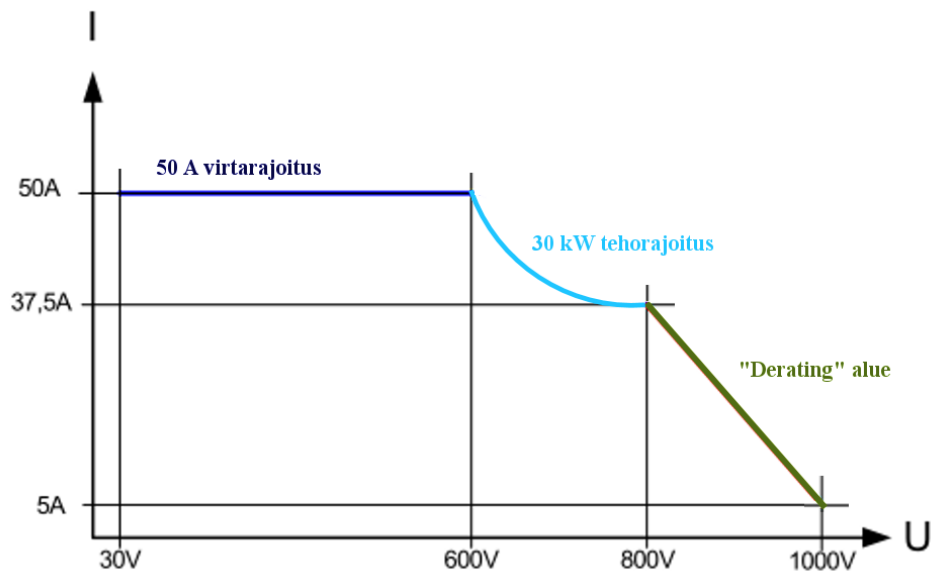
### Siemensin Sinamics -tuoteperhe

*Sinamics DCP* mallinimeä kantavaa DC/DC-muunninta on tarjolla kahdessa, 30 ja 120 kW, teholuokassa, joista molemmat tarjoavat jopa 30- 800 V<sub>DC</sub> jännitealueen sekä sisääntulo- että ulostulojännitteille [47].

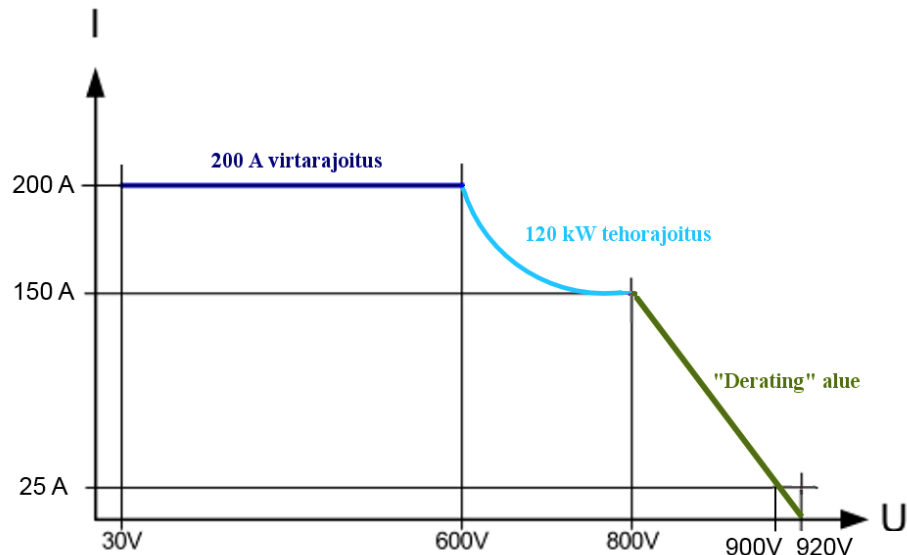


**Kuva 3.7** Siemens Sinamics DCP 120 kW (vasemmalla) ja 30 kW (oikealla) [47].

Molemmat Sinamicsin DCP laitteet ovat ilmajäähdytteisiä ja ne tarjoavat jännitetasoiltaan melko samankaltaisen käyttöalueen, mutta suurimpana erona on 30 kW mallin 50 A maksimivirrankesto. Näistä tehokkaampi 120 kW malli tarjoaa korkeamman virrankeston, jopa 200 A. Molempien laitteiden jännite-virta-kuvaajat on esitettyinä kuvissa 3.8 ja 3.9. ”Derating” -alueella tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä kuvaajan aluetta, missä maksimivirta rajoittuu jännitteen funktiona laskien lopulta nolnaan siinä pisteessä, missä jännitteen maksimiarvo saavutetaan.

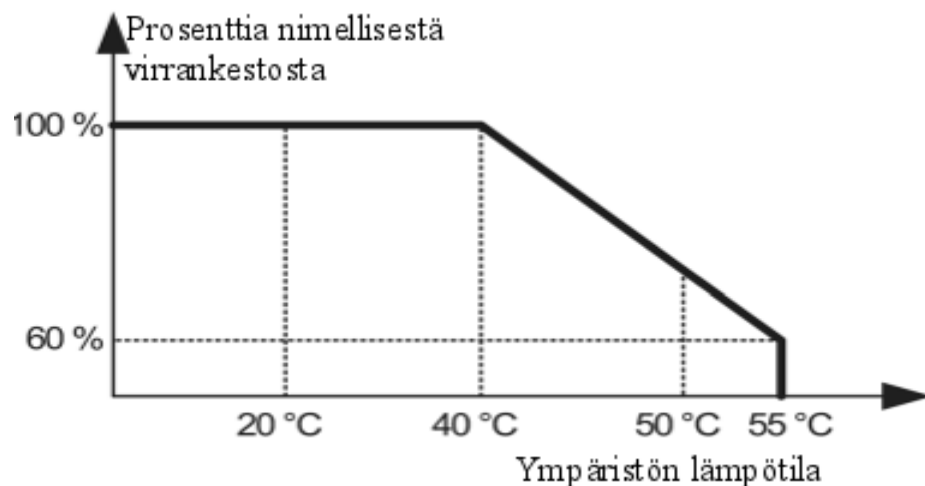


**Kuva 3.8** 30 kW Sinamics DCP:n jännite-virta-kuvaaja, muokattu lähteestä [48].



**Kuva 3.9:** 120 kW Sinamics DCP:n jännite-virta-kuvaaja, muokattu lähteestä [48].

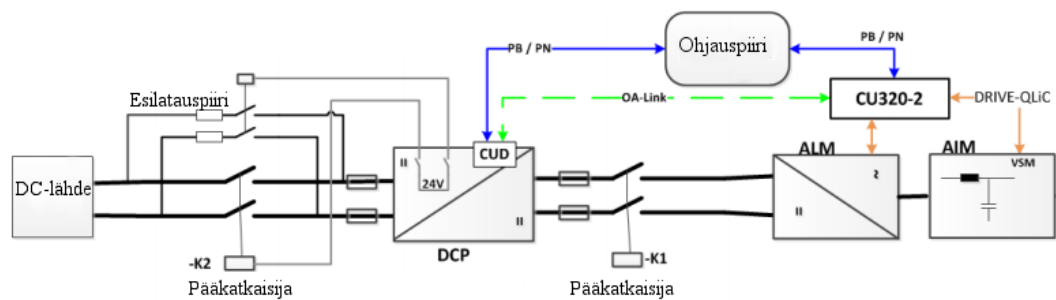
Laitteiden teknisestä esitteestä [48] kävi myös ilmi, että pienempi 30 kW malli kestää derating -alueella maksimivirtaa vain 30 sekunnin ajan 5 minuutin sykleissä, kun taas 120 kW laitetta pystytään ajamaan täysin kuvan 3.10 mukaisesti. Tämän lisäksi kuvassa 3.10 on esitettyä Siemensin suositus nimellisvirran alentamisesta ympäristönlämpötilan funktiona.



**Kuva 3.10** Sinamics DCP:lle suositeltu nimellisvirran alentaminen ympäristön lämpötilan funktiona, muokattu lähteestä [48].

Muita huomionarvoisia eroja laitteiden väliltä löytyy niin painosta, koosta kuin koteloituokuksesta. Tehokkaammalla mallilla on painoa 118 kg ja sen koteloituokitus on IP00, kun taas 30 kW mallilla on painoa vain 38 kg ja sen koteloituokitus ylittää IP20 tasolle, mikä tarkoittaa ainoastaan hieman parempaa kosketussuojausta. Ulkomitoiltaan laitteet ovat 650x149x545 mm sekä 900x205x500 mm, joten kovin suuresta kokoerosta ei kuitenkaan ole kyse, vaikka kuvasta 3.8 voisi näin ensin hahmottaa. [47]

Eräs huomioitava piirre on myös laitteen omaan käyttöön vaadittava  $24\text{ V}_{\text{DC}}$  apujännite, mille kuitenkin sallitaan  $18\text{--}30\text{ V}$  vaihteluväli [47]. Tämä ulkoinen apujännite on otettava huomioon akuston suunnittelussa esimerkiksi jonkin tyyppisen välioton kautta, mikäli akkutekniikan käytännön toteutuksessa päädytään käyttämään DC/DC-muuntimena tätä Siemensin tuotetta. Järjestelmän monimutkaisuudesta johtuen käytiin 5.10.2016 palaveri Siemensin edustajien kanssa, missä saatiin Siemensin näkemys järjestelmän kokonaisuudesta sekä tarjous komponenttien kustannuksista. Kokonaisuudessaan Siemensin esittelemä kokonaisuus [49] koostui pääpiirteittäin kuvan 3.11 mukaisesti DCP:stä, aktiivisesta verkkosuotimesta (AIM, *active interface module*), tasasuuntaukseen käytettävästä linjamoduulista (ALM, *active line module*), 63A/1000V -luokituksen sulakkeista, kahdesta ohjauksyksiköstä ja esilatauspiiristä. Eräs huomattava piirre, mikä tuli esiin Siemensin kanssa käydyssä palaverissa, oli, että DCP -moduuleita on mahdollista kytkeä rinnan jopa 4 kappaletta, jolloin myös pienemmistä 30 kW moduuleista voidaan koostaa 120 kW tehoon yltävä järjestelmä. Lisäksi DCP:n jännitetasoihin saatiin lisäksi määrittäminen, jonka mukaan akuston jännitteen pitää olla vähintään kahdeksasosa DCP:ltä vaaditusta, joten esimerkiksi  $48\text{ V}_{\text{DC}}$  akkujännitteellä saatavan ulostulojännitteen maksimiarvo on  $384\text{ V}_{\text{DC}}$ .



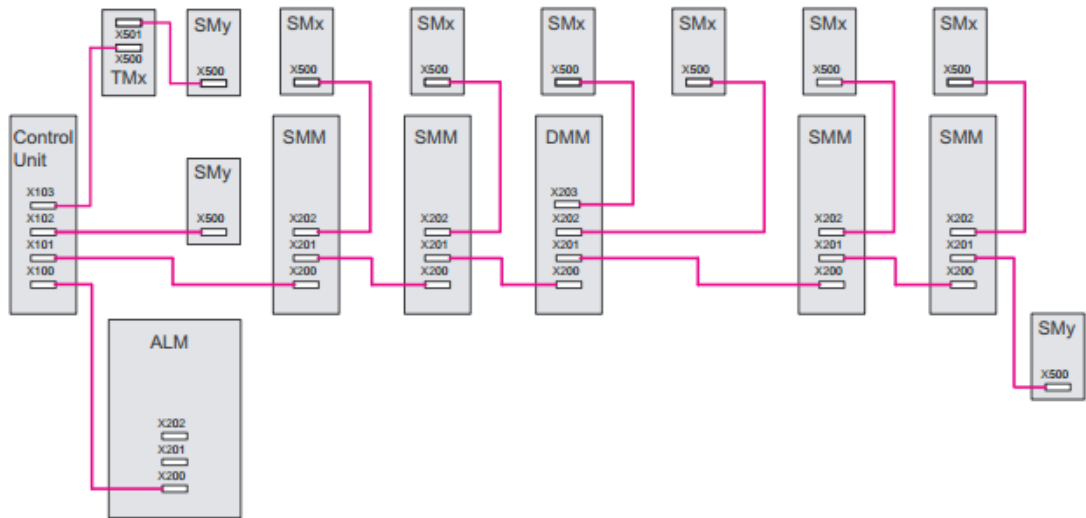
**Kuva 3.11** Siemensin hahmotelma DCP -järjestelmästä, muokattu lähteestä [49].

Kuvassa 3.11 esitellyssä järjestelmässä esilatauspiiriin tehtävänä on estää DC-lähteenä toimivien akkujen suora kytkeminen muuhun järjestelmään, mikä johtaisi kapasitiivisella kuormalla äkillisesti nousevaa ja mahdollisesti vaurioita aiheuttavaan varausvirtaan. Esilatauspiiri sisältää kytkimellä ohjatun esivastuksen, minkä ohjaussignaali tulee DCP:lle syötettävästä  $10\text{--}30\text{ V}_{\text{DC}}$  apujännitteestä ja tarvittava apujännite voidaan ottaa akustolta erillisellä jännitteen muuntimella.

Siemensin esitelmässä oli myös vaihtoehtoisina toteutustapoina tapaukset, joissa esilatauspiiriä käytetään DCP:n molemmilla puolilla sekä järjestelmä, missä esilatauspiiri on jätetty kokonaan pois tai se on yhdistetty pelkkään akkupakettiin. Tällaisissa tilanteissa, missä esilatauspiiriä ei ole DCP:n ALM -yksikön puolella, ei järjestelmän käynnistäminen ilman akustoa onnistu lainkaan ja mikäli esilatauspiiri jätetään pois, olisi huolehdittava siitä, että kaikki järjestelmän komponentit liittämiä, kaapeleita ja DCP:tä myöten kestävät kapasitiivisen kuorman ottaman varausvirran. Järjestelmässä AIM -moduuli vastaa esimerkiksi kytkentäaajuisten yliaaltojen suodattamisesta, jotta häiriöiden välittyminen



sähköverkon suuntaan voidaan minimoida. ALM -moduulia voidaan pitää järjestelmän keskusyksikkönä, sillä sen tasasähköpuolen ulostuloihin on kytkettävissä DCP:n lisäksi 1-8 moottorinohjaus -moduulia kuvan 3.12 mukaisesti.



**Kuva 3.12** ALM -moduulin esimerkinomainen kytkentä moottorinohjausyksiköihin. Kuvaa on merkittyä moottorinohjausmoduulit lyhenteillä SMM (single motor module) ja DMM (dual motor module). Kuvassa esiintyvät TMx on terminaalimoduuli, SMy mittausyksikkö ja SMx puolestaan moottorikoodain, joita ei kuitenkaan tarkastella tämän diplomityön yhteydessä. [50]

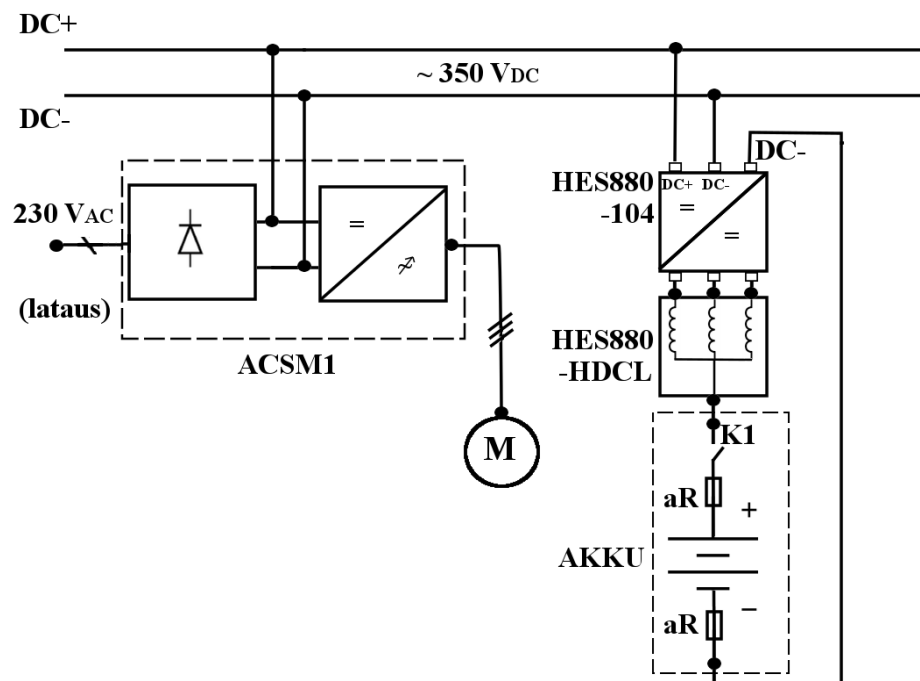
Edellä mainituista moottorinohjaus -moduuleista on saatavilla kahden tyyppisiä malleja, joista toinen kykenee ohjaamaan yhtä ja toinen kahta moottorikäyttöä. Molemmat moduulityypit soveltuvat 400V<sub>AC</sub> jännitetason kolmivaiheisten moottorikäyttöjen ohjaamiseen, mutta yhden moottorin ohjaamiseen soveltuvista moduuleista löytyy virrankestoja 3 ampeerista aina 85 ampeeriin, kun taas kahden moottorin ohjaamiseen soveltuvien moduulien vaihtoehdot loppuvat 18 A:n kohdalla. Näiden moduuleiden yksikkökustannukset muodostavat karkeasti noin kymmenesosan koko muun järjestelmän kustannuksista. Suunnitellussa järjestelmässä on siten moottorinohjausmoduulien lisäksi yksi ohjauspiiri, graafisesti ohjelmoitava CU320-2 ohjainkortti, vähintään kaksi nopeaa aurinkosähkökäyttöille suunniteltua sulaketta, 30 kW DCP -moduuli sekä AIM ja ALM -moduulit. Valitettavasti Siemens ei antanut lupaa edes listahintojen julkaisemiseen, joten tässä diplomityössä ei päästä vertailemaan eri järjestelmien kokonaiskustannuksia.

Järjestelmän käynnistyssekvenssi määrittelee osittain valittua kokoonpanoa, mutta esimerkiksi kuvan 3.11 mukaisessa tilanteessa järjestelmän käynnistys alkaa ALM -yksikön käynnistämällä, mitä seuraa esilatauspiirin päälle kytkeminen ja esilatauksen alkaminen. Kun jännite on saatu nousemaan halutulle tasolle, avataan esilatauspiirin kytkin ja suljetaan pääkatkaisija (K<sub>2</sub>), minkä jälkeen akuston syöttöjännitteen kontrollointi aloitetaan yhdessä DCP:n käynnistämisen kanssa. Lopuksi suljetaan toinen pääkatkaisijoista

( $K_1$ ) ja DCP aloittaa ALM -yksikön puoleisella ulostulollaan jännitteen nostamisen haluttuun tasoon, minkä jälkeen ALM:in ohjaamat moottorinohjausyksiköt ovat toiminta- valmiudessa.

### ABB:n HES -tuoteperhe

Toisena esiteltävänä vaihtoehtona on ABB:n markkinointipäällikkö Antti Vuorivirran esittelemä kokonaisuus [51], mikä on hahmoteltuna ABB:n ohjeiden perusteella kuvaan 3.13. Tämän kokonaisuuden mukana tulee moottorinohjaukseen käytettävä ACSM1 -taajuusmuuttaja, akuston jännitteen nostoon käytettävä HES880-104 DC/DC-muunnin, suodattimena toimiva HES880-HDCL DC-kuristin sekä tarvittavat ohjelmistot ja liitännät. Näiden lisäksi tarvitaan mm. nopeat aR-sulakkeet sekä kuvassa 3.13  $K_1$  -merkinnällä nimetty DC-kontaktori.



**Kuva 3.13** Havainnekuva ABB:n tarjoamasta laitekokonaisuudesta. Kuvassa ACSM1 -taajuusmuuntimen latauspiiri on esitettyä yksivaiheisella 230V<sub>AC</sub> kytkennällä, vaikka se voisi olla toteutettuna yhtä hyvin myös kolmivaiheisella 400V<sub>AC</sub> jännitteellä.

Kuvan 3.13 kokonaisuudessa ACSM1 -taajuusmuuttajalla ohjataan AC-moottorikäyttöä, aivan kuten luvun 3.2 yhteydessä suunniteltiin. Tämän lisäksi kuvassa 3.14 esitetylle HES880-104 DC/DC-muuntimelle annetaan latausvirtaohje, joka olisi ajotilanteessa n. 350 V<sub>DC</sub> vakiojännite ja lataus suoritettaisiin taajuusmuuttajan diodisillan kautta.



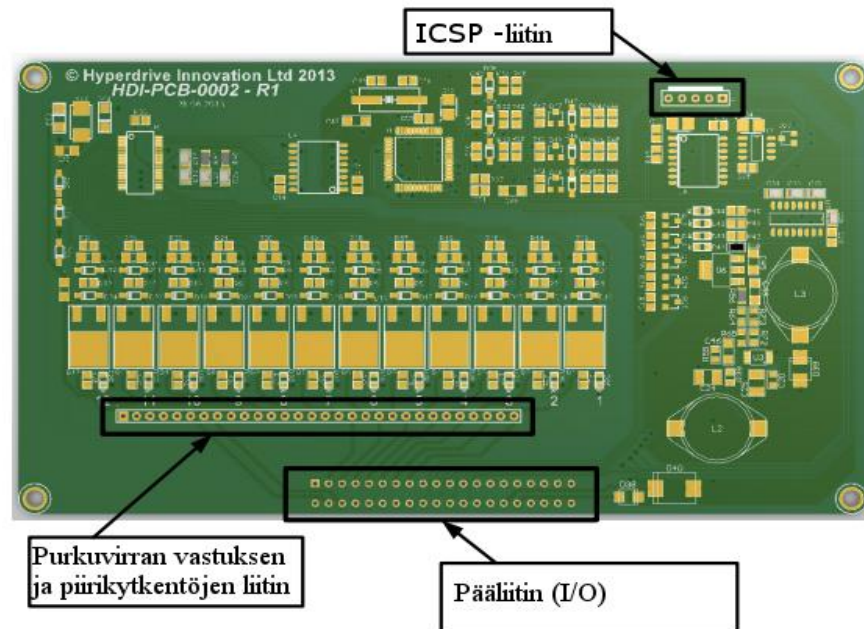
*Kuva 3.14 ABB:n HES880-104 DC/DC-muunnin [52].*

Tämä ABB:n valmisteleva kokonaisuus vaatii kuitenkin DC/DC-muuntimelle saman  $24 V_{DC}$  apujännitteen kuin Siemensin Sinamics DCP laitteetkin, mutta tämän lisäksi se on nestejäähdytteinen, minkä johdosta saavutetaan kuitenkin Siemensin moduulia huomattavasti kompaktimpi koko [53]. Kyseisen HES880-104 DC/DC-muuntimen toinen mallimerkintä on ABB:n tietojen mukaisesti *H3i 500V 320A Inverter*, mutta tarkempi tutustuminen laitteen esitteeseen [52] paljastaa, että 320 A virrankesto koskeekin vain lyhytaikaisia virtapiikkejä. Kyseisessä esitteessä laitteelle ilmoitettu jatkuvan virrankesto on vain 233 A ja samalla sen käyttöjännitealueeksi paljastui  $230\text{-}500\text{ V} \pm 10\%$ . Näin ollen se vastaa virrankestoltaan hyvin pitkälti Siemensin 120 kW mallia, mutta jää sille jännitteenkestossa. Huomioitavaa on kuitenkin, ettei Elematic Oyj:lle suunniteltavaa akkutekniikkaa tarvitse mitoittaa yli 500 V jännitetasolle, joten merkityksellistä eroa Siemensin tehokkaamman mallin ja ABB:n vaihtoehdon välille ei tule syntyämään. Myöskään ABB:n tarjoamalle pakettiratkaisulle ei sallittu hankintakustannusten julkaisua, mutta todettakoon, että ABB:n ja Siemensin tarjoamien DC/DC -muunnin ratkaisujen kustannukset ovat melko lähellä toisiaan silloin, kun kustannuksiin ei lasketa mukaan tarvittavia moottorinohjausmoduuleita.

### 3.4 BMS -järjestelmä

Tyypillisen BMS -järjestelmän alle lukeutuu suuri joukko erityyppisiä toimintoja, jotka huolehtivat yleensä lähes kaikista akun toimintaan ja sen tilaan vaikuttavista tekijöistä. Seurattavia suureita ovat esimerkiksi akuston varaus- ja lämpötila sekä purku- ja latausvirrat, joita tarkastellaan yleensä niin yksittäisten kennojen kuin koko akkupaketin osalta.

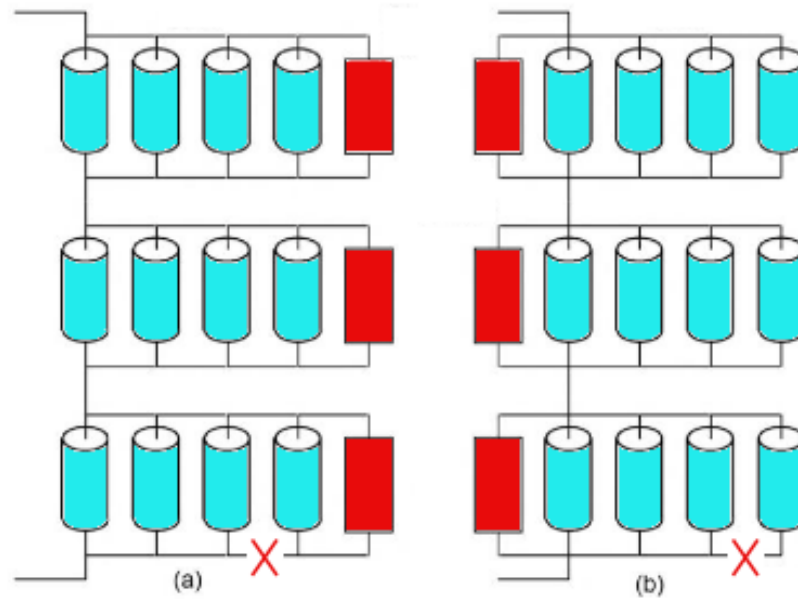
Nykyisin monet BMS -järjestelmät sisältävät nopean tiedonsiirtoväylän, joka voidaan integroida joko langattomasti tai esimerkiksi CAN-väyläisen tiedonsiirtoon perustuen muiden laitteiden tai esimerkiksi latausaseman yhteyteen. Tästä esimerkkinä on kuvassa 3.15 esitetty yhdysvaltalaisen Hyperdriven valmistama balansointipiiri [54], joka käyttää CAN-väylää tiedonsiirron välineenä.



**Kuva 3.15** Hyperdriven BMS-ohjain, muokattu lähteestä [54].

Nämä Hyperdriven BMS-piirikortit soveltuvat jännitetasoltaan 9 - 60 V<sub>DC</sub> akuille sekä maksimissaan 12 kennon valvontaan, mutta kyseisiä ohjainkortteja voidaan kytkeä yhteen jopa 255 kappaletta, mikä tarkoittaa jopa yli 3000 kennon yhtäaikaista valvontaa. Valitettavasti Hyperdrive ei vastannut BMS -ohjaimista lähetettyyn hintapyyntöön, joten tämän option kustannustaso jää tässä vaiheessa epäselväksi.

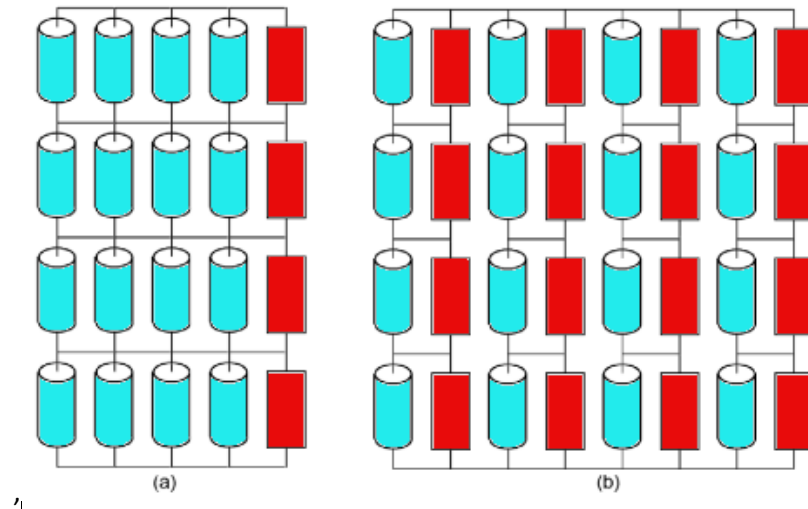
Koska kehittyneet BMS -järjestelmät valvovat akuston toimintaa niin käytön kuin latauksenkin aikana, ei erillisiä latausbalansereita nykyisin juuri tarvita. Latausbalanserilla tarkoitetaan tässä hieman BMS -järjestelmää yksinkertaisempaa laitetta, joka huolehtii pelkästään latauksen aikaisesta toiminnasta ja ohjaa laturia siten, että kaikki kennot saataisiin ladattua mahdollisimman täyteen. Edellä mainittujen lisäksi BMS:n tehtäviin lukeutuvat erilaisten vikatilojen havaitseminen ja havaittuihin ongelmiin liittyvät suojaustoiminnot. Tästä hyvänä esimerkkinä on yksittäisen kennon oikosulku, joka voidaan hoitaa eristämällä kenno pois käytöstä, mikä on esitettyä kuvassa 3.16. Muita suojaustoimintoja voivat olla lämpötilaseurannan kautta tapahtuva latausvirran rajoittaminen tai koko akustojärjestelmän hätäsulku vakavien ongelmien ilmetessä.



**Kuva 3.16** Vaarallinen (a) sekä oikeaoppinen (b) sijoittelu punaisella värillä merkityille kennojen kunnonvalvontapiireille, muokattu lähteestä [55, s. 246].

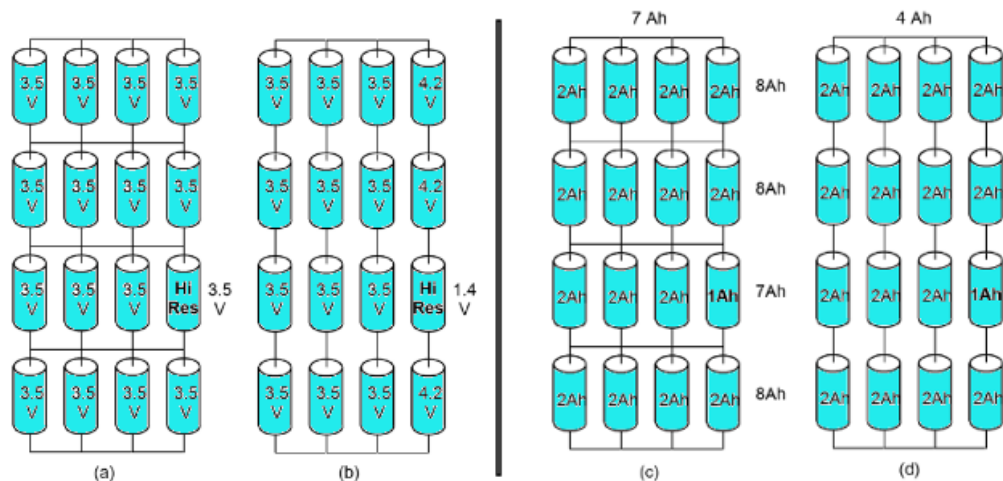
Kuvasta 3.16 havaitaan, että mikäli BMS on kytkettynä siten, ettei sillä ole suoraa yhteyttä akkujen väliseen päävirtakiskoon ja se sulkee rinnankytketyistä kennoista yhden pois, katkeaa myös BMS:n ja akuston välinen yhteys kokonaan. Tällainen tilanne on tietysti epätoivottu ja hyvin vaarallinen, joten tästä syystä BMS:n sijoitteluun pitää kiinnittää erityistä huomiota. Oikeaoppisessa kytkennässä BMS kykenee sulkemaan yksittäisiä kennoja niiden vikaantuessa ilman, että koko akustoa täytyy sulkea ja seurauksena on vain pieni kapasiteetin alentuminen.

Tarkastellaan seuraavaksi teoriatasolla kuvassa 3.17 esitettyä järjestelmää, joka koostuu  $X$  määrästä yksittäisiä kennoja siten, että kennoista muodostetaan  $Y$  määrä rinnankytkentöjä, jolloin sarjaan jää  $X/Y$  määrä kennoja. Mikäli jokainen sarjaankytkentä tehdään pelkästään sarjaan tulevien kennojen välille, muodostavat jokainen sarjaankytkentä käytännössä oman akkunsaa. Tällöin joudutaan kennojen kunnonvalvontaan käyttämään yhtä monta balansointipiiriä (eng. cell board), kuin mitä kennojen kokonaismäärä on. Jos taas koko akkupaketti rakennetaan yksittäisistä kennoista, riittää järjestelmän hallintaan vain  $Y$  määrä balansointipiirejä. Tästä syystä kaikki pieniä kennoja käyttävät akustot onkin kasattu yhdeksi suureksi akkupaketiksi, mistä hyvänä esimerkkinä oli luvussa 2.2.3 esitetty Tesla Model S sähköauton akkuratkaistu.



**Kuva 3.17** Kennojen sarjaan- ja rinnankytkennöissä vaadittavien balansointipiirien tarkastelua. Ensimmäisessä tapauksessa (a) kennot on kytketty sekä sarjaan että rinnan, mutta toisessa tapauksessa (b) kennot on kytketty toisiinsa nähden ainoastaan sarjaan, muokattu lähteestä [55, s. 230].

Toinen tärkeä asia vaadittavan BMS -piirin lukumäärän lisäksi on itse akuston toimintavarmuuteen vaikuttavat kytkennät. Kuvassa 3.18 on esitettyä kaksi tapausta, joista toisessa (a, b) yhden kennon resistanssi nousee kennon vaurioituessa ja toisessa (c, d) tapahtuu yksittäisen kennon ennenaikaisesta ikääntymisestä johtuva kapasiteetin alentuminen.

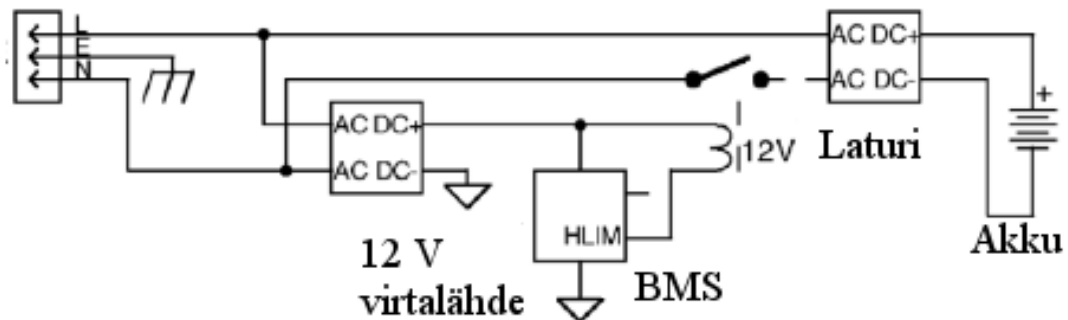


**Kuva 3.18** Vioittuneen kennon vaikutus akun toimintaan, kun jokainen sarjaan kytketty kenno on kytkettynä rinnan (a, c) sekä tilanteessa, missä rinnankytkentää ei ole tehty (b, d), muokattu lähteestä [55, s. 232-233].

Tässä esimerkkitapauksessa on esitetty molempien vauriotyyppien osalta kaksi, kuvan 3.18 mukaista kytkentää, ja kytkentöjen vaikutuksia akuston toimintaan vikatilanteen satuttaessa. Ensimmäisessä tapauksessa kennon sisäisen resistanssin nousu aiheuttaa muiden, samaan sarjaan kytkettyjen, kennojen jännitteen kasvamisen, mikäli kennojen välisiä rinnankytkentöjä ei ole toteutettu a-kohdan mukaisesti. Tällöin BMS tulee sulkemaan koko

akuston, jotta ehjien kennojen vaurioituminen saadaan estettyä. Toisessa tapauksessa alentuva kapasiteetti johtaa hyvin radikaaliin kapasiteetin alentumiseen koko akuston osalta, mikäli kytkennät on toteutettu d-kohdan mukaisesti. Tämä johtuu siitä, että kun akustosta on purkautunut 4 Ah verran varausta, on puolittuneen kapasiteetin kenno täysin tyhjä, jolloin sen jännite laskee ja BMS sulkee akuston, jolloin lopulliseksi kapasiteetiksi jää d-kohdan osalta 4 Ah. Ero on valtava, kun sitä verrataan c-kohdan tapaukseen, missä alun perin 8 Ah suuruinen kapasiteetti alenee vain 7 Ah tasolle.

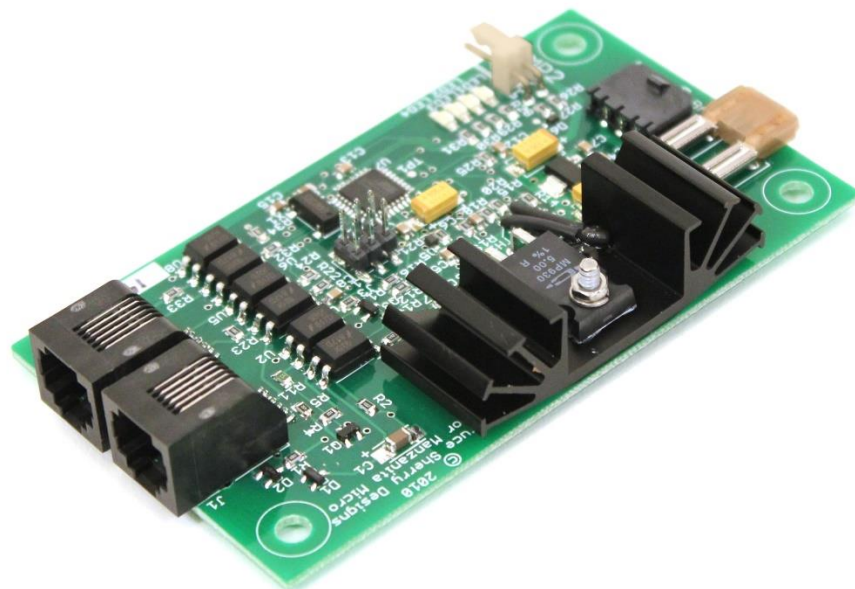
On tärkeää, että akuston toiminnasta vastaava BMS -laitteisto kykenee kommunikoimaan akuston lisäksi sekä laturin että itse akustosta virtaa ottavan laitteiston kanssa. Tarkastellaan nyt lyhyesti erilaisia tapoja, joilla tämä kommunikointi on yleisimmin toteutettu. Esimerkkinä voidaan ottaa tilanne, missä BMS katsoo tarpeelliseksi rajoittaa kuormitusvirran arvoa 105 ampeerista 100 A tasolle. Tällöin BMS voi lähettää käytössä olevaa tiedonsiirtoväylää pitkin ohjausviestin laitteen moottorinohjausyksikölle ja pyytää muuttamaan ohjausta haluttuun suuntaan. Koska moottorinohjausjärjestelmä kykenee yleensä säätämään vain moottorin vääntömomenttia, tulee sen ymmärtää BMS:ltä saatava viesti ja kyetä rajoittamaan vääntömomenttia siihen asti, kunnes raja-arvoksi asetettu kuormitusvirran taso on alitettu. BMS:n ja laturin välisen tiedonsiirron kehittyneisyys, niin ohjausprotokollan kuin ohjaustoimintojenkin osalta, riippuu puolestaan pitkälti sekä laturin että BMS -järjestelmän ominaisuuksista. Kuvassa 3.19 on esitettyä hyvin yksinkertainen järjestelmä, missä BMS ohjaa laturin toimintaa releen välityksellä. Tällaisessa järjestelmässä BMS kykenee siten vain kytkemään laturin päälle tai pois avaamalla ja sulkemalla ohjausrelettä. [55, s. 247]



**Kuva 3.19** Yksinkertainen BMS -järjestelmä latauksen kontrollointiin, muokattu lähteestä [55, s. 248].

Kehittyneemmissä järjestelmissä sekä laturi että BMS käyttävät datayhteyttä, jolla varmistetaan nopea ja keskeytymätön tiedon siirto. Samalla mahdollistuu latausvirran säätäminen akuston varaustilan mukaisesti, jolloin BMS kykenee tunnistamaan akuston SOC -tilan ja ohjaamaan laturia siten, että kaikkien kennojen varaustila tulee huomioituksi ja ne saadaan ladattua mahdollisimman täyteen ilman vaaraa muiden kennojen yllilatauksesta. Tyypillisin kehittyneempi tiedonsiirtoväylä näyttäisi olevan juurikin CAN -väylä, jota myös edellä esitelty Hyperdriven BMS -järjestelmä käytti.

Hyperdriven BMS -ohjain on kuitenkin tarkoitettu yksittäisille kennoille, eikä se siten sovellu suljettujen lyijyakkujen kunnonvalvontaan, koska järjestelmä vaatii kytkennän yksittäisten kennojen välille. Tämän lisäksi useiden BMS -järjestelmien tiedoissa mainitaan, mille akkutyypeille ne soveltuvat ja lukuisat kehittyneemmät BMS -järjestelmät näyttäisivät olevan suunniteltu vain litiumioni -akuille. Kaupalliset ratkaisut useista lyijyakuista koottavan akuston BMS -järjestelmäksi vaikuttivat olevan harvassa, mutta yhdeltä valmistajalta löytyi tähän tarkoitukseen sopiva BMS -ohjainkortti. Tämä nimenomaisesti lyijyakuille kehitetty järjestelmä löytyy Yhdysvaltalaisen Manzanita Micro Power Systems -yrityksen valikoimasta 75 dollarin hintaan [56]. Kuvassa 3.210 esitetty ja *Mk3 Pba BMS* mallinimeä kantava ohjausjärjestelmä kykenee tosin ohjaamaan vain yhtä 12 V tai kahta 6 V jännitetasoa lyijyakkua, mutta järjestelmä tukee maksimissaan 30:tä RJ-kaapelilla toisiinsa liitettyä BMS -ohjainta, jolloin ohjattavien akkujen lukumäärä nousee akkujen jännitetasosta riippuen 30 tai 60 kappaleeseen. [57].



**Kuva 3.20** Lyijyakuille kehitetty Micro Power Systemsin BMS -ohjain, muokattu lähteestä [56].

Tämän diplomityön kirjoitusprosessin aikana ilmestyi lokakuussa 2016 Manzanita Micro Power Systemsin verkkokauppaan vielä kaksi uutta 200 ja 320 dollarin hintaista BMS -piiriä, jotka soveltuvat litiumioni -akkujen kunnonvalvontaan, toisin kuin edellä esitelty lyijyakuille suunnattu BMS -piiri. Näistä uutuustuotteista toinen kykenee hallitsemaan maksimissaan 4 kennoa, joiden virta on enintään 3 A kennoa kohden ja toinen, kalliimpi versio, puolestaan 8 kennon ja enintään 2,5 A kennovirran valvontaan. Molemmat näistä kykenevät toimimaan kaikkien kaupallisten litiumioni -tekniikoiden kanssa, sillä kennojännitteelle asetettu raja on hyvin laaja, 1,75-5,5 V<sub>DC</sub>. Tuotteiden mukana toimitetaan sallitun kennomäärän mukainen määrä lämpötilasensoreita ja niiden ohjaus onnistuu USB-portin kautta käyttämällä ACSII -tekstikoodia. Tarkemmasta väyläohjauksesta laturia varten ei kuitenkaan löytynyt tietoa, mutta tuotetiedoista kuitenkin selvisi, että kyseiset



BMS -ohjaimet kykenevät toimimaan yhdessä saman yrityksen valmistamien latureiden kanssa, joista kerrotaan lisää latausjärjestelmää käsittelevässä luvussa 5. Mainittakoon kuitenkin, että yksi tapa yhdistää CAN-väylätön BMS -järjestelmä laturiyksikköön olisi käyttää erillistä virta-anturia, jonka kautta latausvirta voitaisiin välittää laturille.

Edellisessä kappaleessa mainittuun, kustomoidun BMS -yksikön kasaamiseen liittyen, löydettiin eräs mielenkiintoinen eurooppalainen kontakti. Nimittäin Alankomaihin rekisteröity Ratio Electric B.V. yhtiö tarjoaa tuotevalikoimassaan runsaasti komponentteja sähköajoneuvojen lataus- ja akustokonstruktion laatimiseksi. Yhteydenotto heidän myyntiosastolleen paljasti kuitenkin, että heiltä löytyy jälleenmyyjä myös Suomesta ja tätä kautta saatiinkin sähköajoneuvojen muuntoprojekteja sekä Ratio Electricin tavoin verkkokauppaa pyörittävän suomalaisyrityksen Arctic Electric Vehicles Oy:n (myöh. AEV) yhteystiedot. Lisäksi AEV on sisällyttänyt tuotevalikoimiinsa BMS -sarjan rakennusosat, siinä missä Ratio Electric tarjoaa sähköajoneuvoille ainoastaan latausratkaisuja. Tarkastellaan nyt tämän AEV:n verkkokaupasta [58] löytyvää tarjontaa BMS -järjestelmään sisällytettävistä komponenteista, jotka on listattu taulukkoon 3.2.

**Taulukko 3.2.** AEV:n tarjoamat BMS -järjestelmän komponentit tuotetietoineen [58].

Tuote	Lisätiedot	Hinta (€/kpl)
BMS ohjauskeskus 1	Max. kennomäärä: 255 kpl	409,20
BMS ohjauskeskus 2	Off-grid versio	482,98
BMS jännitemonitori	Soveltuu 2-8 kennolle	49,59
BMS kennomoduuli	T ja V -anturit	14,51
BMS virta-anturi (Hall)	100, 200 ja 400 A optiot	50,84
Kapasiteettimittari	Analoginen näyttö	48,36
Virtamittari	Analoginen näyttö	62,50
Esilatauspiiri 1	Soveltuu 12-160 V <sub>DC</sub>	87,12
Esilatauspiiri 2	Soveltuu 160-320 V <sub>DC</sub>	102,97

Taulukossa 3.2 mainituista tuotteista on siis rakennettavissa täysin kustomoitu BMS -järjestelmä, joka kykenee lähes kaikkien kaupallisten akkutyyppeiden valvontaan. Esimerkiksi kennojännitemonitorin luvataan toimivan LiPo, Li-Ion, LiFePO<sub>4</sub>, NiMH, NiCd sekä lyijyakkujen kanssa ja siihen sisältyy summerilla varustetut ali- ja ylijännitehälytykset. Tämän lisäksi sen kokonaisjännitealue on 4,0-43 V<sub>DC</sub> ja kennokohtainen jännitealue 1,3-4,9 V<sub>DC</sub>. Toisena tärkeänä komponenttina ovat kennojännitettä ja -lämpötilaa mittaavat kennomoduulit, joita tarvitaan jokaisen kennon välille sekä erilliset yksiköt vielä akuston alku- ja loppupäähän eli käytännössä akkupaketin plus- ja miinusnapoihin sekä jokaisen kennon välille. Lisäksi tarvitaan ulkoinen virta-anturi, joita on saatavilla kolmessa koossa, sekä BMS ohjauskeskus ja esilatauspiiri. Koko järjestelmän keskeisimpänä osana olevaa, noin 400 euron hintaista BMS -ohjainta on saatavilla kahtena versiona, joista molemmat toimivat kuitenkin samojen oheiskomponenttien kanssa kuin mitä taulukkoon 3.2

on listattuna. Ensisijaisesti suositeltuna akkukemiana käytetään LFP:tä, mutta tuotetiedoissa mainitaan myös sopivuudesta myös muille 2-5 V kennojännitteen akkukemioille, kuten LiPo:lle ja Li-Ion:lle. Näistä toinen ohjain, joka on nimetty ”off-grid” -malliksi, on tarkoitettu ensisijaisesti energiavarastojen tai aurinkosähköjärjestelmien yhteyteen ja sen mukana toimitetaan 60A relekytkin ja lisäksi sen kytkentäkaavio on hieman erilainen kuin perusmallin ohjaimessa, mikä havaitaan tarkastelemalla liitteessä 2 [59, 60] esitetyjä molempien järjestelmien kytkentäkaavioita. Akkupaketin jännitealueeksi on molempien BMS -ohjaimien tapaan konfiguroitavissa jokin seuraavista: *10-60, 40-140, 100-200, 150-300 tai 250-500 V<sub>DC</sub>*.

Lisäksi on huomattava, että *BMS ohjauskeskus 1* vaatii oman 8-30 V<sub>DC</sub> käyttöjännitteen, kun taas *BMS ohjauskeskus 2:n* vaatima käyttöjännitealue on laajempi, 8-60 V<sub>DC</sub>. Esilatauspiiri tulee puolestaan valita käytettävän akkupaketin jännitetasoon nähden ja sen tehtävänä on esiladata moottorinohjaimen kondensaattorit, mihin se käyttää 8-16 V<sub>DC</sub> jännitetasoa, kuten luvun 3.3 yhteydessä todettiin.

Laturin osalta kytkentä on kolmijohtiminen, mikä koostuu 0/12 V<sub>DC</sub> jännitesyötöstä sekä 0-5 V<sub>DC</sub> ohjaussignaaleista, joten se ei käytä uudempien latureiden tavoin CAN -väylää, vaan latausta kontrolloidaan erillisen ohjausjännitteen avulla. Esimerkkinä yhteensopivista latureista annettiin Elconin valmistamat laturit, jotka esitellään luvun 5 yhteydessä.

Sen sijaan ulkoiset kapasiteetti- ja virtamittarit ovat täysin valinnaisia optioita, sillä järjestelmän kautta saadaan nämä tiedot luettua myös ohjelmiston kautta. Yhtenä huomiona on käyttöoppaista [59, 60] havaittu valmistajan toivomus siitä, että akkupaketin nimelliskapasiteetti ohjelmoitaisiin BMS -ohjaimen 30 prosenttia alhaisempana kuin mitä todelliseksi kapasiteetiksi on ilmoitettu. Täten esimerkiksi 100 Ah akuston kapasiteetiksi tulisi ohjelmoida 70 Ah, jotta kennojen ikääntyminen ja lämpötilojen vaikutukset eivät vääristäisi jäljellä olevan kapasiteetin lukuarvoa, mikä on kuitenkin käyttäjän itse valittavissa. Vastaavaa kapasiteetinmäärittelyä tarkastellaan kuitenkin vielä tarkemmin luvun 5 yhteydessä.

Vaikka tässä luvussa esiteltiinkin muutamia kaupallisia BMS -moduuleita, jotka kytetään erikseen joko akkukennojen väliin tai lyijyakkujen tapauksessa akkujen välille, on huomattava, että kaikkein uusimpia litiumioni -akkuja myydään myös moduuleina. Tällainen akkumoduuli sisältää jo itsessään muutamista akkukennoista ja BMS -järjestelmästä kasatun yksikön, joka käyttää CAN-väylää tiedonsiirrossa. Näin ollen moduulien sijoittaminen akkukehikkoon on yksinkertaista ja laturin sekä akkupaketin välinen yhteys voidaan toteuttaa CAN-väylän avulla. Kuvassa 3.21 on esitettynä tämän tyyppinen toteutus maailman suurimmalta litiumioni -akkujen tuottajalta GS Yuasalta.



**Kuva 3.21** LIM50E-8G (vasemmalla) ja LIM50E-7G (oikealla) moduulit [61].

Esitetyt 47,5 Ah litiumioni -moduulit sisältävät niiden datalehden [62] mukaan joko 7 tai 8 sarjaan kytkettyä kennoa, jolloin yhden moduulin jännitetasoksi tulee joko 25,9 tai 29,6 voltia. Huomattavaa on myös moduuleille sallitut lataus- ja purkausvirrat, sillä LIM50E -moduuleilla voidaan saavuttaa jopa 300 A purkuvirta sekä enintään 125 A latausvirta. Litiumioni -akuille tyypillinen huono pakkaskestävyys ei myöskään tee näiden teollisuusluokan akkumoduuleidenkaan tapauksessa poikkeusta, sillä asetettu vaatimus käyttölämpötilalle on  $-10 - +45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

GS Yuasan kehittämä BMS -järjestelmä valvoo moduuleiden jännitettä, virtaa, SoC -tasoa, lämpötilaa sekä kennojännitteitä ja mahdollistaa seurattaville arvoille asetettavat varoitustasot sekä käyttää tämän lisäksi sekä CAN 2.0B että RS-485 protokollin pohjautuvia tiedonsiirtoväyliä. GS Yuasan Pohjoismaiden liiketoiminnasta vastaavan henkilön Wen Hanin kanssa 21.6.-5.8.2016 käyty kirjeenvaihto selkeytti suuresti näiden moduuleiden toiminnan ymmärtämistä. Esimerkiksi useista moduuleista rakennetun akkujärjestelmän kunnonvalvonta toteutetaan siten, että jokaista sarjaankytkentää varten tulee yksi erillinen BMS -ohjain ja tämän lisäksi yksi *masterina* toimiva BMS kytketään tämän kokonaisuuden hierarkiassa ylimmälle tasolle. Näin saadaan aikaan luotettava BMS -järjestelmä, joka kykenee myös reaaliaikaiseen kommunikointiin latausjärjestelmän kanssa. [63]

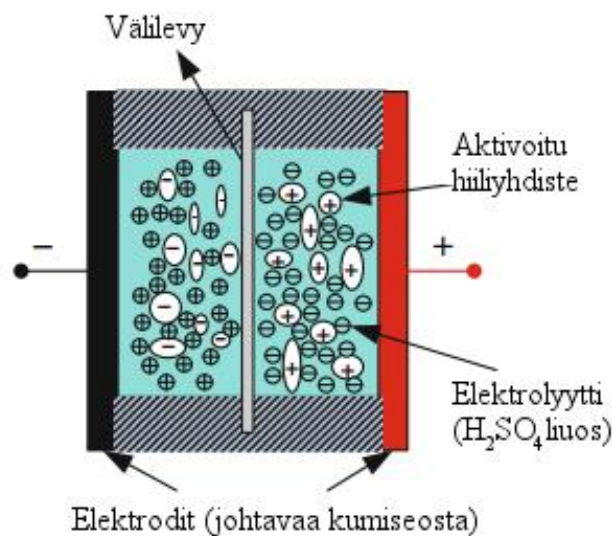
### 3.5 Superkondensaattorit

Superkondensaattorit on otettu mukaan tähän akkujärjestelmän oheislaitteita käsittelevään lukuun huolimatta siitä, että kyseessä on täysin akkutekniikan ulkopuolinen kohde, vaikkakin joissain käyttösovellutuksissa onkin hyödynnetty näitä suuren energiasisällön omaavia kondensaattoreita akkujen pikalatausasemien energiavarastoina. Tästä esimerk-

kinä on ABB:n Geneven bussiliikenteelle kehittämä hanke [64] sähköbussien päätepysäkkien pikalatausasemille, missä superkondensaattoreihin varattu energiasisältö siirretään hyvin 400 kW teholla linja-autossa olevaan 38 kWh LTO -tyypin akustoon.

Tässä diplomityössä superkondensaattorit otettiin mukaan kuitenkin toisesta syystä, eikä niiden soveltuvuutta latausasemien yhteyteen nähty tarpeelliseksi selvittää. Tämä johtui niin superkondensaattoreiden korkeasta hintatasosta energiasisältöön suhteutettuna, kuin myös suhteellisen pienestä tarpeesta pikalatauksen saatavuudelle. Superkondensaattoreiden tarkastelu tuleekin kyseeseen ainoastaan yhden, myöhemmin esiteltävän laitteen osalta. Kyseisessä laitteessa oleva vapaa tila on hyvin rajallinen, joten akkujen sovittamisen ohella haluttiin tutkia myös korkean energiatihedden omaavien superkondensaattoreiden soveltuvuutta.

Superkondensaattori ei teknisesti eroa merkittävästi tavallisesta kondensaattorista, vaan nimitystä käytetään kaikista kondensaattoreista, joiden energia- ja tehotiheydet yltyvät kilpailemaan akkujen kanssa. Superkondensaattoreiden kyky varata suuria energiamääriä ilman merkittävää eroa niiden kokoluokassa verrattuna tavallisiin kondensaattoreihin perustuukin juuri korkeaan energiatihedteen, joka voidaan saada aikaan esimerkiksi kasvattamalla elektrodien pinta-alaa. Käytännössä tämä on hoidettu kuvan 3.22 mukaisella, ”*electric double-layer*” -rakenteella, missä elektrodien välisen elektrolyytin sisään on asennettu erillinen välilevy. [65, s.73]



**Kuva 3.22** Periaatekuva superkondensaattorin rakenteesta, muokattu lähteestä [65].

Vaikka kuvan 3.22 rakenne muistuttaakin pitkälti kuvassa 2.1 esitettyä akkukennon poikileikkausta, eroaa kondensaattori akuista mm. siinä, ettei sen sisällä tapahdu elektrolyytistäkään huolimatta kemiallisia reaktioita. Tästä johtuen kondensaattori on myös ladattavissa hyvin tasaisella virralla, eikä akuille tyypillisiä lataus- ja purkauszykliden ominaispiirteitä esiinny kondensaattoreissa.

Erityisesti pienempien kondensaattoreiden koot merkitään yleensä vain niiden kapasitanssien ja jännitteenkeston mukaisesti, mutta kapasitanssin (yksikkö Faradi,  $F$ ) ja jännitteen avulla voidaan selvittää helposti kondensaattorin energian varaamiskyky. Tämä onnistuu käyttämällä yhtälöä 17 [66],

$$E = \frac{1}{2} * CV^2, \quad (17)$$

missä  $C$  tarkoittaa kondensaattorin kapasitanssia ja  $V$  tarkoittaa sen jännitettä. Kun saatu lukuarvo jaetaan vielä luvulla 3 600, saadaan energiayksikkö muunnettua jouleista wattitunneiksi (Wh), jolloin energiasisältöjen vertailu akkuihin nähden helpottuu huomattavasti. Teoriassa yhden Faradin (1 F) kokoinen superkondensaattori onkin mahdollista rakentaa vain 1 cm<sup>2</sup> elektrodipinta-alasta ja vain muutamien grammojen painoisista materiaaleista. Tarkasteltaessa kaupallisia superkondensattoreita voidaan havaita, että niiden energiatihedyydet vaihtelevat 0,5-30 Wh/kg tasolla, siinä missä niiden kapasitanssi voi yltää jopa 5000 Faradiin saakka. [65, s.73]

Tarkastellaan vielä puolijohdemarkkinoilla toimivan globaalien suuryrityksen Mouser Electronicsin kotisivuilta saatuja hintatietoja [67] muutamien superkondensaattorimallien osalta yhdessä muiden taulukkoon 3.3 kerättyjen tietojen kanssa. Näitä tietoja tarkastelemalla syntyy kuva kaupallisten superkondensaattoreiden nimellisarvoista sekä ennen kaikkea kustannustasosta.

**Taulukko 3.3.** Kaupallisten superkondensaattoreiden vertailu [66, 68-70].

Merkki ja malli	Nimellinen jännite (V <sub>DC</sub> )	Nimellinen kapasitanssi (F)	Jatkuvan virran kesto (A)	Maksimijännite (V)	Tilavuus (dm <sup>3</sup> )	Massa (kg)	Varastoitava energia (Wh)	Hinta (€)
Maxwell 160 V	160	5,8	7 / 12	750	6,81	5,2	21	1070
Maxwell 125 V	125	76	140 / 240	1500	5,46	61	140	6340
Ioxus iMOD	81	11,7	10	800	3,90	3,0	10,6	351
Kemet S01	81	11,6	10	750	3,9	3,0	10,6	961

Taulukosta 3.3 on jätetty pois tilan säästämiseksi kondensaattoreiden kestävyyttä ja käyttöolosuhteita kuvaavia tietoja, koska ne olivat lähes samanlaiset jokaisen merkin ja mallin osalta. Kaikkien superkondensaattorien syklisen eliniän odotusarvoksi oli ilmoitettu 1 000 000 sykliä. Kemetin moduulia lukuun ottamatta, jonka syklisen käyttöiän kestoksi oli ilmoitettu puolet tästä. Sen sijaan kalenteri-iän odotusarvoksi oli ilmoitettu kaikkien moduulien osalta 10 vuotta nimellijännitteisenä, mikäli moduulin lämpötila ei nouse

kuormituksen vaikutuksesta yli 25 Celsius-asteeseen tai 1000 tai 1500 tunnin tasoa, mikäli moduulia käytetään sen maksimilämpötilassa (n. 65 °C). Myös operointilämpötilalle oli asetettuna kaikkien tarkasteltujen moduulien osalta -40 – +65 °C. Huomioitavana on myös valmistajakohtaiset erot jatkuvan virrankeston osalta, sillä Maxwell ilmoittaa datalehdillään kaksi arvoa, jotka vastaavat 15 ja 40 asteen lämpötilannousuja, kun taas Ioxus ilmoittaa 20 asteen nousua vastaavan kuormitusvirran ja Kemetin datalehdeltä ei puolestaan löytynyt lainkaan tietoa moduulin lämpötilan muutoksesta nimellisvirtaa kohden. Nimellisvirrat jäivät näiden moduulien osalta yllättävänkin pieniksi, mutta noin sekunnin mittaisia pulsseja ne kykenevät tuottamaan mallista riippuen 170-200 A virralla, mutta tässä diplomityössä tarkasteltavassa sovelluskohteessa tarvitaan kuitenkin enemmän jatkuvaa tehoa kuin pulssimaisia virtapiikkejä.

Tarkasteltaessa taulukossa 3.3 esiteltyjen moduulien kustannuksia, havaitaan niiden energianvarastointikykyyn suhteutetun hintatason olevan 33 000-91 000 €/kWh välillä. Näistä edullisinta kustannustasoa edustaa Ioxus:ksen moduuli, mutta niiden minimi-tilausmäärä on 100 kappaletta, siinä missä muiden komponenttien kustannukset on luettu 1 kappaleen tilausmäärää vastaavasta arvosta. Toiseksi kallein on Maxwellin 125 V moduuli, jonka yksikkökustannus on noin 45 000 €/kWh. Kuvassa 3.23 on vielä esitettyinä viidestä Ioxus:ksen 80 V -moduulista kasattu käyttövalmis 400 V -moduuli, mistä saa hyvän näkemyksen superkondensaattoreiden ulkomuodosta ja moduulien sarjaankytkennän mahdollisuuksista.



**Kuva 3.23** Viidestä sarjaankytketystä Ioxus 80 V -moduulista kasattu superkondensattori [69].

Edellä mainituista tiedoista voidaan havaita ainakin superkondensaattoreiden erittäin korkeat käyttöiät niin ajallisesti kuin syklisenkin kuormituksen osalta. Toisaalta hintatarkastelusta selviää, että vaikka komponenttien yksikköhinnat eivät olekaan mitenkään erityisen korkeita, nousee varastoitavaan energiamäärään suhteutettu yksikköhinta monisata-

kertaiseksi litiumioniakustoihin nähden. Näin ollen ei voida ainakaan vielä katsoa superkondensaattoreiden tekevän tietään korkeaa varastointienergiaa vaativiin käyttökohteisiin, vaikka lyhyitä syklisiä kuormituksia matalalla energiatasolla käyttävissä sovellutuksissa ne voivat olla jo tänä päivänä hyvinkin kilpailukykyinen ratkaisu.

On kuitenkin pidettävä mielessä tulevaisuudessa mahdollisesti tehtävät innovaatiot, jotka voivat kyetä nostamaan yksittäisiinkin superkondensaattoreihin varastoitavaa energiamäärää jopa moninkertaiseksi nykytasoon verrattuna. Valitettavasti kaikki kaupalliset raportit, jotka käsitelivät superkondensaattoreiden kustannustasoa ja tulevaisuuden markkinatrendejä, osoittautuivat 3 000-5 000 dollarin hinnoillaan suhteettoman kalliiksi, joten syvällisempää analyysiä ei kustannustasojen trendeistä pystytty tekemään. Konsulttiyhtiö Sino-Reportin kesäkuussa 2014 laatiman raportin vapaasti saatavilla olevassa [71] esikat-selussa oli kuitenkin nähtävillä kaavio, joka paljastaa sähkökemiallisten kondensaattoreiden ennustettua kysyntää vuosien 2010-2020 välillä. Kyseinen kaavio on esitettyä kuvassa 3.24 ja siitä havaitaan selkeästi, kuinka erityisesti suurten kondensaattoreiden kysynnän oletetaan kasvavan. Kaaviossa hyvin suurilla kondensaattoreilla on tarkoitettu vähintään 100 F kokoisia ja keskikoon ja suurten osuudella puolestaan tarkoitetaan yli 1 F kokoisia kondensaattoreita. Vuosille 2011-2020 ennustettu vuosittaisen myyntivolyymin prosentuaalinen kasvu (CAGR -indeksi) on noin 11,3 prosenttia, mitä voidaan pitää hyvin merkittävänä tekijänä myös kustannustason laskua ajatellen.



**Kuva 3.24** Superkondensaattoreiden myyntivolyymin kasvuennuste lähivuosille, muokattu lähteestä [71].

Teknisestä kehitystyöstä ja sen tuloksista esimerkkinä mainittakoon Tekniikka & Talous -lehdessä 23.4.2014 julkaistu artikkeli [72], jossa esiteltiin kehitteillä olevaa atomitason hiilirakenteista kehitettyä prototyyppiä. Esitelty malli tuotti laboratorio-olosuhteissa jopa 3 kertaisen kapasiteetin aiemmin tutkittuihin nanoputkirakenteen kondensaattoreihin, joita niitäkään ei ole vielä kaupallisesti saatavissa.

## 4 SOVELLUSKOHTTEEN ESITTELY

Tässä luvussa esitellään Elematic Oyj:n toimittamien tuotantolinjastojen perusrakenne sekä linjastoilla käytettävät työkoneet. Myös ne koneet, joiden osalta ei tämän työn puitteissa tehdä tarkempaa suunnittelua akkukäyttöjen osalta esitellään lyhyesti. Sen jälkeen kappaleessa 4.2 käydään läpi eri tuotanto- ja työsykleihin liittyvät energiatarpeet sekä mahdolliset latausajat, joiden haasteisiin suunniteltavan akkutekniikan tulisi kyetä vastaamaan ja valitaan esittelyyn muutama laite, joiden mahdollisuudet akkutekniikan soveltamiselle koetaan järkeviksi.

Prosessikuvauksen laatimisessa on hyödynnetty Elematic Oyj:ltä saatuja laite- ja taustatietoja valuprosessin tarkemmasta selvityksestä ja laitehierarkiasta. Koneiden energiatarpeiden suhteuttamisesta tutkittaviin tuotanto- ja työsykleihin vastasi Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan opiskelija Teemu Heiska, jonka tehtävänä oli suunnitella tarkasteltaviin sovelluskohtaisiin latausjärjestelmä oman opinnäytetyönsä [73] puitteissa.

### 4.1 Tuotantoprosessin esittely sovellustasolla

Käydään nyt läpi ontelo- ja seinälaattalinjaston tuotantolinjojen prosessikuvaukset ja samassa yhteydessä kuvataan lyhyesti kaikki prosessilaitteet sekä niiden työvaihekuvaukset. Tämän jälkeen kappaleessa 4.3 tarkastellaan tarkemmin kahta, akkutekniikan soveltamisprosessin aloitusvaiheeseen, valittua laitetta, joiden osalta tehdään vielä luvun 6 yhteydessä tarkempi suunnittelu akkukäyttöön siirtymisestä.

#### 4.1.1 Ontelolaattalinjan prosessikuvaus

Elematic Oyj valmistaa erikokoisia ontelo- ja seinälaattalinjastoja asiakastilausten mukaisesti. Näillä tuotantolinjastoilla valmistetaan eri paksuisia ja mittaisia ontelo- ja seinälaattoja erityyppisiin rakennusprojekteihin. Myös laattojen leikkaukset sekä onteloiden keskinäinen etäisyys ja niiden halkaisijat eroavat riippuen valmistettavasta laattatyypistä sekä käyttötarkoituksesta. Valmistettavien linjastojen pituudet vaihtelevat, mutta tyypillisesti pituutta on 120-200 metriä. Myös laattojen paksuus vaihtelee, mutta yleisimmin tuotettavat laattapaksuudet ovat 160-500 millimetriä. Asiakkaille tarjottavia linjastovaihtoehtoja on yhteensä kolme kappaletta, SEMI-, PRO- ja EDGE-linjastot, joista jokainen on muokattavissa täysin asiakkaiden toiveiden ja tarpeiden mukaiseksi, joten myöhemmin eri linjastotyypeistä puhuttaessa tarkoitetaan eri linjastotyyppien konseptimalleja. Näistä SEMI-linjasto on käytännössä edullisin, mutta sen automatisointiaste, tuotantokapasiteetti sekä tuotantovalikoima ovat vain murto-osa EDGE-linjaston tasosta, kun taas PRO-linja osuu näiden välimaastoon. Esimerkiksi harjakoneena toimivan Preparerin ajo tapahtuu SEMI- ja PRO- linjastoilla varikkotyöntekijän (myöh. operaattori) toimesta,

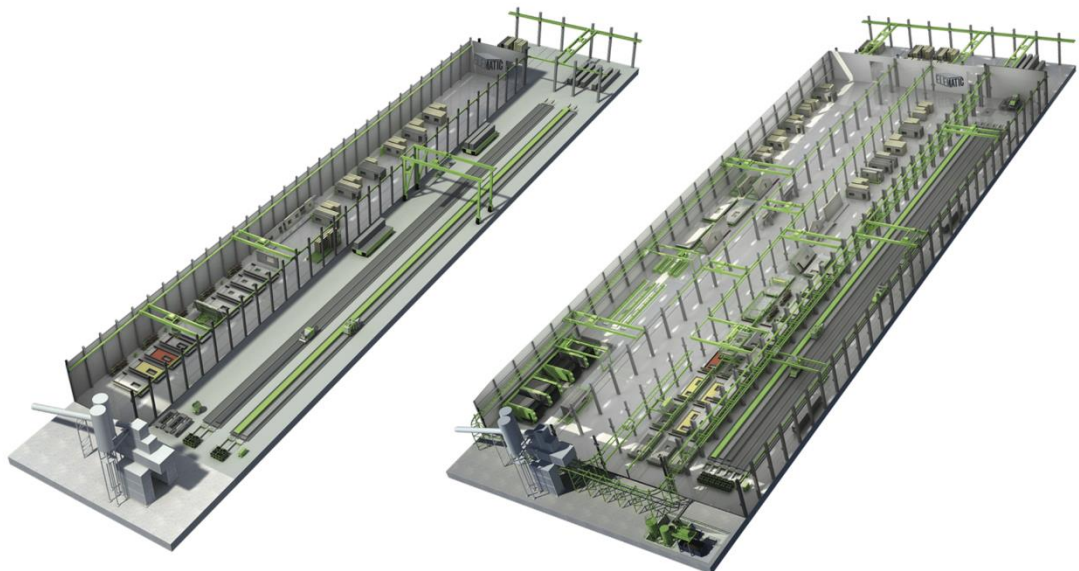


mutta EDGE -konseptissa sekä Preparerin, että nosturin toiminnot on automatisoitu. Kaikkien linjastojen peruseriaate on samanlainen, linjastojen keskellä on muottivalu-pöydistä koostuva seinälaattalinjasto ja oikeassa reunassa taas ontelolaattalinjasto. [74]

Tässä prosessikuvauksessa keskitytään näistä optioista kaikista edistyneimmän EDGE-linjaston toimintaan, vaikka muilla linjastoilla käytetään hyvin pitkälti samoja työmenetelmiä ja -laitteita. Taulukossa 4.1 on esitettyinä näiden kolmen linjaston tuotantokapasiteetit sekä vaaditut henkilöstöresurssit jaoteltuna sen mukaan, kumman tuoteperheen tuotteita valmistetaan. Tämän lisäksi kuvassa 4.1 on esitettyinä PRO- ja SEMI linjastojen havainnekuvat ja liitteessä 3 on suurennettu kuva EDGE-linjastosta.

**Taulukko 4.1.** *Konseptitehtaiden kapasiteetit sekä henkilöstöresurssit [75].*

<b>Linjatyyppe</b>	<b>Kapasiteetti</b> (seinälaatta), m <sup>2</sup> /vrk	<b>Kapasiteetti</b> (ontelolaatta), m <sup>2</sup> /vrk	<b>Henkilöstö</b> (seinälaatta), henkeä	<b>Henkilöstö</b> (ontelolaatta), henkeä
SEMI	280 - 600	144 - 576	10	9
PRO	680 - 1200	1080	15 - 20	7
EDGE	1600 - 3024	2880	30 - 35	10



**Kuva 4.1** *Tuotantolinjastojen havainnekuvat, vasemmalla SEMI- ja oikealla puolella PRO- linjasto [75].*

Kaikki linjaston päällä toimivat laitteet nostetaan valupedille operaattorin käyttämällä nostimella ja ne ovat sähkötoimisia. Koneiden käyttämä sähkö johdetaan laitteiden moottorikäyttöille suurelta kaapelirummulta, jonka pistotulppa liitetään pedille noston yhteydessä linjaston päässä olevaan kolmivaiheiseen pistokeliitäntään. Muutamia poikkeuksia-

kin löytyy, sillä tiettyjen markkinasegmenttien varalle on harjakoneena toimivasta Preparer E9:stä valmistettu myös nestekaasulla tai dieselillä toimivia malleja. Näiden käyttöä on kuitenkin rajoitettu Euroopan unionin alueella voimassa olevien määräysten takia, joten tämä diplomityö keskittyy vain sähkökäyttöisten, pistotulppaliitännäisten laitteiden muuntamiseen akkukäyttöisiksi.

Ennen linjastolla suoritettavaa valua valupeti puhdistetaan operaattorin pedille nostamalla Preparer E9 -mallisella harjakoneella (myöh. Preparer). Tämän jälkeen Preparer lähetetään takaisin linjan päähän, minne se vetää laatan sisään valettavat teräspunokset ja öljyä samalla pedin päällä olevan valualustan. Mekaanisia työvaiheita ovat Preparerin nostaminen alustalle, syöttöjohdon kiinnitys seinärasiaan, puhdistustuloksen silmämääräinen tarkistaminen, punosten asentaminen Preparerin vetopalkkiin, koneen nosto pois pediltä sekä koneen käynnistämiset aina linjan alkupäästä alkavien työvaiheiden alussa. Tämän jälkeen punokset esijännitetään nippujännityslaitteella ja tässä konseptissa välikuljettimelta virtansa ottava valukone siirretään linjan päätyyn sijoitetulta huoltopukilta pedille. Valukone tilaa ohjelmaan syötetyn laattakoon mukaisen määrän betonia linjan loppupäässä sijaitsevalta betoniasemalta, mistä betonin kuljettamiseen käytettävä sukkula toimittaa betonin valukoneelle. Tämän jälkeen valukone aloittaa valamisen luoden samalla valetun laatan sisään määrätyn halkaisijan mukaiset ontelot. Pedin lopussa valukone ja sen suuttimet pestään pesuaseman automaattipesureiden avulla ja se siirretään seuraavalle vapaalle pedille sekä aloitetaan pedin lämmitys. Valukonetta seuraa laattoihin nostolenkit asettava lenkkikone (myöh. Looper), joka ottaa sähkönsyöttönsä kaapelirummulta tai eräässä konseptitehtaassa linjastolla Looperia seuraavalta jyrsimeltä (myöh. Modifier). Looperin tehtävänä on tehdä reiät valettuun laattaan ja asentaa niihin nostolenkit ja Modifierin tehtävänä on puolestaan leikata urat aukkojen leikkauskohtiin sekä tehdä muut tarvittavat syvennykset ja urat. [76]

Laatan kovettumisen jälkeen laattojen poikittais- ja vinoleikkaukset sahataan Saha E9-500 -laitteella, minkä jälkeen sahatut laatat siirretään nostimella kuljettimelle ja petien päähän jätetään 10 metrin vapaa ja turvallinen työskentelyalue. Seuraavassa vaiheessa laatat kuljetetaan linjastotyypistä riippuen joko vesileikkausasemalle tai halkaisusahalle, minkä jälkeen ne siirretään niputettuina kuivumaan ja odottamaan varastointia sekä kuljetusta. [76]

#### **4.1.2 Seinälaattalinjan prosessikuvaus**

Samaisessa tuotantohallissa tapahtuva seinälaatan tuotanto eroaa kuitenkin merkittävästi edellä esitellystä ontelolaatan valuprosessista. Seinälaattoja ei valmisteta valupedeillä kuten ontelolaattojen tapauksessa tehtiin, vaan tuotantoa varten valmistetaan asiakkaan määrittelemän kokoisia valumuotteja, joiden kokoa ja muotoa säädetään vielä erikseen muotin sisään aseteltavilla laidoilla. Tämän jälkeen asetetaan raudoitukset ja muotit tehtäviä aukkoja varten ja lopuksi betoni valetaan muottiin linjastolla olevan valukoneen

kautta, joka saa tarvitsemansa betonin samaiselta sukkulalta kuin ontelolaattalinjaston valukonekin. Valujen jälkeen pintakerrokseen jääneet epätasaisuudet hiotaan ja poikkisiirtopalkit huolehtivat kovettuneiden laattojen kuljettamisesta eri prosessipisteiden välillä. [73, s. 17-18]

Kyseessä on siten ontelolaattalinjastoon nähden täysin erityyppinen prosessi, mutta kuten taulukosta 4.1 havaittiin, ei seinälaattalinjastoa pystytä automatisoimaan yhtä pitkälle kuin ontelolaattalinjaston tapauksessa. Kuitenkin pienikokoinen ja kohtuullisen vähäisellä energiantarpeella toimiva poikkisiirtopalkki herätti jo työn alkuvaiheessa käydyissä palavereissa kiinnostusta akkukäyttöä pohdittaessa. Näin ollen kappaleessa 4.2 tarkasteltavien ontelolaattalinjaston työkonoiden energiankulutuslaskelmien yhteyteen päädyttiin ottamaan mukaan myös lyhyt tarkastelu tämän poikkisiirtopalkin osalta.

## 4.2 Prosessilaitteiden energiatarpeet

Tarkastelemme seuraavaksi edellä esitettyjen kolmen linjatyyppin välillä ilmeneviä eroja prosessilaitteiden energiankulutuksissa sekä mahdollisissa latausajoissa. Tämän ja seuraavan kappaleen kirjoittamisessa on käytetty osittain hyväksi Heiskan tekemää tutkimusta [73] ja esitettävät laskelmat perustuvat hänen työnsä tuloksiin sekä Elematic Oyj:lta saatuihin lähtötietoihin.

Mahdollisia lataustilanteita syntyy valettujen petien välillä, tilanteissa ennen kuin käytettävä laite siirretään tekemään toista petiä sekä viimeisen pedin jälkeisestä hetkestä seuraavan työvuoron aloittaman uuden pedin valuprosessiin. Näistä viimeisin tilanne mahdollistaa pisimmät latausajat, mutta tietysti mahdollisuuksien salliessa, kannattaa akkuja ladata aina kun mahdollista, jotta laitteisiin pystytään optimoimaan mahdollisimman pieni ja siten kustannustehokas akkuratkaus. On myös huomattava, ettei päivän aikana tehtävien työvuorojen määrällä ole merkitystä laitteiden energiankulutuksiin tai syklien välisiin latausaikoihin. Sen sijaan tällä on selkeä vaikutus viimeisen valupedin jälkeen jäävään latausaikaan, minkä johdosta akkujen lataaminen on suoritettava sitä nopeammin, mitä tiheämmin työvuoroja tuotantolaitoksessa tehdään. Prosesseissa kuluvat energiamäärät on laskettu työvaiheiden kestojen sekä koneiden nimellistehojen mukaan siten, että laskelmissa on hyödynnetty taulukossa 4.2 esitettyjä korjauskertoimia. Kyseiset nimellistehot on laskettu eri työvaiheissa käytettävien sähkömoottoreiden ja apulaitteiden yhteenlasketuista nimellistehoista ja korjauskertoimet perustuvat tunnettujen kuormitusten sekä Elematic Oyj:n tekemien käytännön havaintojen suhteuttamisesta näihin nimellistehoihin.

**Taulukko 4.2.** Korjauskertoimet laitteiden energiankulutuksen laskentaan [77, 78].

Kone ja työvaihe	Nimellisteho (kW)	Korjauskerroin	Todellinen teho (kW)
Preparer: harjaus	16,0-23,0	0,9	14,4-20,7
Preparer: ajo linjalla	5,0	0,3	1,5
Preparer: punosten veto	5,0	0,9	4,5
Preparer: alustan öljyäminen	5,0	0,5	2,5
Valukone: laatan valu	43,2	0,8	34,6
Looper: ajo, kohdistus ja lenkitys	52,4	0,5	26,2
Modifier: ajo, kohdistus ja jysintä	49,9	0,5	25,0
Saha: sahaus	63,1	0,9	56,8
Saha: ajo linjalla	61,7	0,35	21,6

Taulukon 4.2 tiedoista havaitaan, kuinka Preparerin harjausvaiheelle on esitettyä kohtalaisen laaja-alainen nimellistehoalue. Tämä on seurausta sähkökäyttöiseksi muunnettavan Preparerin eri variaatioista, joita ovat täyssähkökäyttöinen ja puoliksi hydraulikkamootorikäyttöinen malli sekä optiona oleva imurilaitteisto. Muissa työvaiheissa eroa ei synny, koska suunnitelmissa ei ole ollut tehdä erilaisia mallivariaatioita itse ajomoottoreiden osalta. Esitetyt eroavaisuudet Preparerin nimellistehoissa syntyvät 3 kW imurilaitteiston sekä 11 kW sähkömootorikäyttöisen ja 15 kW hydraulikkamootorikäyttöisen harjalaitteiston välisistä valinnoista, joita tarkastellaan tarkemmin luvussa 4.3.1.

Taulukoissa 4.3-4.5 esitetyt energiankulutus- ja latausaikalaskelmat on suoritettu PRO- ja EDGE-mallin tuotantolinjoille, joten pienimmän SEMI-linjaston prosessia ei tässä yhteydessä käydä läpi. Suurin ero eri linjastokonseptien välisissä energiankulutuksissa johtuu valupetien pituuksien vaihteluista, sillä näiden linjastokonseptien kokonaispituudet vaihtelivat 600 metristä aina 900 metriin, mutta myös valettavan laatan paksuus vaikuttaa valuprosessiin osallistuvien laitteiden energiankulutuksiin. Huomattavaa on, että eri laatapaksuuksien väliset erot koneiden energiankulutuksissa eivät selity konetehtojen vaihteluista, vaan työvaiheiden kestojen eroavaisuuksista. Taulukoissa esiintyvistä termeistä *E* kuvaa sähköenergian määrettä, *työkierto* tarkoittaa prosessia, missä kaikki ontelolaattalinjaston pedit käydään läpi yksi kerrallaan ja lisäksi *viimeisen pedin jälkeisellä latausajalla* tarkoitetaan käytännössä kahden työkierron väliin jäävään aikaa.

**Taulukko 4.3.** *Energiankulutukset ja latausajat 6 x 150 m PRO-linjastolla, muokattu lähteestä [73, s. 22].*

<b>Kone</b>	<b>E / peti (kWh)</b>	<b>E / työkierto (kWh)</b>	<b>Latausaika tehdyn pedin jälkeen (h)</b>	<b>Latausaika viim. pedin jälk. (h)</b>
Preparer	3,5	20,7	0-0,5	14,5
Valukone (200 mm)	43,2	259	0	13,9
Valukone (380 mm)	57,6	346	0	13,9
Valukone (500 mm)	86,4	518	0	13,9
Looper	5,6	33,6	0	13,9
Modifier	8,3	49,9	0-0,4	14,2
Saha (200 mm)	25,2	151	0-0,7	13,2
Saha (380 mm)	41,5	249	0-0,7	13,2

**Taulukko 4.4.** *Energiankulutukset ja latausajat 4 x 150 m EDGE-linjastolla, muokattu lähteestä [73, s. 23].*

<b>Kone</b>	<b>E / peti (kWh)</b>	<b>E / työkierto (kWh)</b>	<b>Latausaika tehdyn pedin jälkeen (h)</b>	<b>Latausaika viim. pedin jälk. (h)</b>
Preparer	3,5	13,8	0,5	6,0
Valukone (200 mm)	43,2	173	0	5,3
Valukone (380 mm)	57,6	230	0	5,3
Valukone (500 mm)	86,4	346	0	5,3
Looper	5,6	22,4	0	5,3
Modifier	8,3	33,3	0	5,6
Saha (200 mm)	25,2	101	0,6	6
Saha (380 mm)	41,5	166	0,6	6

**Taulukko 4.5.** *Energiankulutukset ja latausajat 4 x 200 m EDGE-linjastolla, muokattu lähteestä [73, s. 23].*

<b>Kone</b>	<b>E / peti (kWh)</b>	<b>E / työkierto (kWh)</b>	<b>Latausaika tehdyn pedin jälkeen (h)</b>	<b>Latausaika viim. pedin jälk. (h)</b>
Preparer	4,6	18,4	0,5-1,5	17,2
Valukone (200 mm)	57,6	230	0-0,5	16
Valukone (380 mm)	76,8	307	0-0,5	16
Valukone (500 mm)	115	461	0-0,5	16
Looper	7,8	31,0	0-1,3	15,5
Modifier	11,0	44,2	0,6-1,6	17
Saha (200 mm)	33,6	134	0	19,5
Saha (380 mm)	55,3	221	0	19,5

Näistä vaihtoehtoisista linjastotyypeistä kuuden valupedin PRO-linjaston kokonaispituus on 900 metriä ja siinä tehdään kahta työvuoroa noin 16 tunnin jakson aikana. Sen sijaan neljällä 150 metrin valupedillä ja 600 metrin kokonaispituudella varustettu EDGE-linjasto toteutetaan kahdella työvuorolla, mutta työvuorojen sijoittelu johtaa siihen, että laitos pyörii lähes vuorokauden ympäri, jolloin yhtenäistä latausaikaa jää hyvin niukasti. Kolmas vaihtoehto on neljästä 200 metrin valupedistä muodostuva EDGE-linjasto, joten se jää 800 metrin kokonaispituudellaan kahden muun linjastotyyppin välille. Tässä 200 metrin EDGE-linjastossa tehdään kolmea työvuoroa, mutta kaikki työvuorot ovat limitäisiä päivävuoroja, jolloin työpäivän kokonaispituus jää 12 tuntiin. Raportissa [79] on listattuna kaikkien linjastotyyppien työvaihekaaviot, joista käy ilmi eri laitteiden käyttöajat, työvuorojen ajoittuminen sekä Preparerin, Looperin ja Modifierin osalta mahdolliset latausajat ja petikohtaiset energiankulutukset.

Huomattavaa on myös, etteivät taulukossa 4.2 esitetyt vaihteluvälit Preparerin harjausprosessin vaatimissa nimellistehoissa näy taulukoiden 4.3-4.5 energiankulutuslaskelmissa. Selkeyden vuoksi näihin taulukoihin on laskettuna ainoastaan ensimmäisestä suunnitellusta Preparerin prototyypistä syntyvät energiankulutukset. Tämä malli edustaa täys-sähköversiota maltillisempaa toteutusta yhdistettynä optiona olevaan 3 kW imurilaitteistoon, mistä käytetään myöhemmin nimitystä *välimallin Preparer*, mutta näiden eri mallivariaatioiden välisiä eroja tarkastellaan täsmällisemmin kappaleessa 4.3.1.

Taulukoista 4.3- 4.5 havaitaan selvästi, kuinka valukoneen ja sahan vaatimukset energiamäärille ovat huomattavasti korkeammat kuin muiden tarkasteltavien laitteiden. Koska tämän diplomityön tavoitteena oli löytää muutama laite, joista prototyyppien suunnittelu ja valmistus olisi järkevintä aloittaa, voidaan suoraan jättää tässä kohtaa nämä kaksi laitetta pois tarkastelusta. Perusteena tälle on selkeästi kustannuspainotteinen kysymys, sillä akkukapasiteetin on riitettävä näiden laitteiden kohdalla koko työkierron ajaksi, koska petien väliin ei jää oikeastaan yhtään latausaikaa näiden laitteiden osalta. Joissain tapauksissa taulukoiden 4.3-4.5 tiedoissa on ilmoitettu pieni vaihteluväli petien väliselle latausajalle, mikä selittyy prosessien kestojen vaihteluilla ja prosessien ajallisen keston ennusteen epätarkkuudella. Vaihteluvälit ovat kuitenkin pieniä, eivätkä vaikuta oleellisesti tässä diplomityössä tarkasteltavan akkujärjestelmän suunnitteluun. Koska jokaisella tuotantolinjalla on oltava valmius tuottaa jokaista laattapaksuutta, käytetään seuraavissa akkukennojen kustannuslaskelmissa 500 mm laattapaksuutta ja taulukosta 4.4 selviävää lyhyimmän tuotantolinjan energiankulutusta sekä sitä todellisesta toteutuksesta poikkeavaa oletusta, että akut mitoitettaisiin 100 % DoD -arvon tasolle. Sen sijaan kahdessa muussa esimerkitapauksessa eli taulukoiden 4.3 ja 4.5 mukaisilla energiankulutuksilla, joudutaan akkukapasiteetti varaamaan vieläkin suuremmaksi.

Näin ollen, käytettäessä esimerkiksi sarjatuotannon mahdollistamaa, suhteellisen matalaa 200 €/kWh kustannustasoa hyvin karkeana arviona lähivuosien litiumioni -tekniikan akuille, nousevat jo yksistään akkujen kustannukset pelkän sahan osalta yli 33 000 euroon

ja valukoneen osalta yli 69 000 euroon. Kokonaisuudessaan voidaan arvioida, että lyijy-akut eivät muodostu ainakaan lähitulevaisuuden osalta juuri sen edullisemmaksi vaihtoehdoksi, sillä tämän päivän yleinen kustannustaso lyijyakuille on noin 130 €/kWh [80]. Lisäksi mahdolliset lähivuosien rajoitteet lyijyn käyttämiselle eri akkusovelluksissa voidaan arvioida jopa nostavan tämän akkutyypin hintaa tai jopa estää sen käyttäminen tämän diplomityön sovelluskohteissa. Akkutekniikan käyttöönottoa ja toteutussuunnitelmaa esittelevässä seitsemännessä luvussa tarkastellaan kuitenkin vaihtoehtoisten akkutyypin tämän päivän kustannustasoa tarkemman selvityksen piiriin valittujen koneiden osalta.

Näiden tietojen pohjalta voidaan alustavasti valita ainakin harjakone soveltuvaksi tarkempaan tutkimukseen akkukäyttöihin siirtymistä varten, mutta katsotaan vielä aiemmin esitetyn, seinälaattalinjalla käytettävän poikkisiirtopalkin energiankulutusta taulukon 4.6 mukaisesti.

*Taulukko 4.6. Poikkisiirtopalkin energiankulutus eri tilanteissa [73, s. 24].*

Työvaiheen siirtojen määrä	Energiankulutus (kWh)
1	0,11
4	0,37
10	0,89

Poikkisiirtopalkin tapauksessa havaitsemme sen nostojen määrästä riippuvaisen energiankulutuksen pysyvän hyvin alhaisena, jopa maksimaalisessa kuormitustilanteessa, joten tämä laite on jo näiden tietojen puitteissa hyvin selvä valinta Preparerin ohella, kun lähdetään tekemään tarkempaa tarkastelua akkutekniikan osalta. Poikkisiirtopalkin tapauksessa rajoitteeksi asettuu ainakin lyijyakkujen osalta akkupaketille varatun tilan pieni koko, mitä varten superkondensaattoreiden kustannustasoa tutkittiin luvussa 3, mutta tästä suunnitelmasta luovuttiin superkondensaattoreiden €/kWh -kustannusten selvittyä.

### 4.3 Tarkempi tutustuminen akkukäyttöille valittuihin työkoneisiin

Nyt tarkastelun kohteena ovat edellisessä luvussa valitut kaksi laitetta, ontelolaattalinjaston Preparer E9 -harjakone sekä seinälaattalinjaston poikkisiirtopalkki, joiden katsottiin soveltuvan parhaiten tämän diplomityön seitsemännessä luvussa tehtävään toteutussuunnitelmaan. Tämä toteutussuunnitelma tuleekin pitämään sisällään niin akkujärjestelmän toteuttamiseen vaadittavat laitekohtaiset komponenttivalinnat ja laadittavat sähkökaaviot, kuin myös akkutekniikkaan siirtymisen edellyttämien käytännön järjestelyiden selvittämisen.

Koska laitteiden energiankulutukset on laskettu käyttäen korjauskertoimia, jotka ottavat huomioon keskimääräisen tehon petiä kohden, pitää myös tarkasteluun valittujen koneiden huipputehot selvittää, jotta käytettävien akkujen virranantokyky riittää kaikissa toimintavaiheissa. Esimerkiksi Preparerin tapauksessa nähdään taulukosta 4.2, että harjauksen aikana koneen teho tarve on keskimäärin noin 17 kW, mutta on varmempaa mitoittaa akut niin, että niiden virranantokyky riittää koko 19 kW teholle.

Lisäksi akkujärjestelmää suunniteltaessa, on huomioitava tehdasalueiden käyttöolosuhteet, sillä Elematic Oyj:n voidaan markkinajohtajana katsoa toimittavan tuotantolinjarkaisuja lähes kaikkialle maailmaan. Keskeisimpänä kriteerinä onkin ympäristön lämpötila, jonka voidaan katsoa liikkuvan yleisimmin +10 – +30 °C välimaastossa, vaikka Elematic Oyj:n tuotantolinjoja löytyy kyllä myös esimerkiksi kuumilta Lähi-Idän ja Intian alueilta. Näiden kuumimpien alueiden soveltuvuutta ei kuitenkaan koettu tarpeelliseksi tutkia tämän diplomityön yhteydessä. Tämä selittyy sillä, että näillä maantieteellisillä alueilla esiintyvät alhaisemmat työvoimakustannukset ja lainsäädännölliset velvoitteet, esimerkiksi nestekaasun käyttämisestä Preparerin polttoaineena, joten akkukäyttöihin siirtyminen koskee tässä vaiheessa ensisijaisesti vain Euroopan ja Yhdysvaltojen markkina-alueita.

### 4.3.1 Preparer

Kuten kappaleen 4.1.1 prosessikuvauksesta jo selvisi, hoitaa kuvassa 4.2 esitetty operaattorin ohjaama Preparer tuotantolinjan puhdistuksen ennen betonivalua. Operaattori tarkkailee ajon aikana pedin pintaa ohjaamon monitorista käsin ja suorittaa harjauksen uudelleen, mikäli sen lopputulos ei ole toivottu.

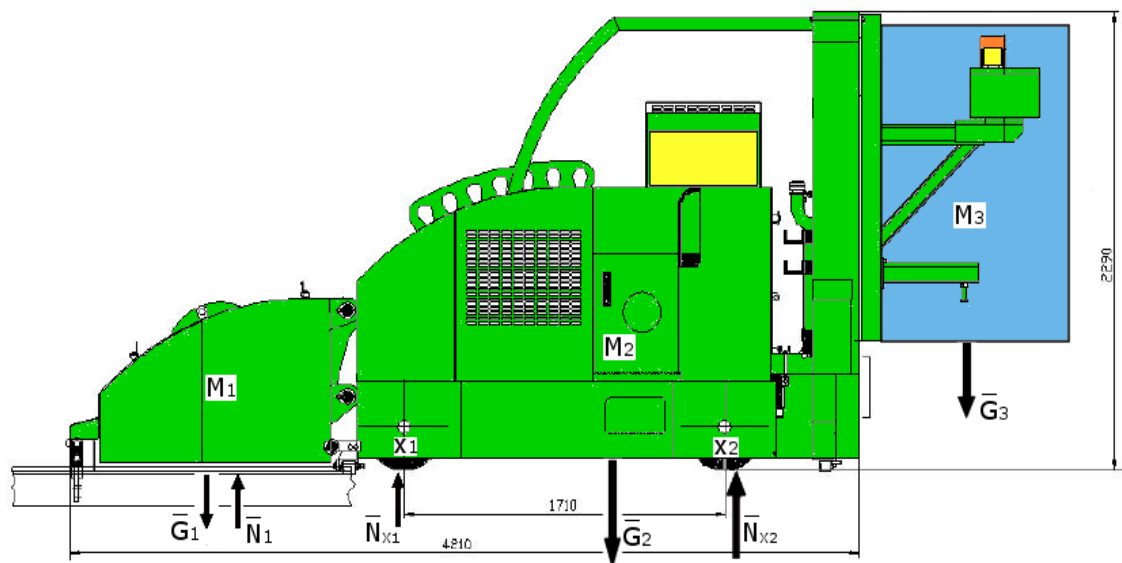


*Kuva 4.2 Preparer E9:n havainnekuva [73, s. 10].*



Preparerin sähkönsyöttö on hoidettu lähes kaikkien markkinasegmenttien osalta suuren kaapelirummun kautta, joka asennetaan kiinteästi laitteen takaosaan. Koska koneiden teknisen käyttöiän arvio on noin 30 vuotta, mutta kaapelirummulle laskettu käyttöikä on vain puolet tästä [81], tulee kaapelirummuista aiheutuvat kustannukset suhteuttaa vertailtavien akkujärjestelmien ikään. Joka tapauksessa kaapelirummun hankintatarve poistuu heti siinä vaiheessa, kun asiakas tilaa itselleen Preparerista nyt suunnitteilla olevan akkukäyttöisen mallin, jolloin osa rummun kustannuksista voidaan vähentää akkujen hankintakuiluista.

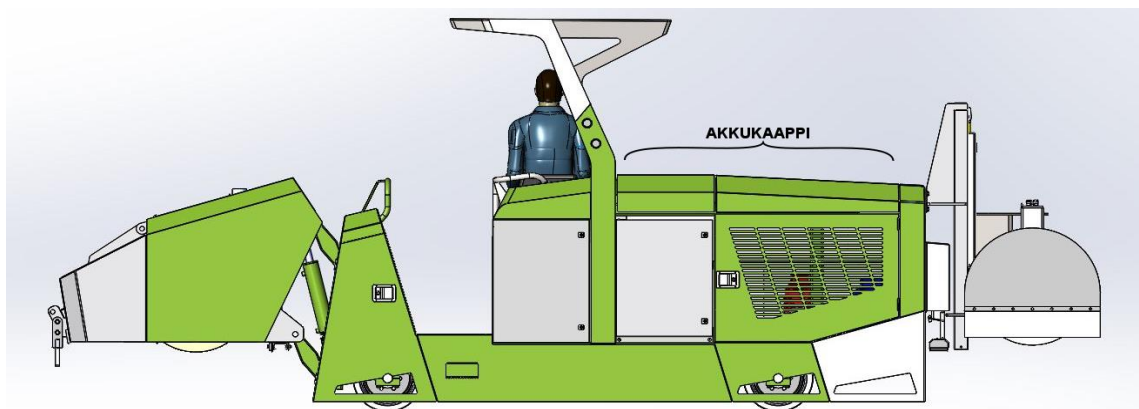
Koska kone liikkuu valupedin päällä kiskojen varassa, saadaan koneen massaa lisäämällä kasvatettua vetävien pyörien kitkaa, mistä on erityisesti hyötyä punosten vedossa. Lisäksi suurempi kitka vetopyörillä mahdollistaa hydraulikkakoneiston avulla tapahtuvan harjan voimakkaan painamisen pedin pintaan, joten ainakin periaatteessa harjaustulosta voitaisiin tehostaa koneen massaa lisäämällä. Näin ollen ensimmäinen ajatus oli, että akkupaketin painoa kasvattamalla saataisiin samalla parannettua harjaustulosta ja vähennettyä uusintaharjausten tarvetta. Tämä ajatus puolsi samalla edullisten lyijyakkujen hankintaa. Myöhempi tutustuminen koneen rakenteeseen paljasti, että Preparerin takaosaan, kaapelirummun tilalle, suunniteltu akkupaketti tulisi joka tapauksessa koneen taaimmaisen akselin takapuolelle, jolloin akkupaketin tuoma lisäpaino keventää koneen etuosaa ja siten vähentää Preparerin vetopyörien kitkaa, mikä havaitaan myös kuvasta 4.3.



**Kuva 4.3** Preparerin luonnos, johon hahmoteltu petiharjan massa ( $M_1$ ), koneen massa ( $M_2$ ) sekä lisättävän akkupaketin massa ( $M_3$ ). Näistä edellä mainituista massoista muodostuvat, Preparerin eri osiin vaikuttavat gravitaatiovoimat sekä pinnan tukivoimat ( $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  ja  $N_1$ ,  $N_{x1}$ ,  $N_{x2}$ ) ovat havaittavissa kuvasta. Kuvassa voimavektorien pituudet poikkeavat todellisesta mitastaan havainnollisuuden takia, muokattu lähteestä [82].

Kuten kuvasta 4.3 havaitaan, Preparerin takaosaan lisättävä akkupaketti ja sen massa  $M_3$  kasvattaa taka-akselin  $x_2$  ja pedin pinnan välistä tukivoimaa  $N_{x2}$  ja samalla pienentää tukivoimia  $N_1$  ja  $N_{x1}$ . Tilanne olisi täysin toisenlainen, mikäli akkupaketti saataisiin sijoitettua akseleiden  $x_1$  ja  $x_2$  välille, mutta tämä tarkoittaisi käytännössä akkupaketin siirtämistä Preparerin yläpuolelle tai akseleiden  $x_1$  ja  $x_2$  uudelleensijoittamista. Optiona koneen yläpuolelle sijoitettava akkupaketti voisi ensi alkuun kuulostaa houkuttelevalta, mutta on muistettava, että SEMI- ja PRO- linjastotyyppien tapauksessa Prepareria ajaa fyysisesti koneen sisällä istuva operaattori eikä varsinkaan lyijyakkuja ole turvallisuussyistä mahdollista asentaa kuljettajan yläpuolelle ja toiseksi akkujen huoltaminen ja mahdollinen irrotus lataamista varten vaikeutuu huomattavasti tällä asennustavalla. Näin ollen on järkevämpää pitäytyä alkuperäisessä suunnitelmassa, missä akut asennetaan Preparerin takaosaan kaapelirummun tilalle, mutta mekaanisessa suunnittelussa tulee huomioida akuston tuoman lisäpainon vaikutus petiharjan toimivuuteen.

Myös Elematic Oyj:n suunnittelijat huomioivat saman asian omien havaintojensa pohjalta, joten mekaanisessa suunnittelussa päädyttiin siirtämään akkukäyttöisen Preparerin prototyypin taka-akselia taaemmaksi, jolloin akkupaketti tulee sijaitsemaan toivotusti akseleiden välissä eikä kuvan 4.3 mukaista petiharjan ja pedin pinnan välisen tukivoiman heikkenemistä tapahdu. Tästä lähtökohdasta siirryttiin suunnittelussa siihen, että todennäköisin toteutusratkaisu tulevaisuudessa rakennettavassa prototyypissä muistuttanee kuvan 4.4 mukaista ratkaisua, missä akusto ja sen oheislaitteet ovat suljetussa sähkökaapissa laitteen takaosassa. Tässä mallissa akustolle suunniteltu tilavaraus on leveydeltään 1000 mm, korkeudeltaan 800 mm ja pituudeltaan sellainen, että alle 400 mm korkeudella käytävissä on 800 mm ja tämän yläpuolella n. 1 500 mm. Tavoitteeksi asetettiin kuitenkin pyrkimys saada akut pysymään taka-akselin etupuolella, joten akkukaapin ylätasanteella (yli 400 mm korkeudessa) käytettävissä oleva laajennustila pyritään jättämään vapaaksi.



**Kuva 4.4** Hahmotelma Preparer E9:n prototyypistä, missä akusto ja sen oheislaitteet ovat sijoitettuna laitteen takaosaan, muokattu lähteestä [83].

Kuvassa 4.4 esitetty ratkaisu mahdollistaa myös korkeampien jännitetasojen käyttämisen akustossa tai sen oheislaitteissa, kuten DC -boosterissa, sillä akkukaapista on mahdollista

tehdä lukittava, mikä estää muiden kuin koneen huoltoon perehdytettyjen henkilöiden pääsyn korkeajännitteisten komponenttien ulottuville.

Preparerin tapauksessa kaapelirummun sähkönsyöttö on hoidettu kolmivaiheisella BUFLEX -kaapelilla, missä johtimien poikkipinta-ala on  $25 \text{ mm}^2$  ja nimellinen liitäntäteho Preparerin datalehden mukaisesti 25 kW. Syöttö tapahtuu keskukselta tätä kaapelia pitkin  $400 \text{ V}_{AC}$  jännitteellä (50 Hz), mistä se ohjataan suoraan esimerkiksi oikosulkumoottoreiden käyttöön sekä tasasuuntaajien kautta 12 ja  $24 \text{ V}_{DC}$  jännitetasoilla eri apulaitteiden käyttöön. Lisäksi kaikkien sähkölaitteiden maadoitus on hoidettu koneen runkoon ja kaapelirummun maadoitusjohtimeen kytketyn PE-kiskon kautta. [77, 82]

Preparerin uudessa E9 mallissa ovat lisänä myös kuvassa 4.2 näkyvä koneen takaosasta löytyvä käytäväharjo sekä koneen petiharjan päällä näkyvä 3 kW imurilaitteisto, joka tulee olemaan asiakaskohtainen optio eri mallivariaatioiden joukossa. Koneen harja- ja ajomoottorit ovat vanhemmassa mallityypissä toimineet hydraulikkakoneiston avulla, missä hydraulikkakoneiston pyörittäminen hoidetaan oikosulkumoottorin avulla ja harjojen nostamiset ja laskemiset sekä harjojen ja pyörien liike tuotetaan hydraulikkakoneiston pyörittämällä hydraulikkamoottorilla. Tämän järjestelmän tehontarve liikkui noin 22 kW paikkeilla, mutta ajatuksena oli kuitenkin hajauttaa ajomoottoreiden toiminta erilleen hydraulikkakäyttöisestä harjalaitteistosta siten, että ajoliikkeen voimantuotto hoidettaisiin kahdella 2,5 kW oikosulkumoottorilla. Tällöin hydraulikkakoneiston tehontarve vähenee oleellisesti, jolloin sen pyörittäminen voitaisiin hoitaa yhdellä 15 kW oikosulkumoottorilla.

Hydraulikkakoneiston korvaaminen suoraan sähkömoottoreilla olisi myös energiatehokkaampaa, sillä koko hydraulikkajärjestelmän hyötysuhde liikkuu vain 75 % paikkeilla, siinä missä sähkömoottoreilla voidaan saavuttaa noin 95 % hyötysuhde. Edellä lasketun hydraulikkalaitteiston kokonaishyötysuhde on seurausta siitä pyörittävän sähkömoottorin 95 %, itse hydraulikkakoneiston 90 % ja hydraulikkamoottorin noin 95 % hyötysuhdesta sekä järjestelmän venttiileissä, putkistoissa ja letkuissa syntyvistä painehäviöistä [84]. Näin ollen korvaamalla hydraulikkakoneisto puhtaasti sähkömoottorikäyttöillä, päästään moottorikäyttöjen hyötysuhde nostamaan 75:sta 95 prosenttiin, mikä tarkoittaa käytännössä pienempitehoisten moottoreiden kautta laitteen pienentyntä energiankulutusta ja sitä kautta mahdollistuvista pienempikokoisista moottoreista. Pidemmälle viety ajatus on vaihtaa myös peti- ja käytäväharjojen moottorikäytöt sähkömoottoreiksi, jolloin puhutaan nk. *täyssähkömallin Preparerista*. Tämän diplomityön päätavoitteeksi täsmenlyti kuitenkin syyskuussa 2016 käytyjen palaverien myötä välimallin Preparerin prototyypin valmistukseen tähtäävät esivalmistelut, joten täyssähkömallin suunnittelu tulee jäämään tulevaisuuden projektiksi.

Teemu Heiskan laatimista laskemista taulukoihin 4.3-4.5 johdetut energiankulutuslukeumat on laskettu siitä lähtökohdasta, että koneen harjamoottorit toimivat yhä hydraulikkakoneiston avulla, mutta ajomoottoreiden kohdalla siirrytään sähkömoottoreihin. Tähän

välimallin Prepareriin suunnitellut moottorikäytöt ovat listattuna taulukossa 4.7, mutta myös täyssähkömallin Preparerin vastaavat moottorikäytöt on esitettyinä taulukossa 4.8.

*Taulukko 4.7. Preparerin välimallin moottorikäyttöjen vaatimukset [84].*

Moottorikäyttö	Nykyinen ratkaisu	Suunniteltu ratkaisu
Ajo	Hydrauliikkamoottori (22 kW)	2,5 kW x 2 (sähkömoottori)
Harja	Hydrauliikkamoottori (22 kW)	15,0 kW (hydrauliikkakoneisto pyörittävä sähkömoottori)
Käytäväharja	-	
Imurilaitteisto	-	3,0 kW x 1 (sähkömoottori)

*Taulukko 4.8. Preparerin täyssähköversion moottorikäyttöjen vaatimukset [77, 78].*

Moottorikäyttö	Nykyinen ratkaisu	Suunniteltu ratkaisu
Ajo	Hydrauliikkamoottori (22 kW)	2,5 kW x 2 (sähkömoottori)
Harja	Hydrauliikkamoottori (22 kW)	7,0 kW x 1 (sähkömoottori)
Käytäväharja	-	4,0 kW x 1 (sähkömoottori)
Imurilaitteisto	-	3,0 kW x 1 (sähkömoottori)

Nyt taulukossa 4.7 esitettyjen tehojen kautta saadaan laskettua välimallin Preparerin nimellistehoksi 20 tai 23 kW riippuen siitä, onko imuri toteutuksessa mukana vai ei. Vastaavasti taulukon 4.8 tiedoista saadaan täyssähkömallin nimellistehoarvoiksi 16 ja 19 kW. Ensimmäisenä toteutettavan välimallin prototyypin jälkeen Elematic Oyj:n suunnitelmassa on täyssähköversiosta tehtävä prototyyppi, missä edellä esitettyjä moottorikäyttöjä voidaan pienentää entisestään, sillä petiharjan tehontarpeen minimimääräksi on kaavailtu 5,5 kW ja käytäväharjalle jopa alle puolet tästä [85]. Tätä tietoa voidaan hyödyntää tulevaisuudessa suunniteltavan täyssähkö Preparerin akku- ja moottorikäyttöjen kokoluokkaa optimoitaessa.

Preparerin oikosulkumoottoreiden ohjaus on hoidettu taajuusmuuttajan välityksellä, mikä tarjoaa yhden vaihtoehtoisen tavan akuston suunnittelua silmällä pitäen. Mikäli akuston jännite saadaan joko suoraan akkujen sarjaan kytkennän tai erillisen DC-boosterin välityksellä nostettua vähintään 312 V<sub>DC</sub> tasolle [78], voidaan jännite ohjata suoraan kuvassa 3.5 esitettyyn taajuusmuuttajan välipiiriin. Näin ollen riittävän korkealla akuston jännite-tasolla voidaan välttyä sekä kalliilta DC-boosterilta että ylimääräiseltä vaihtosuuntaajalta, mutta koska tarkempi toteutus tehdään vasta luvun 7 yhteydessä, ei asiaa käydy tässä kohtaa tämän syvällisemmin läpi.

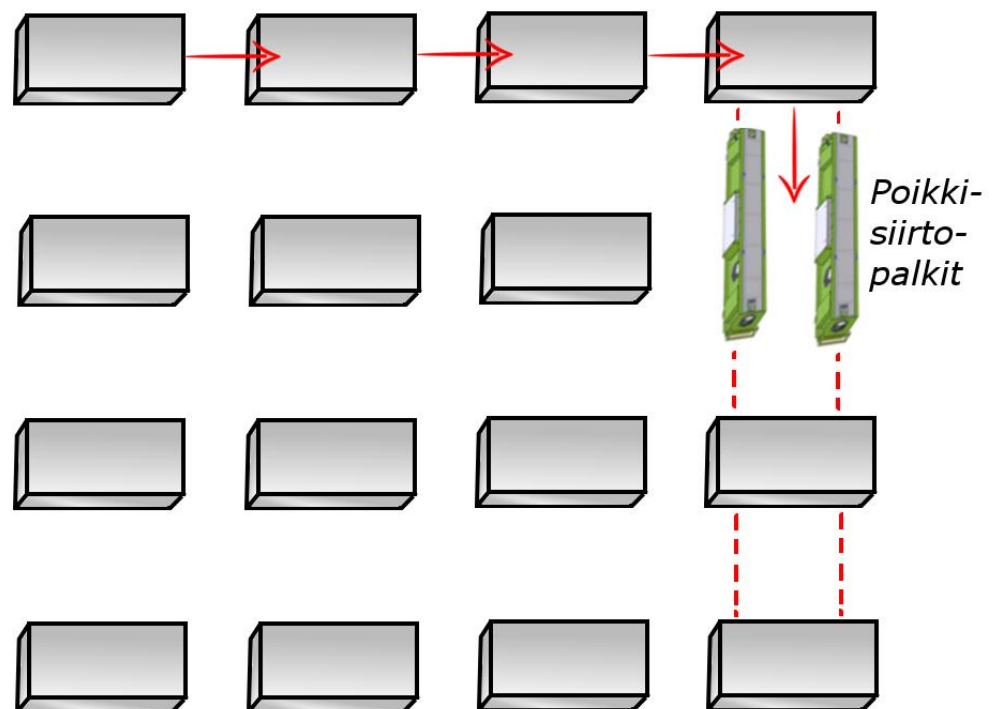
Lähdetään seuraavana tarkastelemaan Preparerin energiankulutusten muodostumista erityyppisissä tarkastelutilanteissa, joita ovat niin eri linjastokonseptit sekä itse Preparerin mallivariaatiot. Raportissa [79] on esitettyinä petikohtaiset energiankulutuslaskelmat kutakin työvaihetta kohden. Työvaihekohtaisia energiankulutuslaskelmia varten laskettiin jokaista työvaihetta kohden kuluvat ajat, jotka olivat 150 m linjastolla 5,0 minuuttia jokaista harjausta ja 3,5 minuuttia jokaista muuta työvaihetta kohden. Vastaavat kestot 200

metrin linjaston työvaiheissa saatiin yksinkertaisesti linjastojen pituuksien suhteista, kun tiedettiin koneiden etenemisnopeudet vakioksi, jolloin harjaukselle saatiin kestoksi 6,67 minuuttia ja muille työvaiheille 4,67 minuuttia.

Raportin tietojen pohjalta voidaan laskea helposti työvuoron aikana kulutettava energiamäärä kertomalla petiä kohden laskettu energiankulutus petien määrällä. Koska nk. välimallin Preparer tulee olemaan ensimmäinen prototyyppi, mikä tämän diplomityön tarkastelukohteista tehdään, ei tässä kohden tarvitse huomioida täyssähkö Preparerin mahdollistamia pienempiä kulutuksia. Näin ollen sekä lataus- että akkujärjestelmä tulee suunnitella imurilaitteistolla varustetun välimallin Preparerin vaatimuksia vastaavaksi. Yksityiskohtaiset laskelmat mahdollisista latausjoista esitellään latausjärjestelmän tarkastelun yhteydessä luvussa 5.

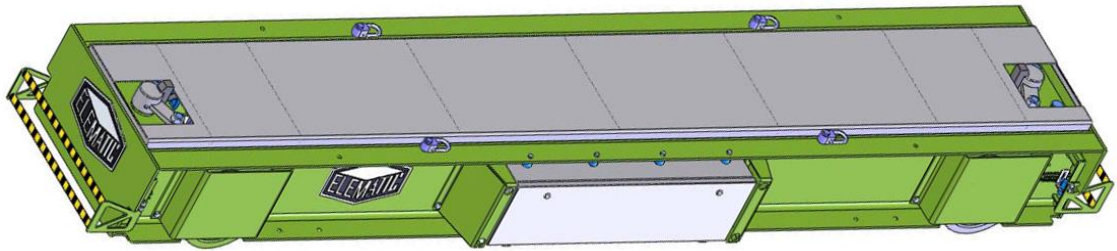
### 4.3.2 Poikkisiirtopalkki

Poikkisiirtopalkit liikkuvat seinälaattalinjastolla kiskojen varassa ja niiden sähkönsyöttö on hoidettu syöttökaapeliin avulla kuten muidenkin tarkasteltujen koneiden tapauksessa [74]. Poikkisiirtopalkkien tehtävänä on kuljettaa raskaita valumuotteja valupaikalta seuraavien työvaihepisteiden luokse siten, että yhden valumuotin nostoon vaaditaan vähintään kaksi palkkia. Kuvassa 4.5 on havainnollistettu seinälaattalinjaston kiertomuottilinjan toimintaperiaatetta, mistä käy ilmi poikkisiirtopalkkien liikerata muottipöytien välillä. Samasta kuvasta havaitaan myös muottien kiertävän pöytien välillä vaakasuuntaisesti, mikä hoidetaan poikkisiirtopalkkien sijaan kitkapyörävedolla.



*Kuva 4.5 Seinälaattalinjaston kiertomuottilinjaston havainnekuva.*

Tarkastellaan seuraavaksi yksityiskohtaisemmin kuvassa 4.6 esitettyä poikkisiirtopalkkia ja sen energiankulutusta yhden muotin siirtotapahtuman aikana.



**Kuva 4.6** Poikkisiirtopalkin havainnekuva [86].

Nimellisteholtaan 4,1 kW olevien poikkisiirtopalkkien kiskoilla tapahtuva liike hoidetaan vetopyörillä, joiden pyörittäminen hoidetaan 1,1 kW sähkömoottorilla ja muotin nostoon ja laskuun käytetään hydraulikkoneistoa, jonka moottoriyksikkönä toimii 3 kW sähkömoottori. Koska sekä muotin nostoon, että laskuun menee kumpaankin aikaa noin 30 sekuntia ja muotin siirtoon viereisten pöytien välillä noin 60 sekuntia, voidaan todeta, että poikkisiirtopalkkien energiankulutukseen vaikuttaa huomattavasti siirrettävää matkaa enemmän tehtävien nostojen- ja laskutapahtumien määrä. Näiden moottorikäyttöjen kulluttamat energiamäärät yhden muotin siirron osalta on esitettyinä taulukossa 4.9. Poikkisiirtopalkissa käytettyjen sähkömoottoreiden käyttöjännite on muiden laitteiden tapaan 3-vaiheinen 400 V<sub>AC</sub>. On kuitenkin mahdollista, että moottoreiden käyttöjännitettä voidaan tarvittaessa alentaa ja samalla siirtyä mahdollisesti myös tasavirtamoottorikäyttöihin [85].

**Taulukko 4.9.** Poikkisiirtopalkin energiankulutuksen muodostuminen [77, 78].

Työvaihe	Kuluva energia (Wh)
Ajo muotin alle	18,3
Muotin nosto	25,0
Muotin siirto	18,3
Muotin lasku	25,0
Ajo kotiasemalle	18,3

Taulukosta 4.9 saadaan laskettua näin ollen yhden muotin siirrossa kuluvaksi energiamääräksi 105 Wh, mikä on pyöristettynä sama kuin taulukossa 4.6 mainittu 0,11 kWh. Nostomäärien lisääntyessä ei koko työkierron aikana kuluva energiamäärä kuitenkaan lisääntynyt täysin samassa suhteessa, koska kotiasemalle ajo tehdään joka tapauksessa vain yhden kerran. Tällöin jokainen lisäsiirto lisää ajoaikaa 2 minuuttia ja nostoon- ja laskuun käytettävää aikaa yhdellä minuutilla.

Yhden poikkisiirtopalkin osalta akkutekniikalle alustavasti varatun tilan koko on karkeasti 100 x 30 x 30 cm, joten tämä tulee huomioida akkutekniikan valinnan yhteydessä. Tähän tarkempaan akkutekniikan käyttöönottoa käsittelevään suunnitelmaan syvennytään myöhemmin lukujen 5 ja 6 yhteydessä.

## 5 LATAUKSEN TOTEUTUSVAIHTOEHDOT

Tämän viidennen luvun päätehtävänä on saattaa latausjärjestelmän laatimiseen vaadittavat energiankulutus- ja latausteholaskelmat päätökseen niiden kahden akkukäyttöiseksi muunnettavan laitteen osalta, jotka valittiin luvun 4 yhteydessä tämän diplomityön tarkastelujoukoksi. Lisäksi tässä luvussa tarkastellaan niitä potentiaalisia latausratkaisuja, jotka kykenevät täyttämään luvussa 5.1 laskettavat laturilta vaadittavat vähimmäistehot. Muutamien latausvaihtoehtojen kohdalla viitataan erikseen kappaleessa 3.4 esiteltyjen BMS -järjestelmien asettamiin haasteisiin, jotka voivat vaikuttaa potentiaalisen latuskonstruktion ja BMS -järjestelmän väliseen yhteensopivuuteen. Luvun lopussa tarkastellaan vielä vaihtoehtoisia latausmenetelmiä, kuten induktiolatausta.

### 5.1 Latausaseman suunnittelu sovelluskohteeseen

Tarkastellaan nyt akkutekniikan käyttöönoton ensimmäiseen vaiheeseen valittujen kahden laitteen, Preparerin ja poikkisiirtopalkin, osalta syntyviä vaatimuksia latausaseman syöttämälle latausteholle, mikä saadaan laskettua suhteuttamalla työsykliä kuluttama energiamäärä eri linjastokonseptien mahdollistamiin lataussykleihin. Tämän lisäksi tarkastellaan eri latausratkaisujen kautta akkupaketilta vaadittavaa nimelliskapasiteettia sekä ottamalla huomioon luvun 2 yhteydessä esiteltyjä yleisiä vaatimuksia akkujen normaaleissa kuormitustilanteissa käytettävän akkukapasiteetin SOC -alueelle.

Näin pystytään määrittelemään suhteellisen tarkasti luvussa 4 esiteltyjen kolmen konseptimallin linjastotyyppin osalta vaaditut akkukapasiteetit, joihin lisätään tarvittava ”pelivara” ottaen huomioon esimerkiksi akkukennojen ikääntymisen tai standardilämpötiloista poikkeavien käyttölämpötilojen vaikutukset käytössä olevaan kapasiteettiin.

#### 5.1.1 Preparerin vaatima akkukapasiteetti ja latausteho

Tässä kappaleessa tarkastellaan luvussa 4 esitellyn Preparer E9:n uuden sähkökäyttöisen prototyypin vaatimaa akkukapasiteettia sekä latausasemalta vaadittuja lataustehoja. Tarkastelu aloitetaan ensimmäisessä vaiheessa laadittavan välimallin Preparerin energiankulutuksista ja sitä kautta laskettavista latauksen tehotarpeista. Tämän jälkeen tarkastellaan vielä tulevaisuuden optiona olevan täyssähkömallin Preparerin osalta vastaavia lukuja ja lasketaan eri optioiden osalta vaadittavat akkukapasiteetit. Taulukossa 5.1 on esitettyinä imurilla varustetun välimallin Preparerin energiankulutukset.

**Taulukko 5.1.** Imurilla varustetun välimallin Preparerin energiankulutukset.

Linjasto-optio	Energiankulutus per peti (kWh)	Energiankulutus per työvuoro (kWh)
6 x 150 m PRO-linjasto	4,38	26,30
4 x 150 m EDGE-linjasto	4,38	17,53
4 x 200 m EDGE-linjasto	5,84	23,38

Lisäksi vaaditun lataustehon laskemiseksi tarvitaan tietoa siitä, millaisilla sykleillä latauksia voidaan suorittaa. Näitä latausaikoja tarkasteltiin lyhyesti jo luvun 4 yhteydessä, mutta käydään asia nyt täsmällisemmin läpi. Raportissa [79] esitetyt janakaaviot prosessilaitteiden ajallisesta käytöstä paljastavat petien väliin jäävät mahdolliset latausajat, joista nyt tarkastelun kohteena ovat Preparerin käyttöajat kolmen eri konseptimallin linjaston osalta. Nämä tiedot ovat koostettuna taulukossa 5.2.

**Taulukko 5.2.** Preparerin mahdolliset latausajat eri linjastokonseptien osalta.

Linjasto-optio	Latausaika petien välillä (min)					Latausaika työvuoron jälkeen (h)
	1 → 2	2 → 3	3 → 4	4 → 5	5 → 6	
6 x 150 m	0	10	5	25	20	13,8
4 x 150 m	30	30	30	-	-	6,0
4 x 200 m	90	30	38	-	-	5,2/17,2

Työvuoron jälkeistä latausaikaa esittelevässä taulukon 5.2 sarakkeessa esiintyy kaksi eri latausaikaa 4 x 200 m EDGE -linjastokonseptissa, mikä selittyy sillä, että kyseisellä linjastokonseptilla mahdollistuu myös kaksivaiheinen työvuojärjestelmä, jolloin latausaika luonnollisesti alenee. Tämä optio on kuitenkin laskettu mukaan vain tulevaisuudessa mahdollisesti suunniteltavia uusia linjastokonsepteja varten, joten sen myötä alenevaa latausaikaa ei tässä diplomityössä huomioida tässä kappaleessa käytävää pintapuolista tarkastelua syvällisemmin. Lisäksi ihmetystä herätti työvaiheiden janakaaviosta kerätyt latausajat 6x150m PRO-linjastokonseptin osalta, mikä aiheutti keskustelua Elematic Oyj:n kanssa. Tarkemman selvityksen pohjalta tultiin siihen lopputulokseen, että tässä ulkopuolisen hankkijan toimesta teetetyssä janakaaviossa lienee virhe, sillä esimerkiksi jo n. 15 minuuttia kestävä esijännityksen aikana Preparer ei tee mitään työtehtävää, joten lopputuloksena päätettiin, että kaikkien petien välisen latausajan on oltava käytännössä vähintään 20 minuuttia. Näin ollen laskelmissa käytetään jatkossa petien väliselle latausajalle 6x150 metrin PRO -konseptin tapauksessa 20 minuuttia ja EDGE -konseptien tapauksessa 30 minuuttia.

Tämän johdosta työvuorojen jälkeistä latausaikaa lienee syytä kaventaa PRO -linjastokonseptin osalta 40 minuutilla noin 13,8 tuntiin. Lisäksi vertaamalla valittuja petien välisiä latausaikoja havaitaan, että esimerkiksi 4x200m EDGE -konseptissa olisi ensimmäinen pedin jälkeen mahdollista latausaikaa jopa tunti enemmän kuin kahdessa seuraavassa



lataussyklissä. Koska kuitenkin latauksen tehotarve on mitoitettava petien välisessä pikalatausmahdollisuudessa lyhyimmän ajan mukaan, käytetään jatkossa kaikkien EDGE -linjastokonseptin petien välisenä laskennallisena latausaikana 30 minuuttia.

Mikäli edellä mainittuja petien väliin jääviä latausmahdollisuuksia ei oteta huomioon, voidaan latauksen vaatimaksi minimitehoarvoksi laskea seuraavaa:

6x150 metrin PRO -konsepti: 1,91 kW  
 4x150 metrin EDGE -konsepti: 2,92 kW  
 4x200 metrin EDGE -konsepti: 1,36 kW.

Mikäli viimeksi mainitulla linjastolla siirrytään kaksivuoroiseen työkiertoon, nousee vaadittava latausteho 4,50 kW:iin, mikä johtuu käytettävissä olevan latausajan tippumisesta 17,2 tunnista 5,2 tuntiin. Tämä viimeksi mainittu kahden työvuoron 200 metrin EDGE-linjastokonsepti on kuitenkin konseptimalli, jota ei ole vielä toimitettu yhdellekään asiakkaalle, joten vaaditun 4,50 kW lataustehon tarkastelu voidaan jättää tässä vaiheessa pois, mutta pitää mielessä tulevan latausaseman laajennusmahdollisuuksia pohtiessa. Tässä huomattavaa on se, ettei 200 metrin EDGE-linjastolla mahdollisesti tehtävä siirtyminen kahden 12 tunnin työkierron asetteluun vaikuta petien välisiin latausaikoihin, vaan tämän vaikutus näkyy ainoastaan työvuorojen välisen lataustehon kasvuna. Näiden tietojen pohjalta voidaan siis todeta, että vain 3 kW tehoinen laturi riittää kaikkien tarkastelutilanteiden vaatimusten täyttämiseen siten, että akuston DoD-taso pysyy vakiona työvuorojen välillä. Latausratkaisuja suunniteltaessa on kuitenkin huomioitava myös vaadittavan akkupaketin kapasiteetti ja siitä johtuvat kustannukset. Esimerkiksi taulukkoa 5.1 tarkastelemalla havaitaan, että 6x150m PRO-linjastolla kuluva energiamäärä yhtä työvuoroa kohden on yli 26 kWh ja 4x200m EDGE-linjastonkin tapauksessa yli 23 kWh. Ainoa keino pienentää tarvittavaa akkukapasiteettia ja laskea siten akuston hankintakustannuksia on mitoittaa koneiden akustot siten, että jokaisella pedillä kuluva energiamäärä saadaan ladattua takaisin akustoon petien välisen joutoajan aikana.

Tarkastellaan nyt tilannetta, missä Preparerin akkupaketista jokaisen pedin kohdalla kuluva energiamäärä haluttaisiin ladata petien väliin jäävällä latausajalla takaisin alkuperäiseen SOC -tasoon. Tällöin taulukon 5.1 tiedoilla voidaan laskea petien välisen latauksen vaatimaksi minimitehoarvoksi seuraavaa:

6x150 metrin PRO -konsepti: 13,15 kW  
 4x150 metrin EDGE -konsepti: 8,76 kW  
 4x200 metrin EDGE -konsepti: 11,68 kW.

Tässä tapauksessa petien välisen ”pikalatauksen” tulisi tapahtua vähintään n. 12 kW teholla. Koska nykyisissä latausluokituksissa pikalatauksella tarkoitetaan karkeasti >50 kW latausasemia, keskinopealla latauksella n. 22 kW latauspisteitä ja niin sanotulla hitaalla latauksella n. 1,5-7 kW latauspisteitä, ei petien välisen latauksen vaatima tehotarve edes yllä viralliseen pikalataus -luokkaan.

Käydään vielä lyhyesti läpi vastaavat laskelmat tulevaisuudessa rakennettavan Preparerin täyssähkömallin osalta, missä energiankulutukset muodostuvat tarkasteltavan kolmen konseptimallin linjaston osalta taulukon 5.3 mukaisesti. Koska imurilla varustettu optio Preparerista kuluttaa työkierron aikana enemmän sähkötehoa eikä erillistä akkupakettia nähty järkeväksi toteuttaa imurimallille, on näissäkin laskuissa käytetty imurilla varustetun mallin tietoja.

*Taulukko 5.3. Imurilla täyssähköisen Preparerin energiankulutukset.*

<b>Linjasto-optio</b>	<b>Energiankulutus per peti (kWh)</b>	<b>Energiankulutus per työvuoro (kWh)</b>
6 x 150 m PRO-linjasto	3,33	20,00
4 x 150 m EDGE-linjasto	3,33	13,33
4 x 200 m EDGE-linjasto	4,44	17,78

Käyttämällä nyt edellisessä kohdassa laskettuja latausaikoja saadaan tarvittavaksi lataus-  
tehoksi laskettua työvuorojen välissä tehtäville latauksille:

6x150 metrin PRO -konsepti: 1,45 kW  
 4x150 metrin EDGE -konsepti: 2,22 kW  
 4x200 metrin EDGE -konsepti: 1,03 kW.

Lisäksi välimallin Preparerin tavoin, saadaan 4x200m EDGE- linjastokonseptin vaatimaksi minimitehoksi kahden työvuoron syklistä 3,42 kW. Vastaavasti petien välisen latausmahdollisuuden vaatimaksi minimilataustehoksi saadaan:

6x150 metrin PRO -konsepti: 9,99 kW  
 4x150 metrin EDGE -konsepti: 6,66 kW  
 4x200 metrin EDGE -konsepti: 8,88 kW.

Tarkastellaan lopuksi Preparerin eri malleilta vaadittavaa akkukapasiteettia. Kuten luvussa 2 todettiin, ei akkujen jännite käyttäydy kuormituksessa lineaarisesti, vaan ainoa suhteellisen lineaarinen jännitealue löytyy jostain SOC -tason keskivaiheilta. Tämän lineaarisen alueen pituus on voimakkaasti riippuvainen käytettävästä akkukemiasta, mutta kuitenkin lyijyakkujen tapauksessa se on selvästi lyhempi kuin esimerkiksi litiumioni -akuilla, joita käytetään lähes jokaisessa tämän päivän sähköajoneuvossa. Käytännössä akkukapasiteetti tuleekin mitoittaa siten, että jatkuvassa käytössä pyrittäisiin pysymään lineaarisella alueella. Esimerkiksi kuvasta 2.9 havaittiin, että tämän lineaarisen jännitealueen SOC -alue on litiumioniakkujen tapauksessa noin 15-90 %. Samaista SOC -aluetta käytettiin Juha Toivosen toukokuussa 2016 valmistuneessa diplomityössä [26], missä tutkittiin LTO-, LNMC- ja LFP -akkujen hyödyntämistä Konecranesin 5 000 kg nostokyvyn siltanosturissa. Valitsemalla akuston käyttöalueeksi tämän alueen, ei akkua ikinä pureta täysin tyhjäksi eikä sitä myöskään normaalikuormitustilanteissa ole tarvetta ladata 100 % SOC -tasoon saakka, minkä pitäisi antaa akulle myös enemmän elinikää.

Käyttämällä edellä mainittua 75 prosentin aluetta käytettävissä olevana kapasiteettina, voidaan laskea tarvittavien akkupakettien nimelliskapasiteetit. Samalla tulee huomioiduksi akkujen ikääntymisestä ja mahdollisesti standardilämpötilasta poikkeavan käyttölämpötilan vaikutus akun kapasiteettiin. Tämä luku onkin itseasiassa hyvin lähellä luvussa 3.4 esitellyt AEV:n BMS -järjestelmän käyttöoppaassa suositeltua ohjetta, minkä mukaan BMS:lle tulisi määritellä akuston kapasiteetiksi 70 prosenttia sen nimelliskapasiteetista. Taulukkoon 5.4 on vielä koostettuna eri linjastokonsepteissa vaaditut lataustehot sekä tarvittavat akkukapasiteetit siten, että *akkukapasiteetti 1*:llä tarkoitetaan vaadittavaa kapasiteettia tilanteissa, missä akustoa ladataan vain työvuorojen välillä ja *akkukapasiteetti 2* kuvaa puolestaan petien välisen latauksen kautta vaadittavaa minimikapasiteettia.

**Taulukko 5.4.** *Preparerin osalta vaadittavat akkukapasiteetit ja lataustehot.*

<b>Välimallin Preparer imurin kanssa</b>				
<b>Konsepti</b>	<b>Kapasiteetti 1 (kWh)</b>	<b>Latausteho (kW)</b>	<b>Kapasiteetti 2 (kWh)</b>	<b>Latausteho (kW)</b>
6 x 150 m	35,07	1,91	5,84	13,15
4 x 150 m	23,37	2,92	5,84	8,76
4 x 200 m	31,17	1,36	7,79	11,68
<b>Täyssähkömallin Preparer imurin kanssa</b>				
<b>Konsepti</b>	<b>Kapasiteetti 1 (kWh)</b>	<b>Latausteho (kW)</b>	<b>Kapasiteetti 2 (kWh)</b>	<b>Latausteho (kW)</b>
6 x 150 m	26,67	1,45	4,44	9,99
4 x 150 m	17,77	2,22	4,44	6,66
4 x 200 m	23,71	1,03	5,92	8,88

Taulukossa 5.4 esitetyistä kapasiteeteista havaitaan, että 150 metrin PRO- ja 200 metrin EDGE-konseptien vaatimat akkukapasiteetit ovat melko lähellä toisiaan, joten näiden osalta voitaisiin käyttää saman nimelliskapasiteetin akustoa, mikäli akustoa ladattaisiin vain työvuorojen välissä. Koska akusto on kuitenkin selvästi kallein yksittäinen komponentti, olisi kuitenkin suositeltavaa pyrkiä lataamaan akkuja jokaisen pedin välissä, jolloin myös akuston mitoittamisessa voitaisiin päästä jopa yhteen kapasiteettikokoon jokaisen linjastokonseptin osalta. Tällöin välimallin Preparerin akusto voitaisiin mitoittaa esimerkiksi 8 kWh suuruiseksi ja vaadituksi lataustehoksi asettaa esimerkiksi 13,5 kW. Vastaavat arvot täyssähkömallin Preparerille voisivat olla esimerkiksi 6 kWh ja 10 kW.

Mikäli akusto kuitenkin mitoitettaisiin siten, että sitä ladattaisiin ainoastaan työvuorojen välissä, saataisiin välimallin Preparerille minimikapasiteetiksi 35 kWh, missä 4x150m konseptin osalta voitaisiin käyttää erillistä 24 kWh akustoa. Vastaavat lukemat täyssähkömallin Preparerille voisivat olla 27 kWh ja 18 kWh. Tällöin vaadittava latausteho olisi välimallin Preparerille n. 3 kW ja täyssähkömallin Preparerille 2,5 kW, joten samalla 3 kW laturi yksiköllä voitaisiin toteuttaa myös tuleva täyssähkömalli.

### 5.1.2 Poikkisiirtopalkin vaatima akkukapasiteetti ja latausteho

Poikkisiirtopalkin työvaiheet ja alustavat energiankulutuslaskelmat käsiteltiin Preparerin ohella luvun 4 yhteydessä, mutta tässä luvussa tarkennetaan luvun 4 laskelmia ja esitellään poikkisiirtopalkin osalta mahdolliset latausajat sekä siltä vaadittu akkukapasiteetti. Lähdetään liikkeelle esittelemällä taulukossa 4.6 esitetyt tiedot uudelleen siten, että niihin on korjattuna tehokertoimena käytettävä 0,85 -kerroin. Tällöin nimellistehoiltaan 1,1 kW ajomoottorin ja 3 kW hydraulikkamoottorin käyttötehoksi saadaan noin 0,94 kW ja 2,55 kW.

*Taulukko 5.5. Poikkisiirtopalkin energiankulutus suhteessa siirtojen määrään.*

Siirtojen määrä (kpl)	Siirtoihin kuluva aika (min)	Energiankulutus (Wh)
1	4,0	89,3
4	13,0	310,3
10	31,0	752,3

Kuten luvun 4 yhteydessä todettiin, ei siirtojen määrä kasvata kuluvaan energiamäärää lineaarisesti, vaan jokainen lisäsiirto lisää ajomoottorin käyttöä kahdella minuutilla ja hydraulikkamoottorin käyttöä yhdellä minuutilla. Kun yhden muotin siirtoon kuluu ajoaikaa 3 minuuttia ja nosto- ja laskuaikaa 1 min, ovat vastaavat lukemat neljän muotin siirrossa 9 ja 4 minuuttia ja kymmenen muotin osalta 21 ja 10 minuuttia. Erot syntyvät siitä, etteivät poikkisiirtopalkit pala normaaleissa käyttötilanteissa kotiasemalle siirtojen välissä lainkaan.

Poikkisiirtopalkin siirtomäärät kuvastavat tuntia kohden tehtävien siirtojen määrää sen mukaan kuinka paljon seinälaattalinjaston valukone sille syöttää siirrettäviä muotteja. Tyypillisesti tälle valukoneelle meneviä rullapukkilinjoja on yksi tai kaksi kappaletta, jolloin yhden linjan tapauksessa valetaan neljä muottia tunnissa ja kahden linjan tapauksessa muottimäärä on kahdeksan kappaletta. Neljän muotin tuntivauhti onkin selvästi yleisin käytössä oleva tuotantonopeus, mutta kymmenen muotin tuntivauhtia voidaan pitää energiankulutuslaskelmien ylärajana eikä pelkän yhden muotin siirtoa tehdä käytännössä koskaan.

Koska valukoneen käyttöaste noudattelee suhteellisen tasaisia käyttösyklejä, pysyvät myös poikkisiirtopalkkien tekemät siirtosykliit melko tasaisina koko työvuoron ajan. Näin ollen jakamalla siirtojen väliin jäävä näennäinen joutoaika siirtojen määrällä, saadaan poikkisiirtopalkin keskimääräiseksi siirtojen väliin jääväksi joutoajaksi neljän muotin tapauksessa 11,75 minuuttia ja kymmenen muotin tapauksessa 2,9 minuuttia. Äkkiseltään voitaisiin kuvitella, että edellä esitetyt muottien väliset joutoajat kuvaavat käytettävissä olevaa latausaikaa, mutta tilanne on hieman monimutkaisempi. Koska nykyisessä järjestelmässä poikkisiirtopalkkien sähköistys on hoidettu kaapelirummun kautta, voivat poikkisiirtopalkit jäädä muottipöytien välille odottamaan uuden muotin siirtopyyntöä, eikä paluuta kotiasemalle tehdä kuitenkaan jokaisen siirron välissä.

Koska taulukossa 5.5 esitetyt poikkisiirtopalkin energiankulutuslaskelmat edustavat kuitenkin vain hyvin karkeita arvioita eri siirtosykliden kuluttamasta energiamäärästä eikä niiden pohjalta voi päätellä todellista käytettävissä olevaa latausaikaa, jouduttiin Teemu Heiskan tekemiä laskelmia tarkentamaan vielä kahdella siirtomallilla, jotka on poimittu todellisen tehdaslayoutin siirtoprosessista. Ensinnäkin poikkisiirtopalkin liikkumisnopeudeksi asetettiin sen suurin sallittu maksiminopeus, joka on 0,2 m/s ja tehtiin se oletus, että tuleva latausasema sijoitetaan kotiasemaksi nimettyyn muottipaikkaan numero yksi. Tämän jälkeen tarkasteltiin kahden, taulukkoon 5.6 kirjatun, siirtosykliden energiankulutuksia.

**Taulukko 5.6.** Poikkisiirtopalkin kahden todellisen siirtosykliden tarkastelu.

Siirtosykli	Siirtomatka (m)	Siirtoaika yht. (min)	Nostoja / laskuja yhteensä (kpl)	Energiankulutus (Wh)
1	34	2,83	4	129,2
2	62	5,17	6	208,0

Taulukossa 5.6 esiintyvät siirtosyklit kuvaavat todellisia siirtotilanteita, missä muotteja siirretään seuraavien muottipaikkojen välillä:

Siirtosykli 1: 1 → 3 → 1 → 2 → 1

Siirtosykli 2: 1 → 3 → 4 → 2 → 3 → 1 → 2 → 1.

Ensimmäinen siirtosykli sisältää yhteensä neljä siirtoa ja toinen sykli puolestaan seitsemän siirtoa. Jäljelle jääväksi latausajaksi arvioitiin *siirtosyklillä 1* tapauksessa valumuotin laitojen purkuun kuluvaan 15 minuuttiin ja kun *siirtosyklillä 2* ei ollut saatavilla tarkkaa latausaikaa, arvioitiin sen osalta tarvittava latausteho vastaamaan 5, 10 ja 15 minuutin joutoaikoja. Näin saadaan laskettua alle listatut vähimmäislataustehot, missä sulkuihin on kirjattu laskennallinen latausaika:

Siirtosykli 1 (15 min): 0,52 kW

Siirtosykli 2 (5 min): 2,50 kW

Siirtosykli 2 (10 min): 1,25 kW

Siirtosykli 2 (15 min): 0,83 kW.

Poikkisiirtopalkkien akkukapasiteetiksi riittäisi näin ollen noin 0,28 kWh, mikäli tarvittava kapasiteetti määriteltäisiin samalla tavoin kuin Preparerin akkupaketin kohdalla tehtiin. Superkondensaattoreita käyttämällä ei tosin vastaavaa kapasiteetin ylimitoitusta tarvittaisi, mutta käyttämällä niiden kustannustason arviointiin luvussa 3.5 esitettyä alhaisinta kustannustasoa, 33 000 euroa kilowattituntia kohden, saadaan 210 Wh kapasiteetin omaavan superkondensaattorimoduulin hinnaksi 6 930 euroa. Tällöin järjestelmän kustannustaso nousee kuitenkin kohtuuttoman korkeaksi, sillä useassa tapauksessa linjastolla

on esimerkiksi kaksi poikkisiirtopalkkiparia (4 palkkia), jolloin pelkkien kondensaattoreiden hinta olisi lähes 30 000 euroa.

Poikkisiirtopalkkien toisena haasteena on varsinaisen latausinfran vaatimat järjestelyt, sillä latauspistoketta ei ehditä käytännön tilanteissa kytkemään poikkisiirtopalkkeihin, joten järjestelmään tulisi luoda jonkinlainen automaattisesti toimiva kontaktori palkkien ja latausaseman väliseen rajapintaan. Tällöin palkit siirtyisivät välittömästi lataukseen, kun ne saapuisivat kotiasemalle, mutta ainakaan nykyisen sähköajoneuvojen teknologian puitteissa tällaista mahdollisuutta ei ole. Ratkaisuksi onkin kaavailtu esimerkiksi induktiolataukseen perustuvaa järjestelyä, mitä tarkastellaan luvun 5.7 yhteydessä.

### **5.1.3 Usean akkukäyttöisen koneen lataaminen samalla linjalla**

Yhtenä tekijänä latauspisteen valintakriteerien joukossa on ollut kysymys siitä, miten tulisi toimia, mikäli tehtaan latauskapasiteettia haluttaisiin myöhemmin kasvattaa kattamaan useampia laitteita nyt suunniteltavien yhden tai kahden laitteen sijasta. Mahdolliseksi vaihtoehtoiksi pohdittiin joko latauspisteiden lisäämistä tai latausaseman tehon kasvattamista. [53]

Kuten latausstandardeja käsittelevässä luvussa 5.2 havaitaan, ovat itse latausasemat sähköteknisesti hyvin yksinkertaisia laitteita, missä poikkeuksen tekee ainoastaan kalliimmat ja monimutkaisemmat tasavirtalaturit. Näin ollen edullisempien, maksimissaan noin tuhannen euron hintaisten, vaihtovirtaa syöttävien ”lataustolppien” päivittäminen onnistuu esimerkiksi vaihtamalla latausaseman kaapeloinnit ja suojauskomponentit suuremman virrankeston omaaviin komponentteihin tai hankkimalla uusia latureita vanhan rinnalle.

Koska käytännössä kaikissa sähköajoneuvoissa ulkoinen latausinfra sisältää vain luvussa 5.3 mainitut suojaustoiminnot yhdessä koteloinnin ja standardinmukaisen latausliittimen kanssa, on varsinainen AC/DC -muunnoksen tekevä latausyksikkö integroituna ajoneuvoon. Tällöin esimerkiksi suuritehoisemman moottorin vaihtaminen jo valmistettuun sähköiseen tuotantokoneeseen, vaatii tämän onboard -laturin päivittämisen tehokkaampaan tai kytkemällä useita onboard -latureita yhteen. Vastaava tilanne syntyy toki myös silloin, kun halutaan muuttaa Preparerin ja poikkisiirtopalkin lisäksi muita, suuremman teholuokan, Elematic Oyj:n koneita akkukäyttöisiksi, jolloin esimerkiksi varastoon mahdollisesti hankittujen onboard -latureiden yhteen liittäminen voisi olla kannattavaa.

Kuten edellä mainittiin, ovat muutamat onboard-laturimallit myös kytkettävissä rinnan ja/tai sarjaan, jolloin lataustehoa saadaan nostettua kasvattamalla joko latausvirtaa tai lataustehoa. Oleellista on, että rinnankytkentä kasvattaa latausvirran maksimia, kun taas sarjaankytkentä latausjännitettä, mutta näistä jälkimmäinen on selvästi harvinaisempi. Itseasiassa tämän diplomityön kirjoittamisen aikana löytyi vain yksi kaupallinen onboard-

laturi, jolle on ilmoitettu maksimissaan 60 laturin rinnankytkennän ohella myös mahdollisuus kahden yksikön sarjaankytkentään. Kyseessä on Current Ways Technologies yhtiön BC -sarjan laturi, mistä on saatavilla muutamaa eri mallivariaatiota 3 kW teholuokassa [87]. Kyseisiä Current Waysin latureita sekä latureiden välisiä kytkentöjä tarkastellaan vielä perusteellisemmin luvun 5.5 yhteydessä.

Tästä yhteenvedona mainittakoon, että mikäli akkukäyttöinen Preparerin prototyyppi sekä mahdollisesti toteutettava akkukäyttöinen poikkisiirtopalkki toteutetaan käyttämällä vaihtovirtaa syöttävää latausasemaa, ei mahdollisesti tulevaisuudessa tapahtuvaa uusien akkukäyttöisten laitteiden lisäämistä kannata tässä vaiheessa miettiä. Jos taas edellä mainitut prototyypit toteutetaan käyttämällä kalliimpia keskinopean- (n. 20 kW) tai pikalatausluokan (50+ kW) tasavirtalatureita, kannattaa tulevaisuuden lataustarpeisiin kiinnittää hieman enemmän huomiota. Lisäksi huomionarvoista on, että useimmat kaupalliset ”lataustolppa” ratkaisut sisältävät yhden tai kaksi latausliitintä, eikä niitä ole ainakaan tasavirtalatureiden kohdalla mahdollisuutta lisätä, jolloin tulee käytännössä jokaiselle laitteelle tai laiteparille olla oma ulkoinen latausyksikkönsä.

Viimeisenä huomiona voitaisiin mainita vielä latauskomponentteja valmistavan Phoenix Contactin yritysvierailussa [80] esille tullut toiminto, minkä avulla samaan syöttöön voidaan kytkeä älykkäästi useampia latureita. Tällöin latauslaite huomioi muut latauksessa olevat laitteet ja laskee käytettävissä olevan latauskapasiteetin. Tämän jälkeen laturi lähettää IEC-61851-1 -standardin mukaisesti latauspyynnön antaneelle laitteelle -12 – +12 V linjaa pitkin kanttiaaltona käytettävän *duty cycle*:n, joka sisältää tiedon käytettävissä olevasta latauskapasiteetista, minkä jälkeen lataukseen tullut laite joko hyväksyy tai hylkää ehdotetun latauksen. Samalla Phoenix Contactin latauskontrollerilla on mahdollista ohjata myös useiden latauspisteiden muodostamaa kokonaisuutta siten, että kytkettäessä esimerkiksi 32 A syöttöön kaksi laturia, antaa ohjainlaite toisen laturin kontrollerille 12 V linjaa pitkin CCR:n (*Charge Current Reduction*), jolloin latausvirta rajoittuu automaattisesti vain 16 ampeeriin laturia kohden.

## 5.2 Latausstandardit

Käytännössä kaikki tämän päivän kaupalliset sähköajoneuvojen latausratkaisut noudattavat IEC-61851 ja IEC-62196 -standardeja, joista ensimmäisen mainittu määrittelee käytettävät latausjännitteet ja -virrat ja jälkimmäinen taas itse ulkoisen latausaseman ja ajoneuvon välisessä rajapinnassa käytettävän latausliittimen. Näiden standardien sisältö on kuvattuna myös Teemu Heiskan tekemässä opinnäytetyössä, mutta tässä yhteydessä tehdään niistä vielä tiivis katselmus. Alla on esiteltynä neljä IEC-61851 -standardin mukaista lataustapaa, joista ensimmäiset kaksi soveltuvat käytettäväksi myös tavallisen suojamaadoitetun pistorasian kautta, kun taas loput lataustavat vaativat puolestaan erillisen latausaseman kautta järjestetyn sähkönsyötön [88]:

Mode 1: max. 16A 230/400V<sub>AC</sub>  
 Mode 2: max. 32A 230/400V<sub>AC</sub>  
 Mode 3: max. 63A 230/400V<sub>AC</sub>  
 Mode 4: max. 400A 600-1000V<sub>DC</sub>.

Kuvassa 5.1 on puolestaan esitettyä IEC-62196 -standardin mukaiset latauspistokkeet, joista ykköstyypin pistoke noudattelee yhdysvaltalaisista SAE-1772 -standardia (*myöh. J1772 -tyypin pistoke*) ja sitä käytetään lähinnä vain Pohjois-Amerikan ja Japanin markkina-alueilla. Kakkostyypin pistoke on taas yleistynyt kattamaan käytännössä koko Euroopan markkina-alueella käytettävänä pistoketyyppinä, joten tässä diplomityössä pyritään keskittymään tätä latausliitintä käyttäviin latausasemiin. On kuitenkin huomattavaa, että myös J1772 -tyypin pistokkeita käyttäviä latausasemia esitellään lukujen 5.3-5.4 yhteydessä, sillä niiden kattavasta markkina-asemasta johtuen kyseisten latausasemien saatavuus on hyvällä tasolla ja tarjolla olevia mallivariaatioita on runsaasti. Lisäksi tarkastelemalla tarjolla olevia latausasemia eri markkina-alueiden osalta, saadaan kattavampi kokonaiskuva latausasemien hinnoittelun sidoksista tarkasteltavaan markkina-alueeseen nähden. Sen sijaan kolmostyypin pistoke on otettu julkisesti käyttöön ainoastaan Ranskan ja Italian alueilla, joten sitä ei tulla tarkastelemaan tässä diplomityössä. Näiden kuvassa 5.1 esiteltyjen pistokemallien lisäksi on olemassa vielä kiinalaiseen GB/T -standardiin pohjautuvat liitintyyppit, mutta myös niiden tarkastelu on jätetty pois tästä diplomityöstä. [88, 89]



**Kuva 5.1** Standardin IEC-62196 mukaiset latausliittimet [88].

Edellä esitellyt latausliittimet soveltuvat kuitenkin käytettäväksi ainoastaan vaihtovirtaa syöttävien latureiden kanssa, joiden tarkastelu tehdään luvussa 5.3. Sen sijaan tasavirtaa käyttävien latausasemien kanssa tarvitaan ns. *combo* -tyypin latausliitintä, missä tyypin 1

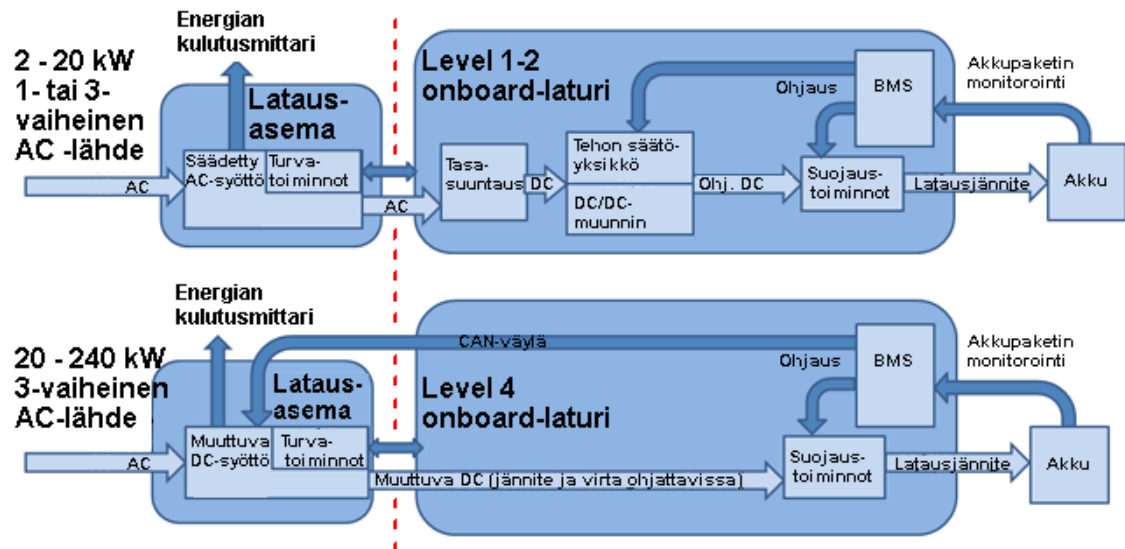


tai 2 latauspistokkeiden rinnalle on lisätty kaksipinninen lisäliitin. Tämän lisäliitimen ansiosta voidaan ajoneuvon lataus hoitaa yksi- tai kolmevaiheisen vaihtovirtalaturin tarjoaman, maksimissaan 22 kW tehoinen latauksen sijasta yli 50 kW teholla käyttäen jopa 1000 V<sub>DC</sub> jännitetasoa. Yleisesti ottaen *combo* -liittimien katsotaan kuuluvan globaalin CCS -standardin (*Combined Charging System*) alaisuuteen, minkä liittintyyppit ovat esitettynä kuvassa 5.2. Luonnollisestikaan kaikki tarjolla olevat sähköautot eivät tue CCS -standardin mukaista pikalatausta, mutta tähän ei kiinnitetä tässä yhteydessä sen enempää huomiota, sillä tämän diplomityön puitteissa Elematic Oyj:lle tehtävä akkukäyttöjen käyttöönottoa käsittelevä suunnitelma ei ole riippuvainen autoteollisuuden käyttämistä standardeista, vaikka tuotantokoneisiin suunniteltava latauksen rajapinta pyritään rakentamaan voimassa olevien standardien varaan.



**Kuva 5.2** CCS -standardin mukaiset latausliittimet. Vasemmalla Pohjois-Amerikan ja Japanin markkina-alueilla käytettävä Combo 1 -liitin ja oikealla eurooppalaisen standardin mukainen Combo 2 -liitintyyppi [73, s. 30].

Kuvassa 5.3 on vielä esitettynä lohkokaaaviot vaihto- ja tasavirtaan pohjautuvista latausratkaisuista, missä on huomioitu myös ajoneuvon sisäiseltä onboard -laturilta vaaditut toiminnallisuudet. Kuvasta havaitaan, kuinka vaihtovirtaa käyttävän latausaseman tapauksessa vaaditaan aina ajoneuvon integroitu tasasuuntaaja sekä DC/DC -muunnin, jotka käsiteltiin jo luvun 3 yhteydessä. Latauksen ohjauksen kannalta merkittävin tekijä on kuitenkin vaihtovirtalatureiden tapauksessa suppeampi kommunikointi latausaseman ja ajoneuvon välillä, sillä tämä kommunikointi käyttää usein vain jänniteohjattua 12 V<sub>DC</sub> linjaa, mitä kautta latausasema kykenee kertomaan ajoneuvon integroidulle onboard -laturille ja BMS:lle tarjolla olevan latauskapasiteetin. Sen sijaan tasavirtalatureiden tapauksessa käytetään aktiivista CAN-väylää, jonka kautta BMS ohjaa laturin syöttämän tasajännitteen ja -virran suuruutta sen mukaan mikä on akuston sen hetkinen SOC -taso ja vaadittava latausaikataulu.



*Kuva 5.3 Sähköajoneuvojen vaihto- ja tasavirtaan perustuvien latausasemien eroavaisuudet lohkokaaavion muodossa esitettynä, missä punainen katkoviiva edustaa latausaseman ja ladattavan laitteen välistä rajapintaa. Muokattu lähteestä [90].*

Toinen huomionarvoinen asia, mikä kuvasta 5.3 havaitaan, on DC -latauksen kohdalla mainittu "level 4" onboard -laturi. Koska DC -latauksessa kaikki pikalataukseen käytettävät komponentit, BMS:iä ja tarvittavia suojauskomponentteja lukuunottamatta, sijaitsevat itse latausasemassa, ei ladattavassa laitteessa käytetä mitään varsinaista onboard -latausyksikköä. Termi on lohkokaaviossa kuitenkin mukana, mutta sen tarkoitus on vain osoittaa latauksen oheiskomponenttien, kuten Combo -mallin latausliittimen, CAN -väylän sekä BMS:n ja suojauskomponenttien asemaa latausaseman ja akuston välisessä liittymässä.

### 5.3 Vaihtovirtalaturit

Viime vuosien aikana hyvin laajalle levinneet sähköautomarkkinat ovat saaneet piristystä myös kuluttajien saataville tulleiden latausyksiköiden muodossa. Markkinoilta löytyykin tänä päivänä hyvin kirjava joukko eri valmistajien latausyksiköitä ja esimerkiksi Tuulilasi-lehti julkaisi 4.4.2016 artikkelin [91] sähköajoneuvojen uusista latausasemista mainiten kalliiden pikalatausasemien ohella myös edullisemmista, mutta pienitehoisista latausasemista.

Kuitenkin on muistettava, että käytännöstä edullisista AC-latureista puuttuu kokonaan itse latausyksikkö eikä niitä pystytä yhdistämään CAN-väyläiseen BMS-järjestelmään, mikä havaittiin kuvasta 5.3. Edullinen hinta tarkoittaa siis tässä yhteydessä pelkistettyä toteutusta, sillä käytännössä AC-luokan kotilatausasemat sisältävät vain käytettävän standardin mukaisen latausliittimen, välijohdon sekä tarvittavat suojauskomponentit yhdessä sään kestävästä koteloinnista, joten niiden ulostulojännite pysyy vakiona riippumatta

akuston tarvitsemasta syöttötehosta. Suojaukseen, valvontaan ja säätöön käytettävät komponentit ovat tyypillisesti johdonsuojakatkaisin, vikavirtasuoja ja erillinen lataussäädin sekä joissain malleissa myös säädinkomponentti maksimiulostulovirran säätöön. Lataussäätimen tehtävinä ovat muun muassa latauspistokkeen lukituksen on/off -tilan seuranta, latauskaapelin kunnonvalvonta sekä ajoneuvon kanssa kommunikointi esimerkiksi latauksen aloitus- ja lopetusajankohdista. [92]

Lähdetään seuraavaksi tarkastelemaan kaupallisten vaihtovirtaa käyttävien latausasemien kustannuksia sekä latausaseman valintaan vaikuttavia seikkoja, joita ovat kustannusten ohella lähinnä käytettävä pistoketyyppi, koteloinnin säänkestävyys, maksimilatausteho sekä aseman ulkonäkö. Ensimmäisenä esitellään Boschin ja Siemensin tarjoamat mallit, jotka ovat esitettynä kuvassa 5.4. Niiden soveltuvuus Euroopan markkina-alueille on kuitenkin epäselvää, sillä ne käyttävät eurooppalaisesta liittimestä poikkeavaa J1772 -tyypin latauspistoketta.



**Kuva 5.4** Boschin Power Max ja Siemensin VersiCharge -latausasemat. Molemmat asemat on tarkoitettu kiinteästi seinään asennettavaksi ja ne käyttävät J1772 -tyypin latausliitintä. Kuvien mittasuhteet eivät ole sidoksissa asemien todelliseen kokoon nähden [93, 94].

Boschin Power Max akkulaturia on saatavilla kahdessa, 3,3 ja 7,2 kW teholuokassa, jolloin laturin syöttövirta on yksivaiheisena joko 16 tai 30 A. Lisäksi tämän latausaseman kotelointi on luokiteltu ulkokäyttöön sopivaksi, joten myös sen käyttölämpötilalle on asetettu laaja  $-30 - +50$  °C soveltuvuusalue. Bosch Power Maxin 16 A version listahintana on Boschin verkkokaupassa 449 dollaria ja tehokkaampi 30 A mallikin on saatavissa huokeaan 595 dollarin hintaan. [93]

Siemensin VersiCharge latausasemasta on puolestaan saatavilla vain 30 A malli, joka ei kuitenkaan ole edellä esitellyn Boschin laturin tavoin säänkestävä, joten tämä Siemensin

yksikkö soveltuu ainoastaan sisätiloihin asennettavaksi. Tämän Siemensin laturin hinta on EV-Westin verkkokaupassa 499 dollaria [94] ja siitä löytyy sisäänrakennettuna ominaisuutena lataustehon säätöyksikkö, jollaista ei löydy muista tässä luvussa esiteltävistä latureista. Tämän säätöyksikön avulla voidaan laturin ulostulovirtaa säätää 6-30 ampeerin välillä, jolloin lataustehoa voidaan säätää taulukon 5.7 mukaisesti.

**Taulukko 5.7.** *Siemens VersiCharge -laturin säädettävän ulostulovirran asetukset [95, s. 21]*

Säätimen asento	0	1	2	3	4
Ulostulovirta (A)	6	7,5	15	22,5	30
Ulostuloteho (kW)	1,44	1,8	3,6	5,4	7,2

Tarkastelemalla taulukkoa 5.7 havaitaan, että Bosch Power Max -laturin tavoin tästä Siemensin latausasemasta saadaan ulos vain 7,2 kW tehoa, vaikka lataussäätimen maksimiasennolla saatava syöttövirta on jopa 30 ampeeria. Tämä selittyy sillä, että kyseiset laturit käyttävät ainoastaan yksivaiheista virransyöttöä, jolloin 240 V<sub>AC</sub> jännitetasolla ja 1,00 tehokertoimella saatava teho on juurikin 7,2 kW. Koska latausaseman kuormaa on vaikeaa kuvitella täysin resistiiviseksi, on todellinen tehokerroin kuitenkin todennäköisesti hieman alle yhden, jolloin myös saatavissa oleva latausteho on hieman alhaisempi kuin latausasemien tuotetiedoissa on annettu ymmärtää. Esimerkiksi 0,95:n tehokertoimella saadaan edellä mainituilla jännitteen ja virran arvoilla vain noin 6,8 kW lataustehoa, mikä tiedostaminen on suositeltavaa.

Edellä esitetyissä Bosch ja Siemensin tarjoamissa latausasemissa sisääntulojännitteelle on määritelty ala- ja ylärajoiksi monen muun J1772 -tyypin pistoketta käyttävän laturin tavoin 208-240 V<sub>AC</sub>, mutta latureille soveltuvan verkkojännitteen taajuudesta ei löytynyt mitään mainintaa. Ilmoitetusta jännitealueesta voidaan kuitenkin osittain päätellä, että kyseiset latausasemat soveltuvat hyvin todennäköisesti myös Euroopassa yleisesti käytössä olevalle 50 Hz taajuudelle. Tätä väitettä tukee muun muassa yhdysvaltalaisen latausasemien valmistajan, AeroVironment EV Solutions -yhtiön latureiden tuotetiedoista ilmenevä samainen jännitealue sekä ilmoitus sopivuudesta sekä 50 että 60 Hz taajuuksille [96].

Kuten 3 luvun BMS -järjestelmien yhteydessä mainittiin, löytyy Ratio Electric B.V -yhtiön suomalaiselta jälleenmyyjältä AEV:lta myös muutamia sähköajoneuvojen latausratkaisuja. Seuraavaksi esitellään AEV:n verkkokaupassa tarjolla olevista Rolecin latauspisteistä kaksi vaihtoehtoista mallia – seinäasenteinen ”WallPod EV” ja tolppamallinen ”BasicCharge”, joista saatavien mallivariaatioiden kustannukset ovat kirjattuna taulukon 5.8.

**Taulukko 5.8.** AEV:n verkkokaupasta löytyvät Rolecin latausasemat [97].

Malli	Pistokemäärä (kpl)	Syöttövirta (A)	Maksimiteho (kW)	Hinta (€)
WallPod EV 1	1	16 (1-vaihe)	1 x 3,6	834,92
WallPod EV 2	1	32 (1-vaihe)	1 x 7,2	834,92
WallPod EV 3	1	16 (3-vaihe)	1 x 11,0	978,99
WallPod EV 4	1	32 (3-vaihe)	1 x 22,0	978,99
BasicCharge 1	1	16 (1-vaihe)	1 x 3,6	1 249,93
BasicCharge 2	1	32 (1-vaihe)	1 x 7,2	1 249,93
BasicCharge 3	1	32 (3-vaihe)	1 x 22,0	1 490,60
BasicCharge 4	2	16 (1-vaihe)	2 x 3,6	1 771,13
BasicCharge 5	2	32 (1-vaihe)	2 x 7,2	1 771,13
BasicCharge 6	2	16 (3-vaihe)	2 x 11,0	2 170,00
BasicCharge 7	2	32 (3-vaihe)	2 x 22,0	2 170,00

Taulukosta 5.8 havaitaan, että kahden pistokkeen mallien (BasicCharge 4-7) kustannukset ovat keskimäärin noin 45 prosenttia suuremmat kuin yhdellä pistokkeella varustetuissa vastaavan teholuokan latureissa, joten ilman selkeää tarvetta kahden laitteen lataamiseksi ei kahden pistokkeen malli anna mitään konkreettista hyötyä. Taulukkoon kerättyjen mallien lisäksi AEV:n tarjonnasta löytyi myös avaimella lukittavia latausasemia, mutta ne jätettiin pois, koska Elematic Oyj:n sovelluskohteissa ei avainlukituksella saavuteta mitään etua. Huomattavin asia on kuitenkin itse latauskaapelien puuttuminen molemmista AEV:n tarjoamista latausasemista, joten tarvittavan latauskaapelin hankkiminen nostaa aseman hintaa huomattavasti. Esimerkiksi AEV:n kautta hankittuna 4 metriselle 3-vaihekaapelille (max. 32A) tulee hintaa n. 390 euroa ja vastaavan pituiselle 1-vaiheiselle (max. 16A) kaapelillekin kertyy hintaa n. 310 euroa.

Edullisin kolmevaiheinen laturi, joka löytyi 22 kW teholuokasta eurooppalaisella latausliitimellä varustettuna oli slovenialaisen Institute Metron -yhtiön verkkokaupassa oleva saksalaisvalmisteen säänkestävä, mutta ulkoasultaan hyvin pelkistetty latausasema, joka voidaan kytkeä joko yksi- tai kolmevaiheiseksi ja jota on saatavilla 3, 5, 8 ja 12 metrin latausjohdolla varustettuna. Aseman verollinen hinta on esimerkiksi 3 metrin latauskaapelilla 854 euroa ja 12 metrin kaapelilla 964 euroa. Myös tämän mallin latausvirta on säädettävissä, säätöalueen ollessa 6-32 A. [98]

Pienillä tilausmäärillä edullisemmaksi tavaksi tulee kuitenkin tilata tuotteet esimerkiksi ”Euroopan suurimmaksi sähköajoneuvojen latausratkaisujen verkkokaupaksi” itseään mainostavalta brittiläiseltä EV OneStop -yritykseltä, jonka verkkokaupasta [99] löytyvät myös edellä esitellyt Rolecin latausasemat. Kokonaiskustannuksia alentaa myös nyt ennätyksellisen alhaalla oleva punnan kurssi, joka kasvattaa hintaeroa suomalaisiin jälleenyymyjiin verrattuna, vaikka yhteistyön käynnistäminen on todennäköisesti sujuvampaa suomalaisen yrityksen kanssa. Tarkastellaan kuitenkin, millaiset olisivat latausaseman

minimikustannukset, mikäli asema rakennettaisiin itse samoista komponenteista, kuin mistä Rolecin latausasemat on kasattu. Taulukkoon 5.9 on kerätty aseman koteloitua lukuun ottamatta kaikki siihen vaadittavat komponentit.

*Taulukko 5.9. Latausasemaan vaadittujen kokonaiskustannukset [99, 100].*

Komponentti	Lisätiedot	Hinta (£, alv. 0 %)
Kontaktori	32 A, 3-napainen	8,74
Vikavirtasuojaja (30 mA, 1-v.)	20 tai 40 A	12,75
Vikavirtasuojaja (30 mA, 3-v.)	20 tai 40 A	23,00
Mode3 lataussäädin	Tuotekoodi: ACSE0020	105,41
Latauskaapeli (32 A, 5 m)	Type 2, yhdellä liittimellä	95,00
Pistorasia latausliittimelle	Type 2, naaras (max. 32A)	65,22
<b>Yhteensä:</b>		<b>286,90-297,15</b>

Taulukosta 5.9 havaitaan, kuinka latausaseman varsinaisten komponenttien kustannukset ovat kuitenkin erittäin matalat verrattuna valmiin latausaseman kustannuksiin. Edellä esitellyt kokonaiskustannukset ovat 1.11.2016 katsotun Englannin punnan kurssin mukaisesti n. 335-345 euroa riippuen siitä, käytetäänkö asemassa 1- vai 3-vaiheista vikavirtasuojajakytkintä. Mahdollisia lisäkustannuksia tulee valinnaisesta energiankulutusmittarista ja koteloinnista, joista energiankulutusmittari voidaan kuitenkin jättää tarvittaessa pois ja koteloinnin teko onnistuu varmasti myös Elematic Oyj:n omalla tuotantolinjalla. Huomionarvoista on, että edellä mainittu laskelma sisältää latausasemaan kiinteästi kytkettävän 5 metrin latauskaapelin, jonka toisessa päässä on tyyppin 2 eurooppalainen latausliitin (naaras) sekä myös ladattavaan laitteeseen asennettavan uros -mallisen pistorasian. Tätä pistoketta ei kuitenkaan löytynyt EV OneStopin verkkokaupan valikoimista, joten sen hinta katsottiin toisesta brittiläisestä verkkokaupasta, EV Connectors Ltd:stä [100]. Yhteydenotto Arctic Electric Vehicles Oy:n Toni Lahteen [101] vahvisti kuitenkin sen, että myös heidän kauttaan saa tarvittaessa Ratio Electricin ja Rolec Services Ltd:n valmistamia latauskomponentteja, joten tuotteiden tilaamiselle ulkomailta ei ole pakottavaa tarvetta.

Yhteenvedona todettakoon, että kaikki tässä luvussa esitetyt laturit kelpaavat täyttämään välimallin Preparerin edellyttämät lataustehot esitellyissä kolmessa konseptimallin linjastossa, mikäli lataus hoidetaan ainoastaan työvuorojen välillä. Koska kuitenkin Elematic Oyj:n toiveena oli, että akkupaketin kustannukset saataisiin mahdollisimman alhaisiksi, pidetään petien välistä latausta huomattavasti houkuttelevampana vaihtoehtona. Tällöin ainoat tässä luvussa esitellyistä latureista, jotka kykenevät täyttämään luvussa 5.1.1 lasketun noin 13,5 kW lataustarpeen, ovat 3-vaiheiset 32 A laturit, jotka kykenevät syöttämään maksimissaan 22 kW lataustehoa. Tällaisen laturin kustannukset ovat itse komponenteista kasaamalla noin 200-300 euroa ja valmiin latausaseman kohdalla noin 1 000-1 500 euroa.

## 5.4 Tasavirtalaturit

Lähtökohtaisesti vaihtovirtalatureita tehokkaampien tasavirtalatureiden kustannukset ko- hoavat kuvassa 5.3 esitetyn rakenteen sisältämistä komponenteista, kuten latausasemaan integroidusta tasasuuntaajasta, DC/DC -muuntimesta ja älykkästä ohjausväylästä joh- tuen huomattavasti edellisessä luvussa esiteltyjä vaihtovirtalatureita korkeammiksi.

Tasavirtalatureiden edullisinta kärkeä edustaa seinään asennettava Boschin DC Power Plus -latausasema, jossa on kuitenkin Boschin vaihtovirtalatureiden tavoin J1772 -stan- dardin mukainen *Combo 1* -mallinen latauspistoke. Tämä 9 995 dollarin hintainen Bo- schin keskinopea DC -luokan latausasema kykenee maksimissaan 24 kW lataustehoon [102]. Laturin tuote-esityksen [103] mukaan vaatimus syöttöjännitteelle on  $480V_{AC}$  suu- ruinen kolmevaihejännite ja sen sulakekokona on 40 A.

Boschin DC Power Plus -laturissa on lisäksi myös IP54 luokitus, joten kyseinen laturi soveltuu myös ulkotiloihin asennettavaksi. Huomattavaa on myös, että 7.2.2015 julkais- tun lehdistötiedotteen [104] mukaan laturi kykenee lataamaan yhteensopivien sähköauto- jen akuston 80% tasolle alle 30 minuutissa ja lisäksi tiedotteessa mainitaan General Mo- torsin hyväksyneen tämän Boschin vaihtoehdon omien sähköajoneuvojensa latausratkai- suksi, joten laitetta saa tilattua myös GM:n virallisten jälleenmyyjien kautta.

Valitettavasti tälle Boschin latausasemalle ei löytynyt kilpailijoita, joissa olisi ollut tyyppin 2 eurooppalainen pistoketyyppi, joten tässä luvussa ei tulla esittelemään tämän Boschin tasavirtalaturin ja CHAdeMO/CCS -standardiin perustuvien latausasemien lisäksi muita optioita. Tämän lisäksi tasavirtalataukseen vaadittavaa *tyypin 2 combo* -liitintä ei löytynyt vaihtovirtaliittimien tavoin sähköajoneuvojen komponentteja tarjoavista verkkokau- poista, joten tarvittaessa sellaisen hankkimisessa voidaan kääntyä esimerkiksi Phoenix Contactin puoleen.

CHAdeMO on taas CCS -standardin mukainen pikalataustyyppi, joka käsittää useita eri valmistajien ja teholuokkien pikalatausasemia. Sen kehityshistoria ulottuu vuoteen 2010, jolloin autonvalmistajat Toyota, Nissan ja Mitsubishi yhdessä lanseerasivat CHAdeMO ja CCS -latausstandardit. Tällä hetkellä CHAdeMO -malliston latureilla on toteutettuna lähes kaikki Japanin alueen pikalatausasemat ja Yhdysvalloissa CHAdeMO:n markkina- osuus on noin kolmannes kaikista pikalatausasemista. Maailmanlaajuisesti näiden lataus- asemien asennusmäärä ylitti 10 000 kappaleen rajan 2015 vuoden lopulla, mutta tästä lu- vusta yksinään Japanin osuuden ollessa yli 6000 asennettua CHAdeMO -asemaa, voidaan niiden maantieteellistä keskittymistä pitää merkittävänä. [105]

Vaikka sähköalan tuotetoimittaja GARO Finland Oy:n latausasemia käsittelevä opas mai- nitseekin vain 20 ja 55 kW tehoisten CHAdeMO -asemat [106], tulee CHAdeMO:n ja Teslan SuperCharger latausasemien välillä käytävä kilpailu johtamaan hyvin todennäköi- sesti lataustehojen nousemiseen lähitulevaisuudessa. Tämän kilpajuoksun tuloksia onkin jo osittain havaittavissa, sillä *Electrek.co* uutislähteen [107] mukaan Tesla on luvannut

toimittaa vuoden 2018 aikana Sveitsiin 100 kappaletta 150 kW tehoisia pikalatausasemia. Teslan SuperCharger latausasemien alkuperäinen teho oli vuonna 2013 tehdyn lanseerauksen aikana 90 kW [108]. Vastaavasti CHAdeMO:n taustalla olevan organisaation 1.6.2016 julkaisema lehdistötiedote [109] paljastaa ensimmäisten 150 kW teholuokan ja 350 A latausvirran CHAdeMO -asemien asennusajankohdan osuvan vuoteen 2017. Lisäksi samassa tiedotteessa todetaan jopa 350 kW tehoisten asemien kehitystyön olevan käynnissä.

CHAdeMO:sta on saatavilla myös sähköajoneuvojen konversioprojekteja suunnittelevan ja toteuttavan EVTV Motor Verks yrityksen kautta 22 950 dollarin hintainen 50 kW DC/DC -optio, mikä mahdollistaa laturin käyttämisen esimerkiksi aurinkosähkösovellustusten yhteydessä tai paikoissa missä 3-vaihe virtaa ei ole saatavilla. Mikäli laturia syötetään ulkoisen akuston kautta, tulee sitä syöttävän akuston jännitetason olla 300-400 V<sub>DC</sub>, jolloin sen ulostulojännite on säädettävissä 50-500 V<sub>DC</sub> välillä, maksimivirran ollessa 125 A. Laturia on kuitenkin mahdollista syöttää myös suoraan aurinkopaneelilla, jolloin sisään tulevalle jännitteelle on asetettu 450-600 V<sub>DC</sub> vaatimus. Tällöin ulostulojännite jää 300-435 volttiin ja maksimiteho putoaa 50 kW:sta 10 kW:iin, mikä johtuu laturiin integroidun paneelien tehopisteen seurantajärjestelmälle (MPPT) asetetusta tehorajasta. EVTV Motor Verks on kuitenkin käyttänyt heidän valmistamaansa DC/DC -luokan CHdeMO:a onnistuneesti niin *Nissan Leafin*, *Mitsubishi iMievin*, *Kia Soulin* kuin *Teslan* sähköautojen lataamiseen, vaikka Teslan tapauksessa jouduttiinkin käyttämään SuperCharger-CHAdeMO -adapteria. [110]

CHAdeMO:n tai Teslan SuperCharger asemien hintatiedot eivät kuitenkaan vaikuta olevan julkisia, sillä tähän asti niitä on luovutettu lähinnä suuriin infrahankkeisiin. Sähköajoneuvojen kehitysuutisia julkaiseva InsideEV -uutislähde uutisoi kuitenkin jo 28.3.2013 yhdysvaltalaisen Aerovironmentin myyneen Nissanin ja Car Charging Groupin väliseen hankkeeseen 48 kappaletta 50 kW CHAdeMo -latausasemia, jolloin kauppahinnaksi oli muodostunut 792 912 dollaria ilman asennuskustannuksia [111]. Tästä voidaan päätellä karkeaksi hinta-arvioksi yhdelle 50 kW pikalatausasemalle noin 16 500 dollaria, mutta luonnollisestikin yksittäisten asemien hankintakustannukset pysyttelevät hieman korkeampina. Teemu Heiskan opinnäytetyössä [73] ABB:n valmistamien 22-50 kW Terra 53 pikalatausasemien hinnaksi on ilmoitettu 25 000-30 000 euroa, mihin nähden edellä laskettu 16 500 dollarin kustannus vaikuttaa mahdollisten alennusten kanssa hyvinkin mahdolliselta.

## 5.5 Trukkiakkujen laturit

Trukkiakut eroavat sähköautojen akuista pääosin matalamman jännitetason sekä ennen kaikkea akkukemiansa johdosta. Yleisimmät sähkötrukeissa käytettävät akut ovat lyijy-akkuja, kun taas tämän päivän sähköautoissa käytetään lähes poikkeuksetta litiumioni-akkuja. Syitä tähän on esitetty jo luvun 2 yhteydessä, joten erottelua ei lähdetä tämän luvun yhteydessä enää uudelleen kertaamaan.



Trukkeihin ja muihin sovelluksiin, joissa käytetään ajoakkuina joko tavallisia lyijyakkuja tai nykyisin yhä enemmän geeli- tai AGM-akkuja, löytyy litiumioni -akkujen tavoin latausvaihtoehtoja niin yksi- kuin kolmevaiheisistakin akkulatureista. Vaikka valinnanvara on suhteellisen paljon, rajoittuvat latureiden kanssa yhteensopivat akkupakettien jännitetasot käytännössä 24-80 V<sub>DC</sub> välille. Tästä seuraa se, että esimerkiksi kuuden 12 V lyijyakun sarjaan kytkennästä saatava akkupaketin jännitetaso on 72 V<sub>DC</sub>, jolloin taulukon 5.4 edellyttämä 13,15 kW latausteho petien välisessä latauksessa nostaa tarvittavan latausvirran 182,5 Ampeeriin. Näin suureen latausvirtaan ei yhdenkään tarkastellun lyijyakkulaturin kapasiteetti riitä. Lähimmäksi tätä laskettua latausvirtaa pääsee italialaisen laturivalmistajan Mori Raddrizzatorin n. 1 700 euron hintaisella kolmevaiheisella *HF -akkuvaraajalla*, jonka suurin mahdollinen latausvirta 72 V jännitetasolla on 160 A [112].

Toisena huomiona lyijyakkuja kohtaan on niille ilmoitetun kapasiteetin riippuminen käytettävästä kuormitusvirrasta. Yleiseksi käytännöksi on vakiintunut 0,05C -arvoa vastaavan kuormituksella käytettävän kapasiteetin nimeäminen akun nimelliskapasiteetiksi. Mikäli Preparerin akusto suunniteltaisiin lyijyakkuja käyttämällä sellaiseksi, että siitä jokin pedin kohdalla purettava energiamäärä ladattaisiin petien välisen tauon aikana takaisin akustoon, kohdattaisiin muutamia ongelmia, jotka vältettäisiin käyttämällä lyijyakkujen sijasta jotain muuta akkukemiala.

Esimerkiksi 6 x 150 metrin PRO -mallin linjastokonseptin tapauksessa akuston purkuun kuluu yhden pedin työvaiheisiin käytettävä noin 1-1,5 tunnin aika, jolloin varauksen purku tehtäisiin 0,67-1,00 C:n nopeudella. Koska tämä aika sisältää kuitenkin hetkellisiä tilanteita, jolloin Preparer ei ole käytössä tai sitä käytetään vain osittaisella kuormituksella, nousevat hetkelliset varauksen purkunopeudet väkisinkin tästä moninkertaiseksi. Tarkastelemalla vielä taulukkoa 2.2 havaitaan, että esimerkiksi 1,00 C:n nopeudella purettavasta akusta saadaan käytettyä vain noin 60 % sen nimellisestä kapasiteetista, jolloin akkupaketti tulisi mitoittaa korvaamaan varauksen nopeasta purkamisesta johtuva kapasiteetin alentaminen. Tämän lisäksi latauksessa jouduttaisiin käyttämään 20 minuutin latausajalla 3C ja 30 minuutin latausajalla 2C latausnopeuksia, kun taas useimmille lyijyakuille asetettu lataussuositus on maksimissaan 0,25C. Näin ollen sekä akuston lataamisessa että purkamisessa vaadittavat C-arvot nousevat lyijyakkujen tapauksessa niin korkeaksi, että vaikutukset näkyvät väistämättä akkujen elinkaareissa, joten lyijyakkujen tapauksessa petien välistä lataamista ei voida pitää mahdollisena.

Koska lyijyakkujen elinkaari lyhenee huomattavasti DoD -tason kasvaessa, joudutaan akkupaketti mitoittamaan huomattavasti suuremmaksi kuin litiumioni -akkujen tapauksessa. Esimerkiksi geeli- ja AGM-akuilla saadaan 0,05C:n arvoa vastaavalla purkuvirralla n. 1500-1800 latauspurkusykliä (standardiolosuhteissa), mikäli DoD -taso pidetään maksimissaan 30 %, mutta esimerkiksi 50 % DoD -tasoon asti purettaessa akkujen syklinen käyttöikä laskee alle puoleen edellisestä. Tästä voidaan päätellä, että lyijyakkujen tapauksessa akuston kapasiteetti tulisi varata noin 70 % käytettävää kapasiteettia suurem-

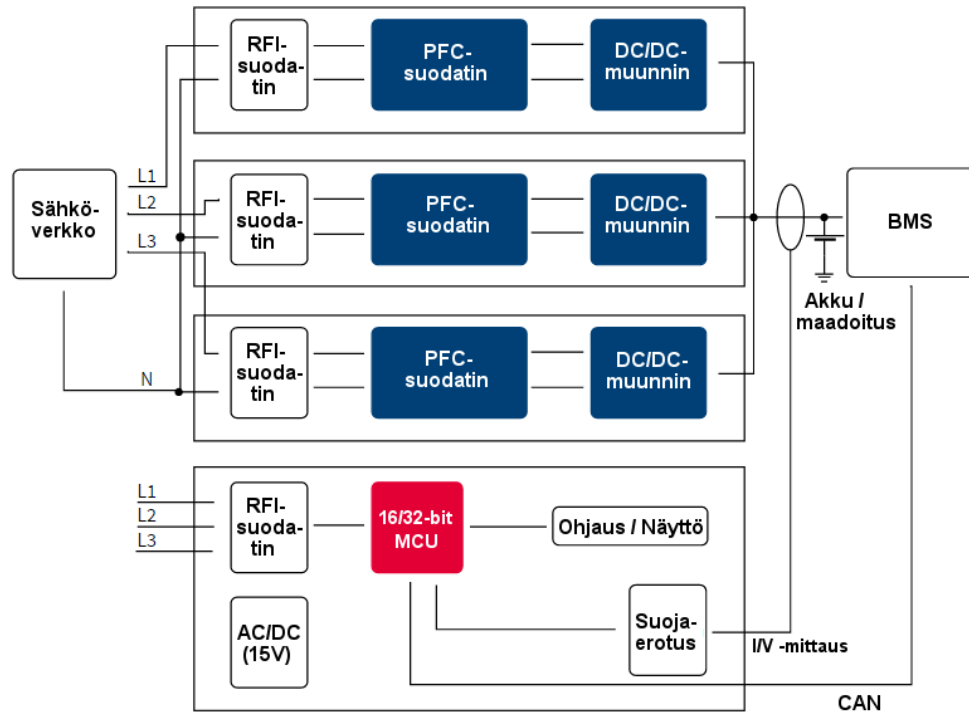
maksi, minkä johdosta esimerkiksi 6x150m PRO -linjastokonseptin tapauksessa vaadittavan akkupaketin kapasiteetti tulisi olla noin 88 kWh. Tällöin 72 V<sub>DC</sub> jännitetasolla toimivan akuston kapasiteetin tulisi olla ampeeritunteina:

$$88\,000\text{ Wh} / 72\text{ V} = 1220\text{ Ah.}$$

Tämä tarkoittaisi kuuden 12 V akun sarjaankytkennän ohella esimerkiksi kymmenen 120 Ah akun rinnankytkentää. Laskettaessa tällaisen akkupaketin kustannuksia ja ulkomittoja käytetään esimerkkinä 325 euron hintaista 12V/120Ah Exiden geeliakkua, jonka ulkomitat ovat 350x175x290 mm [113]. Tällöin akkupaketin kustannukset olisivat pelkkien akkujen osalta 19 500 euroa, mistä olisi kuitenkin todennäköisesti vähennettävissä esimerkiksi 10 % tukkualennuksella laskemalla noin 2 000 euroa. Kustannukset ylittävät silti moninkertaisesti suunnitellut 8 kWh litiumioniakuston, mutta suurin ongelma on tällaisen 60 lyijyakun paketin mahdollistamien uudentyypin Preparerin takaosaan varattuun akkukaappiin. Laskettaessa esimerkkinä käytetyn Exiden geeliakun ulkomitoilla tarvittavaa tilavarausta, saadaan pelkkien akkujen tilavuudeksi ilman tarvittavia kaapelointeja, jäähdytystä tai akkutekniikan oheislaitteita 1,07 m<sup>3</sup>, kun taas luvussa 4 esitettyjen Preparerin akkukaapin mitoilla laskettuna sen tilavuudeksi saadaan vain 0,92 m<sup>3</sup>. Näiden seikkojen pohjalta ei trukkiakkuvaraajia esitellä tässä diplomityössä tämän syvällisemmin, mutta mahdollisten jatkosovellusten varalle on nyt tiedossa lyijyakujen lataamiseen soveltuvien latureiden tehoalueet.

## 5.6 Onboard AC/DC -laturit

Lukujen 5.2 ja 5.3 esiteltiin useita vaihtoehtoisia laturioptiota, jotka erosivat toisistaan käytännössä lataustehojen, pistoketyypin ja ulkoasun osalta toisistaan. Huomattavaa on, ettei yksikään esitellyistä vaihtovirtalatureista pysty syöttämään akustoa sellaisenaan, vaan varsinainen latausratkaisu löytyy kaupallisten sähköautojen tapauksessa itse ajoneuvon integroituna. Tasavirtalatureiden tapauksessakin ajoneuvon puolelta vaaditaan taas CAN-väylää käyttävä BMS -järjestelmä, jonka löytäminen osoittautui kuitenkin luvun 3 yhteydessä melko haasteelliseksi. Tässä luvussa esitellään muutamia kaupallisissa sähköautoissa olevia onboard-latureita, jotka yhdessä BMS:n kanssa hoitavat AC-latauksen tapauksessa karkeasti kuvailtuna kaiken latauksen säätöön ja optimointiin tarvittavat tehtävät. Kuvassa 5.5 on nyt esitettynä yksinkertaistettu rakenne BMS:n ja onboard -laturin kytkennästä.



**Kuva 5.5** AC/DC -muunnoksen tekevän onboard-laturin perusrakenne. Kuvassa RFI-suodatin vastaa korkea taajuksisten yliaaltojen suodattamisesta, kun PFC-suodatin on taas tehokertoimen korjaamiseen käytettävä aktiivisuodatin. MCU on lyhenne termistä microprocessor control unit, eli se on yksinkertaisesti mikroprosessorin varaan rakennettu BMS:n ohjausyksikkö. Kuvan ylempi lohko käsittää varsinaisen onboard -laturin ja sen alempi lohko on BMS -yksikkö, mihin tuodaan I/V -mittaus akustolta. Muokattu lähteestä [114].

Ensimmäinen huomiota kiinnittänyt onboard-laturiyksikkö oli Chevrolet Volt sähköauton 3,3 kW tehoinen OEM -laturi, joka on saatavissa General Motorsin osanumerolla #22799689 esimerkiksi GM Wholesale Direct -sivuston kautta kohtuullisella 1 290 dollarin hinnalla [115]. Kyseisen laturin kontrollointi tapahtuu samoin kuten muidenkin uusien kaupallisten latureiden tapauksessa, CAN-väylää pitkin. Kyseinen laturi on kuitenkin onboard-laturi, joka on tarkoitettu asennettavaksi kiinteästi sähköautoon, joten sen erikoisuutena on vaadittava 50 % sekoitussuhteella jäähdytykseen käytettävä vesi-glykoliseos, minkä johdosta ulkoinen vesipumppu ja -kierto tarvitsisi koostaa tätä laturia varten. Nestejäähdytteisenä sen kokoa on saatu kuitenkin pienennettyä huomattavasti laitteen painon jäädessä vain 9,30 kilogrammaan ja ulkomittojen ollessa noin 33 x 28 x 13 cm. [116]

Tämä Voltin laturi soveltuu käytettäväksi 120-240VAC jännitetasolla ja 50-60 Hz taajuudella, joten sen soveltuvuus esimerkiksi Preparerin välimallin lataamiseen vaikuttaa lupaavalta. Laturin ulostulotehoon vaikuttaa kuitenkin sille asetetut rajoitteet niin ulostulojännitteen, -virran kuin -tehon osalta, jotka ovat maksimissaan 420 VDC, 12,6 A ja 3,3 kW. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että esimerkiksi 120 V<sub>DC</sub> jännitteen omaavan akuston tapauksessa saatava latausteho rajoittuu 12,6 A virtarajan johdosta noin 1,5 kW:iin. [116]

Toisena saatavilla olevana OEM -laturina on Teslan oma 11 kW onboard -latausyksikkö, jonka hinta on Teslan omassa verkkokaupassa 2 000 dollaria [117], mutta tästä vaihtoehdosta ei löytynyt datalehteä tai käytännössä mitään muutakaan yksityiskohtaisempaa informaatiota. Tämän johdosta siirrytään nyt tarkastelemaan muita kaupallisia AC/DC-muuntimen omaavia latureita kuin sähköajoneuvojen OEM -latureita.

Yhdysvaltalaisen Manzanita Micro -yhtiön valmistamia BMS -järjestelmäpiirejä tutkittiin jo luvun 3.4 yhteydessä, jolloin mainittiin niiden soveltuvuudesta erityisesti saman valmistajan latausyksiköiden yhteyteen. Kyseiset Manzanita Micron PFC -sarjan akkulatorit [118] soveltuvat erityisesti litiumioni -akustoille, sillä ne käyttävät lataamiseen ensin tasasuuruista virtaa, minkä jälkeen laturit siirtyvät lataamaan akustoa vakiojännitteellä, kuten luvussa 2.3.3 esitettyssä litiumioni -akkujen latausohjeessa todettiin. Latureista on saatavilla viittä mallia, joiden ulkomitat ovat PFC 20/30/40 -mallien osalta 358 x 264 x 145 mm ja PFC 50/75 -mallien osalta 559 x 318 x 177 mm [118].

Manzanita Micron latureita ei ole kuitenkaan suojaerotettu, minkä johdosta niitä ei voida kytkeä rinnan. Tästä johtuen latureiden käyttökohteet rajoittuvat vain niihin laitteisiin, joihin PFC -sarjan latureiden lataustehot riittävät. Näiden latureiden tärkeimmät ominaispiirteet ovat esitettynä taulukossa 5.10, mutta on erikoista, ettei niiden valmistaja ole ilmoittanut latureille lainkaan lataustehoja. Sen sijaan lähes jokaiselle edellä esitellylle laturimallille löytyi ulos- ja sisääntulovirtojen kuvaajat akuston jännitetason funktiona, jotka ovat esitettynä liitteessä 4 [119].

**Taulukko 5.10.** Manzanitan PFC -sarjan latureiden ominaispiirteitä [118-121].

Malli	Akkupaketin jännite, kun $I_{out} = I_{out,max} \pm 3 \text{ A}$ (V <sub>DC</sub> )	$I_{out,max}$ (A)	Paino (kg)	Hinta (USD \$)
PFC 20	12 - 120	25	7,25	2 175
PFC 20B	12 - 156	30	7,80	2 475
PFC 30	12 - 168	43	7,80	3 025
PFC 40	12 - 180	44	8,43	3 325
PFC 50	36 - 192	46	14,90	3 650
PFC 75	-	~ 69	15,90	4 500
<b>Käyttölämpötila</b>	-29 - +49°C			
<b>Sisääntulojännite</b>	100-240 V <sub>AC</sub> (40-80 Hz)			
<b>Ulostulojännite</b>	12-450 V <sub>DC</sub>			

Taulukon 5.10 toisessa sarakkeessa mainittu akkupaketin jännite tarkoittaa sitä latureiden I-V kuvaajasta löytyvää aluetta, missä latausvirta pysyisi lähes vakiona ennen sen laskeamista kohti maksimiulostulojännitteellä saatavaa pienintä latausvirtaa. Tämä alue katsottiin kuvaajista silmämääräisesti siten, että ulostulovirta olisi maksimiaan  $\pm 3 \text{ A}$  laturin maksimivirrasta. Eräs huomionarvoinen asia liittyy laturien mallinimiin, sillä PFC -ter-

min perässä oleva numeroluku viittaa siihen maksimivirtaan, mitä laturi kykenee ottamaan AC-puolelta, joten tällä merkinnällä ei ole mitään tekemistä laturin DC-puolelta saatavan virran kanssa. Latureiden I-V kuvaajista kerättyjen tietojen avulla taulukkoon 5.11 on nyt laskettuna PFC -sarjan latureiden ulostulotehoja eri akkupaketin jännitetasoilla, poislukien PFC 75 -malli, jolle ei löytynyt kyseistä kuvaajaa. Tälle mallille on kuitenkin arvioituna PFC 40 ja PFC 50 latureiden I-V kuvaajan avulla ulostulovirran maksimiarvoksi n. 69 A.

**Taulukko 5.11.** Manzanitan PFC -sarjan latureiden virta-jännitekuvaajasta lasketut ulostulotehot 240V<sub>AC</sub> sisääntulojännitteellä [119].

Malli	P <sub>out</sub> (kW) V <sub>DC</sub> =72	P <sub>out</sub> (kW) V <sub>DC</sub> =120	P <sub>out</sub> (kW) V <sub>DC</sub> =180	P <sub>out</sub> (kW) V <sub>DC</sub> =240	P <sub>out</sub> (kW) V <sub>DC</sub> =312	P <sub>out</sub> (kW) V <sub>DC</sub> =450
PFC 20	1,8	2,8	4,0	4,4	4,7	4,5
PFC 20B	2,2	3,5	4,5	4,4	4,7	4,5
PFC 30	3,0	4,9	6,7	6,7	6,7	6,8
PFC 40	3,2	5,2	7,4	8,9	8,7	9,0
PFC 50	3,3	5,3	7,6	9,0	10,5	11,3

Tarkastelemalla nyt taulukkoon 5.11 listattuja ulostulotehoja eri jännitetasoilla, voidaan havaita, että PFC 20 ja PFC 20B -malleilla saadaan suurin ulostuloteho noin 200-300 V<sub>DC</sub> akkujännitteellä, kun taas maksimijännitteellä laturin teho on jo alhaisempi. Sen sijaan PFC 30, 40 ja 50 -malleilla suurin saatava ulostuloteho saadaan vasta 450 V<sub>DC</sub> jännitetasolla. Koska Preparerille suunniteltu pikalataus vaatisi n. 13,2 kW lataustehon, eivät taulukon 5.10 lataustehot ole vielä riittäviä. Vaikka PFC 75 -mallin laturille ei löytynyt omaa I-V kuvaajaa, voidaan liitteessä 4 esitetyistä PFC 30, 40 ja 50 mallien I-V kuvaajista ja taulukon 5.11 tiedoista laskea, kuinka laturin sisääntulovirran kasvattaminen kolmanneksella nostaa ulostulotehoa. Esimerkiksi 312-450 V<sub>DC</sub> jännitetasoilla saadaan noin 30 % enemmän lataustehoa, kun sisääntulovirtaa kasvatetaan kolmanneksella ja taas neljänneksen nousu sisääntulovirrassa näyttäisi vaikuttavan laturin ulostulosta saatavaan tehoon noin +20-25 %. Koska muutos on suhteellisen lineaarinen, voidaan tällä suhteellisen karkealla arviolla laskea PFC 75 -mallin antamaksi ulostulotehoksi 312-450 V<sub>DC</sub> jännitetasoilla noin 40-45 % PFC 50 -mallia tehokkaammaksi. Täten 312 V<sub>DC</sub> jännitetasolle suoritettu tehoarvio on noin 14,5-15,0 kW ja vastaavasti 450 V<sub>DC</sub> jännitteellä noin 15,5-16,5 kW. Tämän karkean arvion puitteissa voidaan olettaa, että 4 500 dollarin hintainen PFC 75 -mallin laturi riittäisi välimallin Preparerin lataamiseen petien välillä, mikäli akuston jännitetaso olisi suunnilleen 250-450 V<sub>DC</sub> välillä. Tämän ilmajäähdytteisen laturin soveltuvuus vaikuttaisi paremmalta kuin esimerkiksi Chevrolet Voltin nestejäähdytteinen OEM -laturi, vaikka sen ulkomitat ovatkin ilmajäähdytyksestä johtuen hieman suuremmat.

Toinen onboard -laturiksi soveltuva vaihtoehto, joka esiteltiin edellisten Manzanitan laturien kanssa luvussa 3.4 oli Elconin valmistamat, ilmajäähdytyksellä toteutetut laturit,

joita on saatavilla ainakin EV-Westin verkkokaupasta [122]. Kyseisiä Elconin latureita on saatavilla 1,5- 6,0 kW teholuokassa ja niiden hintaskaalan ollessa noin 570-2 100 dollaria, voidaan niitä pitää suhteellisen edullisina. Tärkein ominaisuus on kuitenkin laturista löytyvä suojaerotus, minkä johdosta niitä voidaan kytkeä rinnan ja saavuttaa näin Preparerin vaatima n. 13,2 kW latausteho. Kyseinen latausteho on käytännössä mahdollista toteuttaa ainoastaan neljällä 4 kW laturilla tai kolmella 5 kW laturilla, sillä näiden lisäksi saatavilla on ainoastaan 1,5 ja 2,5 sekä 3 ja 6 kW laturimallit. Näistä vaihtoehdoista 3 x 5 kW konfiguraatio tulee kuitenkin edullisimmaksi, sillä 4 ja 5 kW latureiden välinen hintaero on ainoastaan sata dollaria. Näin ollen kolmella Elcon PFC5000 -mallin yksiköllä kasattavan laturin kokonaiskustannukset ovat noin 4 800 dollaria, sillä yhden yksikön hinta on EV-Westin verkkokaupassa 1 599 dollaria [123].

Elconin 5 kW laturin tapauksessa sisääntulevaksi jännitteeksi käy 90-260 V<sub>AC</sub> ja taajuudeksi 50-60Hz, mutta alle 220 V<sub>AC</sub> syöttöjännite laskee laturin ulostulotehon 1,5 kW:iin eikä laturin ulostulojännite ole konfiguroitavissa. Laturia on nimittäin saatavilla yhdellätoista eri nimellisjännitteellä, mikä käy ilmi laturin datalehdessä [124]. Taulukkoon 5.12 on listattuna kaikki tästä 5 kW laturista saatavat mallit, missä ulostulovirta on laskettu vastaamaan 230 V<sub>AC</sub> syöttöä.

**Taulukko 5.12.** Elconin 5 kW laturin mallivariaatioiden jännite- ja virtatasot [124].

Nimellisjännite (V <sub>DC</sub> )	Maksimijännite (V <sub>DC</sub> )	Ulostulovirta, max (A)
36	51	90
48	68	87
60	85	75
72	102	62
84	119	52
96	136	45
120	170	37
144	204	30
156	221	27
192	272	22
288	408	15

Taulukosta 5.12 havaitaan, että vaikka laturin eri mallivariaatioita onkin runsaasti, ovat myös niiden jännitealueet kohtalaisen laajoja. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi 156 V<sub>DC</sub> nimellisjännitteellä toimiva laturi kykenee lataamaan täydellä 5 kW teholla akustoa, jonka nimellisjännite on välillä 156-221 V<sub>DC</sub>, joten Elconin mallistosta löytyy varmasti sopiva laturi välimallin Preparerin akuston lataamiseen, oli akustoton lopullinen jännite-taso sitten mikä tahansa 36-408 V<sub>DC</sub> väliltä. Huomattavaa on kuitenkin, että taulukossa 5.12 mainittu maksimivirta on käytössä vain sillä jännitteellä, millä 5 kW tehoraaja saavutetaan. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi edellä mainitulla 156 V nimellisjännitteisellä laturilla saadaan 27 A latausvirta käyttöön vain 185 V<sub>DC</sub> jännitetasolla, minkä ylittyessä latausvirta pienenee 5 kW tehovaatimuksen rajoissa. Vastaavasti kyseinen laturi lataa 156

$V_{DC}$  akustoa vain 4,2 kW teholla, mikä ei riitä Preparerin lataamiseen 6x150m PRO-linjastolla, joten tässä tapauksessa tulisi valita korkeintaan 144 V malli.

Näiden Elconin latureiden huonona puolena on toisaalta virallisen valmistajan puuttuminen, sillä laturien valmistamisesta ja jakelusta vastaa EVT Motor Verks -yhtiön mukaan kiinalainen Chennic Technology Co Ltd -yritys [125]. Näin ollen laturin saatavuus voi olla tulevaisuudessa epävarmaa, mutta myös mahdollinen yhteistyö jäisi ainoastaan ulkoisesta verkkokaupasta, kuten EV-Westistä, tehtävien tilausten varaan eikä tuotetukea ole juuri saatavilla. Pidetään kuitenkin tämä vaihtoehto vielä mukana, sillä Elconin latureista saisi alle 5 000 dollarin hinnalla 15 kW tehoisen käyttövalmiin onboard-laturin.

Yhtenä mielenkiintoisena latausoptiona Elconin ohella ovat yhdysvaltalaisen Current Ways Technologiesin valmistamat BC -sarjan akkulaturit, joiden sarjaan- ja rinnankytkennän mahdollisuuksista mainittiin jo luvun 5.1.3 yhteydessä. Yhteydenotto kyseiseen yritykseen tuotti nopeita vastauksia [126], joten ainakin yhteistyöllisessä mielessä Current Waysia voisi pitää Elconiin nähden potentiaalisempana kumppanina.

Kyseisiä latureita on saatavilla sekä neste- että ilmajäähdytteisinä, mutta vaadittavan nestekierron puuttumisen vuoksi tarkastellaan nyt ainoastaan heidän ilmajäähdytteisiä, kuvassa 5.6 esitettyä mallia, mistä on tarjolla kaksi mallivariaatiota. Näistä molemmat omaavat laturin datalehden mukaan 3 kW ulostulotehon, IP67 koteloituokituksen,  $-40 - +65\text{ }^{\circ}\text{C}$  käyttölämpötila-alueen sekä täyden 2 vuoden takuun, siinä missä useimpien latureiden takuu on Elconin tavoin rajoitettu 1 000 tuntiin tai yhteen vuoteen. Itse asiassa näiden kahden mallivariaation välisenä erona on ainoastaan soveltuvuus erisuuruiselle DC-puolen jännitealueelle, joista toinen on 112-225 ja toinen 225-450  $V_{DC}$ . [127]



**Kuva 5.6** Current Ways Technologiesin ilmajäähdytteinen 3 kW akkulaturi, joka painaa 12 kg ja sen ulkomitat ovat noin 40,6 x 20,1 x 17,2 cm. Näissä mitoituksissa ei ole huomioituna kuvassakin näkyvää CAN-väyläjohtoa. [128].

Sähköpostin välityksellä näiden latureiden kappalehinnaksi saatiin vahvistettua 1 782 dollaria sekä AC/ DC-puolien 3 metriä pitkät syöttökaapelit sekä 1 metrin CAN-kaapelin

sisältävän johtosarjan kustannukseksi 138 dollaria. Tämän lisäksi tuotteiden toimitusajaksi vahvistui samalla 10-12 viikkoa, joten mahdollinen yhteistyö Current Waysin kanssa ainakin vaikuttaisi lupaavalta, vaikkakin nämä teollisuustason standardit täyttävät BC -sarjan laturit ovatkin monia kilpailijoita kalliimpia.

Koska laturit kommunikoivat CAN -väylää pitkin, on niiden kytkeminen rinnan hyvin yksinkertaista. Tällöin latureiden CAN-portit yhdistetään toisiinsa, jolloin yksi laturi toimii ”*masterina*”, muiden laturimoduulien jäädessä ”*slave*” -tilaan kuuntelemaan master-yksikön toimintaa, ja käynnistyvät saman aikaisesti master -yksikön kanssa [127]. Koska välimallin Preparerin osalta vaadittavat lataustehot olivat 8,76, 11,68 ja 13,15 kW, tulisi näitä BC -sarjan latureita olla joko 3, 4 tai 5 kappaletta riippuen käytettävästä tehdaslayoutista. Mikäli välimallin Preparerin onboard -laturi koottaisiin näistä Current Waysin BC -sarjan latureista sellaiseksi, että petien välisen latauksen tehotarve täyttyisi, olisi itse latausyksikön kustannukset ilman kaapelisarjoja 6x150m PRO-konseptilla 8 910 dollaria, 4x150m EDGE-konseptilla 5 346 dollaria ja 4x200m EDGE-konseptilla 7 128 dollaria. On tietenkin todennäköistä, että mikäli tämän diplomityön tutkimuskohteena olevassa Elematic Oyj:n hankkeessa päädytään käyttämään näitä 3,0 kW latureita, lasketaan PRO-linjastolla käytettävä latausteho 12 kW:iin, jolloin laturiyksiköiden tarve pienenee yhdellä. Tästä ei pitäisi aiheutua mitään ongelmia, varsinkaan, jos akkupaketit mitoitetaan luvussa 5.1.1 esitettyyn 8 kWh kokoon.

Edellä esitetyistä latureista eniten luottamusta herättivät Current Waysin BC -sarjan laturit, mutta eräs vastaava laturimalli on myös sveitsiläisen Brusa Elektronik AG:n valmistama Brusa NLG513 -onboard laturi, jonka ilmajäähdytteinen 3,3 kW malli on esitettyinä kuvassa 5.7. Brusan laturit vastaavat ulkoasultaan hieman BC -sarjan latureita, mutta näyttäisi siltä, että Brusan latureita on käytetty sähköajoneuvojen muuntamisprojekteissa selvästi eniten. Esimerkiksi EVT Motor Verks -yhtiön mukaan Brusan laturia on käytetty ainakin Azure Dynamicsin ja Ford Motor Companyn valmistamassa eTransitissa sekä heidän omissa projekteissaan, joissa he ovat onnistuneesti muuntaneet polttomoottorikäyttöisiä autoja, kuten Speedster Reduxin, Porsche 550 Spyderin ja Mini Cooper Clubmanin sähköautoksi. [128, 129]



**Kuva 5.7** Brusan NLG513 ilmajäähdytteinen ja 6,3 kg painoinen 3,3 kW akkulaturi, jonka ulkomitat ovat erittäin kompaktit: 33,4 x 25,0 x 8,8 cm [130, 131].



Current Waysin tavoin myös Brusan akkulaturille on myönnetty täysi kahden vuoden takuu, mutta Brusan kotelointiluokitus on hieman kevyempi, sen täyttäessä IP54 -luokituksen vaatimukset. Brusan toimintaympäristölle asetettu lämpötilavaatimus on myös hieman kevyempi,  $-25 - +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mutta tästä ei ole haittaa Elematic Oyj:n sovelluskohteissa, joita tarkasteltiin luvun 4 yhteydessä. Myös Brusan laturille ilmoitetut vaatimukset sisääntulevalle jännitetasolle soveltuvat laajuutensa vuoksi käytännössä kaikille markkina-alueille, vaikka ne ovatkin Brusalla laajemmat kuin muiden vastaavien latureiden tapauksessa, 100-264 VAC ja 48-62 Hz.

Vaikka kyseisen Brusa NLG513 laturin nimellisjännite onkin  $400\text{ V}_{\text{DC}}$ , kykenee se lataamaan jopa  $200\text{--}520\text{V}_{\text{DC}}$  jännitteistä akustoa. Huomattavaa on kuitenkin sen maksimilatausvirraksi asetettu  $12,5\text{ A}$ , mikä tarkoittaa sitä, että  $3,3\text{ kW}$  latausteho on käytettävissä vain vähintään  $264\text{ V}_{\text{DC}}$  akkujännitteen kanssa. Verrattaessa tätä edellä esiteltyihin Current Waysin BC -sarjan latureihin, voimme todeta, että Brusa tarjoaa saman  $3,0\text{ kW}$  lataustehon, mikäli akkupaketin jännitetaso on vähintään  $240\text{ V}_{\text{DC}}$ , kun taas BC -sarjan latureilla  $3,0\text{ kW}$  latausteho on käytettävissä sekä  $112\text{--}225$  että  $225\text{--}450\text{ V}_{\text{DC}}$  akustojen tapauksessa. Brusan hyötysuhteeksi on ilmoitettu  $93\%$ , kun taas vastaavat hyötysuhteet ovat BC -sarjalla  $92\%$  ja Elconin tapauksessa  $90\%$ . [131]

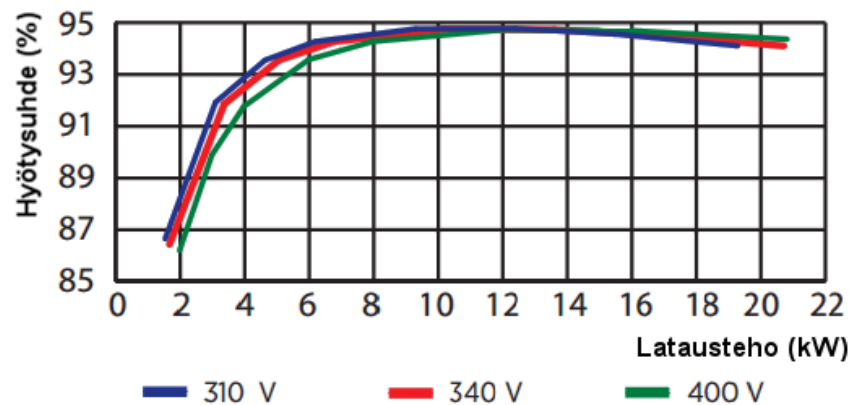
Brusalta on myös saatavilla  $3,3\text{ kW}$  tehoinen NLG514 -mallin latausyksikkö, jonka maksimiulostulojännite on  $520\text{ V}_{\text{DC}}$  sijasta  $720\text{ V}_{\text{DC}}$ , mutta näin suurta jännitetasoa ei ole ainakaan tässä vaiheessa suunniteltuna välimallin Preparerin tai poikkisiirtopalkkien tapauksessa. Vaikka Brusan NLG -sarjan latureista löytyvän suojaerotuksen ja CAN-väylän johdosta latausyksiköt ovatkin kytkettävissä rinnan, löytyy Brusan valikoimista myös kuvassa 5.8 esitetty kolmivaiheinen ja  $22\text{ kW}$  tehoinen onboard -latausyksikkö. Kyseistä kolmevaihelaturia on saatavissa kahdella mallivariaatiolla,  $310\text{--}430\text{ V}_{\text{DC}}$  ulostulojännitteen NLG664:nä ja erityisesti raskaan liikenteen sähköajoneuvojen laturiksi tarkoitettulla,  $570\text{--}750\text{ V}_{\text{DC}}$  jännitetasolle sopivalla NLG667:nä. [132-134]



**Kuva 5.8** Brusan NLG664/667 -onboard nestejäähdytteinen  $12\text{ kg}$  painava  $22\text{ kW}$  latausyksikkö, jonka ulkomitat ovat vain  $50,4 \times 35,2 \times 8,4\text{ cm}$ . Muokattu lähteestä [133].

Brusan NLG664 -laturin datalehdeltä käy ilmi, kuinka sen maksimiulostulovirta on kolmevaiheisella kytkennällä  $60\text{ A}$ , mikä tarkoittaa sitä, ettei  $22\text{ kW}$  latausteho ole saatavissa

kuin vähintään 367 V<sub>DC</sub> ulostulojännitteen tapauksessa. Koska välimallin Preparerin vaatima latausteho on kuitenkin vain 13,15 kW, soveltuu NLG664 -laturi kaikille sallituille ulostulojännitteille eli 310-450 V<sub>DC</sub> käyttöalueelle. Datalehdellä on myös kuvaaja laturin hyötysuhteesta sen lataustehon ja -jännitteen funktiona, mikä on esitettyä kuvassa 5.9. Tästä havaitaan, kuinka suurin, lähes 95 %, hyötysuhde saavutetaan latausteholla 10-14 kW, mikä on lähes sama tehoalue, kun välimallin Preparerin petien välisen lataamisen edellyttämä 8,8-13,2 kW, joten kyseisellä laturilla päästäisiin parempaan hyötysuhteeseen kuin yhdelläkään muulla tässä luvussa esitellyllä onboard -laturilla. Latausjännitteen osalta voidaan myös tehdä se havainto, kuinka matalampi akkupaketin jännitetaso tuottaa paremman hyötysuhteen. Näin ollen NLG664 laturilla päästäisiin välimallin Preparerin ”pikalatauksessa” noin 95 % hyötysuhteeseen käyttämällä 300-350 V<sub>DC</sub> akkujännitettä. Valitettavasti NLG513 -mallin laturille ei ollut saatavilla vastaavaa hyötysuhdetta, mutta sille esitetystä 93 % maksimihyötysuhteesta ja käytettävästä 3,3 kW lataustehosta voisi arvioida hyötysuhteen olevan noin 91-92 %, mikäli akkupaketin jännitetaso olisi noin 260-300 V<sub>DC</sub>.

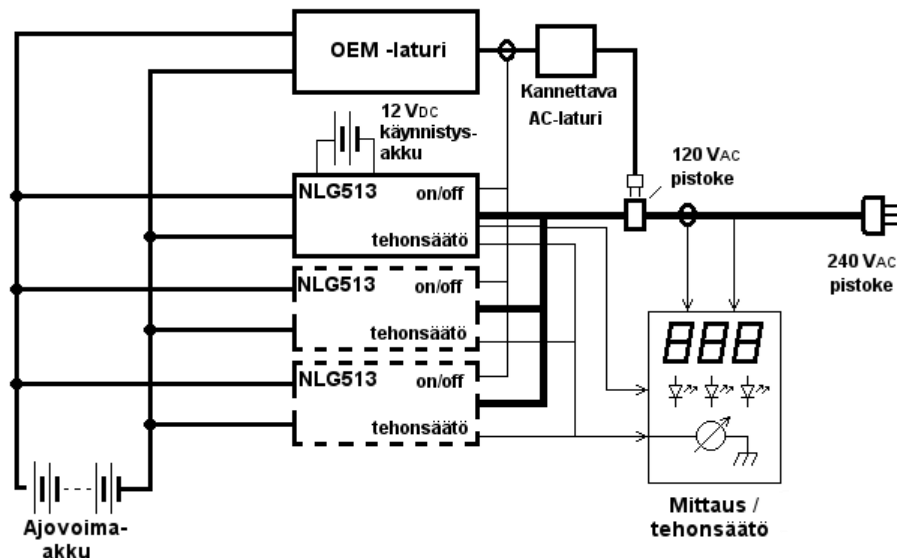


**Kuva 5.9** Brusar NLG664 -laturin hyötysuhde käytettävän lataustehon ja -jännitteen funktiona, muokattu lähteestä [133].

Ilmajäähdytteisen 3,3 kW NLG513 -mallin listahinta on yhdysvaltalaisen sähköajoneuvojen tarvikkeita myyvän Metric Mind Corporationin -yhtiön mukaan 3 018 dollaria ja saman teholuokan NLG514 -mallille ilmoitettu hintataso on hieman korkeampi, 3 945 dollaria. Vastaavasti nestejäähdytteisen NLG664 -mallin hintana on 5 949 dollaria, kun taas kallein Brusar valmistama laturimalli on nestejäähdytteinen NLG667 13 155 dollarin hinnallaan. Tästä voidaan laskea, että välimallin Preparerille laturin hinnaksi tulisi Brusar NLG664 -mallia käyttämällä 5 949 dollaria, kun taas NLG513 -mallien rinnankytkennän kautta saatava latausteho edellyttäisi linjastokonseptista riippuen kolmea tai neljää latausyksikköä, jolloin kokonaiskustannukset olisivat 214 dollarin hintaisen johtosarjan kanssa 9 696-12 928 dollaria tai ilman johtosarjaa 9 054-12 072 dollaria. [135]

Brusar laturille löytyi myös erittäin mielenkiintoinen projektihanke, missä alun perin Nichiconin valmistaman Nissan Leafin 3,3 kW OEM-laturin rinnalle on Metric Mind Corporationin toimesta lisätty yhdestä kolmeen kappaletta Brusar NLG513 latureita.

Näin Leafin latausteho on saatu onnistuneesti kasvatettua 6,6-9,9 kW:iin eli suoraan lisätyn latauskapasiteetin mukaisesti. Kytkenän periaatekuva on esitettyä kuvassa 5.10 [136, 137]



**Kuva 5.10** Brusan NLG513 latureilla tehostettu Nissan Leafin latauskonsepti, missä boosterit hoitavat myös 12 V käynnistysakun lataamisen. Muokattu lähteestä [138].

Kuvasta 5.10 voidaan tehdä nyt muutamia merkityksellisiä havaintoja. Ensinnäkin järjestelmässä Nichiconin OEM -laturi on sijoitettuna master -asemaan, jolloin boostereina toimivat NLG513 -mallin laturit tarkkailevat Nichiconin laturin kuluttamaa AC-puolen virtaa ja säätävät tämän avulla myös omaa lataustehoaan, jolloin kaikki laturit toimivat riittävän tarkkuuden puitteissa samalla tehoalueella. Tällöin OEM -laturi ei edes tiedä, että akkua ladataan suuremmalla virralla, kuin mitä se itse syöttää, eikä asialla ole edes merkitystä. Tärkeintä on, että laitteen BMS -järjestelmä tunnistaa latausvirran ja ohjaa laturia sen puitteissa. Koska BMS -järjestelmä on integroituna Leafin akustoon, se tarkkailee ainoastaa DC-puolen virtaa sekä lataustehoa, ja ohjaa näin ollen pelkkää OEM -laturia, jolloin NLG513 boosterit eivät suoraan edes vaikuta BMS -järjestelmän toimintaan. Järjestelmä ei siten käytä edes CAN -väylää slave -tilassa toimivien boostereiden ohjaukseen, vaan niiden ohjaus tulee suoraan OEM -laturin virrankulutuksesta, joten tämä kokonaisuus eroaa merkittävästi muista tässä luvussa esitellyistä latauskonfiguraatioista. Järjestelmän suunnittelijan mukaan latausjärjestelmä toimii kuitenkin suunnitellusti [136, 137]. Sen sijaan BMS:n ja OEM -laturin välinen ohjaus tapahtuu edelleen CAN -väylää pitkin. [137]

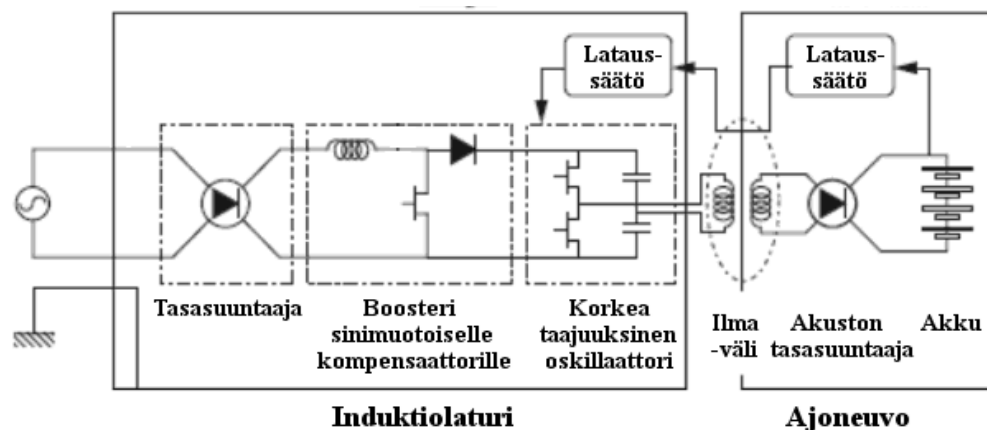
Toinen mielenkiintoinen ominaisuus järjestelmässä on sen automaattisesti tunnistama syöttöjännitteen suuruus. Mikäli akkua ladataan yleisimmin Pohjois-Amerikan kotitalouksista löytyvän 120 V<sub>AC</sub> syötön kautta, käytetään siihen Nissan Leafin mukana toimitettavaa matkalaturia, jolloin NLG513 -boosterit eivät kytkeydy edes päälle. Järjestelmään on kuitenkin lisätty pistoke 240 V<sub>AC</sub> syöttöpistokkeen ja OEM -laturin välille, jolloin 120 V<sub>AC</sub> syöttöjännitteellä OEM -laturin verkosta ottama latausvirta rajoittuu 12

ampeeriin. Tällöin yksittäisen boosterin ottama virta rajoittuu automaattisesti 9 ampeeriin, mikä tarkoittaa kuitenkin kolmen NLG513 boosterin tapauksessa maksimissaan 39 A syöttövirtaa, sillä oletuksella, että 120 VAC syöttöverkon sulakekokona on vähintään 40 A. [137]

## 5.7 Induktiolataus

Induktiolatauksessa sähköenergiaa siirretään laturin ja akun välillä langattomasti, mikä poistaa fyysisten latauspistokkeiden sekä pistokkeen liittämistarpeen. Tämä mahdollistaa sen, että ladattava laite voidaan siirtää suoraan induktiolevyn läheisyyteen ilman mekaanisia työvaiheita. Esimerkiksi sähköajoneuvojen lataamiseen on suunniteltu jo pitkään langattoman lataamisen hyödyntämistä, mistä voidaan muutamana esimerkkinä mainita asiaa käsittelevä, vuonna 2015 julkaistu IEC -standardi [139] sekä vuonna 1995 autonvalmistaja Peugeotin esittelemä, induktiolatausta hyödyntävä, sähköajoneuvon prototyyppi [140]. Tämä Peugeotin TULIP -mallinen, urbaaniin ympäristöön kehitelty ja NiCd -akkuja käyttävä automalli suunniteltiin käyttämään erillisiä, induktiolatauksella varustettuja parkkiruutuja, mutta malli ei päätenyt ikinä kaupalliseen tuotantoon.

Induktiolatauksessa sähköenergiaa siirretään ilman fyysistä kontaktia ajoneuvon ja laturin välillä. Pääperiaatteena on molempiin laitteisiin asennettu käämitys, missä latausyksikön primäärikäämitykseen johdetaan vaihtovirtaa ja käämitykseen syntyvä magneettivuo siirtää laitteiden välisen ilmapälin kautta sähköenergiaa ladattavan laitteen sekundäärikäämille, mitä on havainnollistettu kuvassa 5.11. [141]



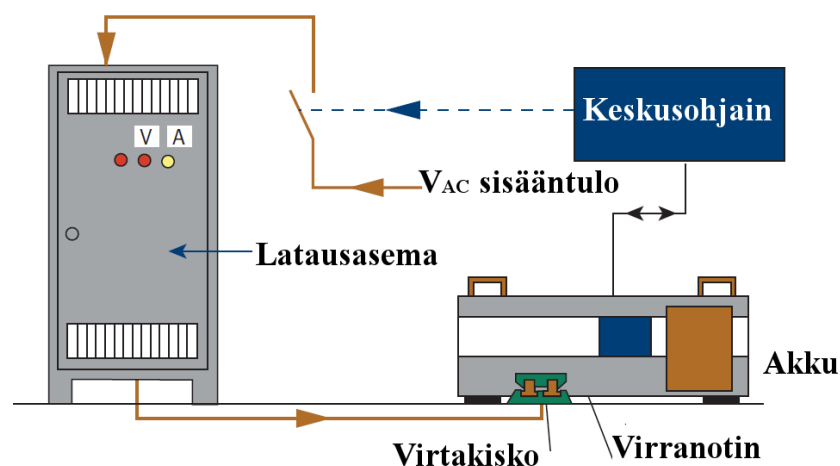
**Kuva 5.11** Ajoneuvojen induktiolatausta esittävä kaavio [141, s. 7].

Koska induktiolataus on sähkömagneettiseen induktioon perustuva ilmiö, missä keskeisiä tekijöitä ovat jännitteen taajuus sekä ilmapälin läpimitta. Tällä läpimitalla on suuri vaikutus induktiivisen virran kautta siirrettävän sähköenergian hyötysuhteeseen, mutta asiasta ei löytynyt juuri lainkaan tieteellisiin julkaisuihin pohjautuvaa tutkimusnäyttöä. Yksi löydetty julkaisu oli kuitenkin Ph.D Morris P. Keslerin WiTricityn artikkeliin kirjoittama julkaisu [142], missä hän kertoi, että sähköajoneuvojen langattomassa lataamisessa on

saavutettu jopa yli 90 % hyötysuhteita  $V_{AC}$  sisääntulon ja  $V_{DC}$  ulostulon välillä, mikä tarkoittaa vähintään 97-98 % hyötysuhteita jokaisen latauslaitteen komponentin osalta.

Elematic Oyj:n sovelluskohteessa induktiolatausta harkittiin muiden latausratkaisujen ohessa helppokäyttöisenä ja ennen kaikkea aikaa säästävänä toimenpiteenä. Ajatus oli, että ladattavat laitteet varustettaisiin induktiolevyllä ja linjaston päädyssä olevan huoltopukin alle asennettaisiin varsinainen induktiolaturi. Näin lataaminen vaatisi ainoastaan koneen nostamisen huoltopukille, eikä latauspistokkeen kytkentää tarvitsisi suorittaa. Induktiolataus olisi näin ollen merkittävä askel kohti asetettua päämäärää automaation lisäämisen suhteen, sillä tämän mekaanisen työvaiheen poistuessa olisi jälleen yksi ongelma ratkaistuna siitä, kuinka linjasto voitaisiin toteuttaa täysin automaation keinoin.

Asiassa edettiin lähettämällä Vahlen latausasemia toimittavalle suomalaiselle maahan tuojalle Esbecon Oy:lle tarjouspyyntö induktiolaturin toteuttamisesta ja lopulta heidän edustajansa Tuomas Ekström valmisteli [143] tarjouksen kahdesta erityyppisestä latauspisteestä. Näistä ensimmäinen oli automaattisesti ohjattavien vihivaunujen eli AGV-laitteiden lataamiseen yleisesti käytettävä, kuvassa 5.12 esitetty latauspiste, mikä koostui taulukon 5.13 mukaisista komponenteista. Tässä vaihtoehdossa ei käytetä induktiota vaan virta siirretään ladattavaan laitteeseen kiskoja pitkin, mistä se siirretään fyysisen kontaktin kautta laitteelle. Näiden latauspisteiden syöttövirta on Ekströmin mukaan 200 A kaksisivaihevirta, joten se poikkeaa yleensä käytetystä kolmevaihevirrasta. Suurimpana rajoitteena oli kuitenkin 24-84  $V_{DC}$  latausjännite, joten se ei soveltunut suunniteltavalle akustolle matalan jännitetason johdosta. Jännitetason nostaminen taas johtaisi todennäköisesti ongelmatilanteeseen, sillä laturi sisältää avoimet virtakiskot, joten korkeampi jännitetaso voisi johtaa helposti työturvallisuuden vaarantumiseen ja toisena huolenaiheena olisivat virtakiskoihin päätyvät vierasesineet, mikä voisi johtaa oikosulun kautta toiminnan keskeytymiseen tai vaikkapa tulipaloon.

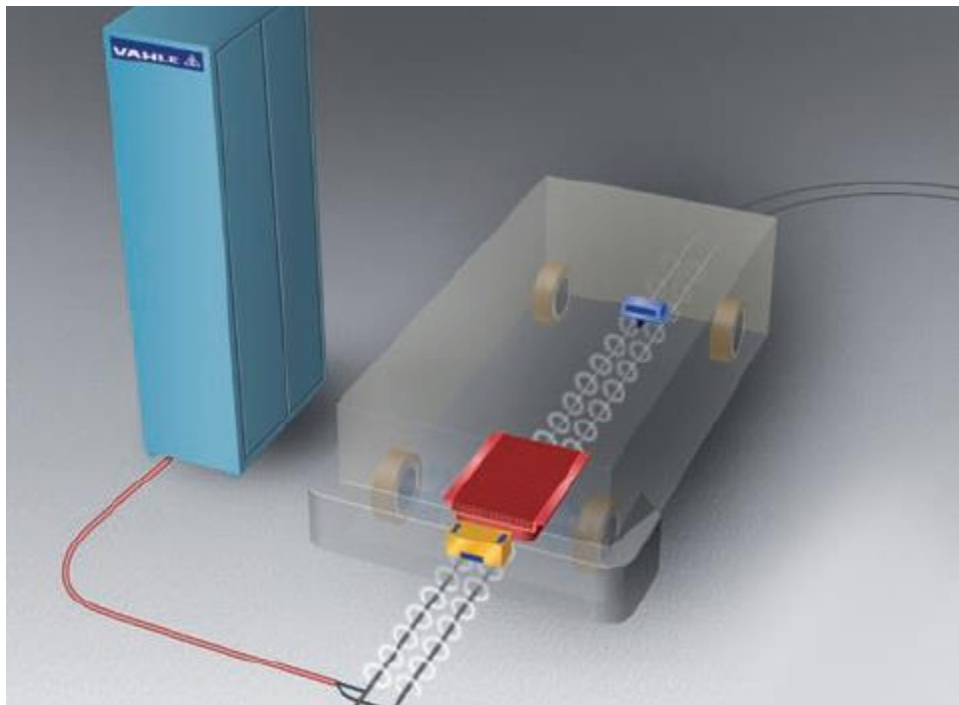


*Kuva 5.12 Vahlen AGV-latauspisteen komponentit, muokattu lähteestä [144].*

**Taulukko 5.13.** Vahlen AGV-latauspisteen komponentit ja niiden hinnat [145].

<b>Komponentti</b>	<b>Hinta (euroa, alv. 0 %)</b>
<i>Virranotin BLS 200-2-01</i>	775
<i>Virtakisko BLK 200-2-01</i>	515

Toinen Ekströmin esittämistä vaihtoehtoista oli CPS:ksi nimetty induktiolaturi, missä syöttövirta tulee lattian sisään asennettuja johtimia pitkin muodostaen samalla induktioon vaadittavan sähkömagneettisen kentän. Tällaisen CPS:n havainnekuva on esitettyä kuvassa 5.13 ja vaadittavat komponentit taulukossa 5.14.



**Kuva 5.13** Vahlen CPS-latauspisteen komponentit, muokattu lähteestä [144].

**Taulukko 5.14.** Vahlen CPS-latauspisteen komponentit ja hinnat [143].

<b>Komponentti</b>	<b>Hinta (euroa, alv. 0 %)</b>
<i>Sähkökeskus 11 kW</i>	13 000
<i>Sähkökeskus 4 kW</i>	10 000
<i>Pick-up yksikkö, CPS-PS-19 2 kW</i>	3 500

Tarkempi selvitys näistä Vahlen kahdesta latausasemasta paljasti kuitenkin, että CPS -järjestelmä vaatii aina erillisen keskuksen, joka on varta vasten koottu induktiolataamista varten. Ekströmin laatimaan tarjoukseen oli sisällytetty budjettihinnat joko 4 tai 11 kW tehoiselle keskukselle, joista molemmat sisältävät kaikki induktiolaturin syöttämiseen vaadittavat komponentit: ensiöinvertterin, kompensointiyksikön, ulostulosuodattimen,

suojaerotusmuuntajan ja sen kondensaattorimoduulin, tehosuodattimen sekä virtamuuntimen ja -mittarin. Näin ollen keskukseen sisällytettyjen komponenttien laaja-alaisuus selittää niiden korkeahkoa kustannustasoa, mutta toisaalta AGV-latausaseman tarjouksesta puuttuva sähkökeskus vaikeuttaa näiden kahden latausratkaisun keskinäistä kustannusvertailua. Asia varmistettiin vielä Ekströmiltä [143] ja selvisi, ettei Esbecon Oy:llä ole tosiaankaan saatavilla keskuksia edullisempaan AGV -tyypin latauspisteeseen vaan keskuksen hankinta jää heidän asiakkaansa vastuulle. Vertailemalla kuitenkin laitekohtaisia latausenergian vastaanotinyksiköitä taulukoissa 5.13 ja 5.14 mainittujen tietojen pohjalta nähdään, että yksi CPS -järjestelmän 3 500 euron hintaista induktiolevyä AGV -järjestelmän n. 1 300 euron hintaiseen virranottimen ja kontaktiosan sisältävään pakettiin, havaitaan että laitetta kohden tulee induktiolataukseen perustuva CPS -järjestelmä lähes kolme kertaa kalliimmaksi. Muiden valmistajien induktiolatureita, jotka olisivat sopineet tämän diplomityön sovelluskohteeseen, ei selvityksistä huolimatta löytynyt, joten induktiolatauksen osalta ei tässä kohtaa tehdä tarkempaa kustannusanalyysiä eri valmistajien välillä.

## 6 AKKUTEKNIIKAN KÄYTTÖÖNOTOSSA HUOMIOITAVIA ASIOITA

Tässä luvussa käydään läpi Elematic Oyj:n kannalta hankkeeseen liittyviä tekijöitä, joiden huomioiminen on projektin onnistumisen kannalta erityisen tärkeää. Tavoitteena on saada kattava kuva niistä säädöksistä ja määräyksistä, jotka on huomioitava akkutekniikkaan siirtymisen yhteydessä, jotta voidaan luoda turvallinen ja säädösten mukainen suunnitelma käytännön toteutuksesta. Voimassa olevan lainsäädännön lisäksi tässä luvussa tarkastellaan myös akkuteknologian käyttöönoton vaikutuksia itse tuotantoprosessiin.

### 6.1 Säädökset ja määräykset

#### 6.1.1 Akkutekniikan käyttöön liittyvät säädökset ja määräykset

Tarkastelussa on akkuteknologian käyttöönottoon liittyvä lainsäädäntö sekä erilaiset direktiivit, jotka on otettava huomioon akkuteknologiaan liittyvien laitehankintojen yhteydessä. Tutustutaan ensimmäisenä akkujen myyntiliiketoimintaan ja myöhemmin itse laitteiden asennus-, huolto- ja korjausliiketoimintaan liittyviin säädöksiin.

Jätelain (646/2011) nojalla annettu valtioneuvoston asetus paristoista ja akuista (422/2008) [146] koskettaa kaikkia akkuja, pois lukien valtakunnan keskeisten turvallisuussetujen valvontaan liittyvien tai avaruuteen lähetettävien akkujen tapauksia, joten asetus tulee huomioida tämänkin sovelluksen teollisuusakkujen tapauksessa. Asetus määrittelee akkujen tuottajaksi myös akkuja maahantuovan tahon, joka ammattimaisesti saattaa akkuja markkinoille Suomessa. Tässä kohtaa markkinoille saattaminen tarkoittaa myös akkujen saattamista kolmannen osapuolen käyttöön Euroopan unionin alueella ja edellyttää tuottajavastuiden noudattamista mahdollisten laiminlyöntimaksujen uhalla. Tuottajavastuun hoitaminen edellyttää Suomessa joko tuottajayhteisöön liittymistä tai vaihtoehtoisesti ELY-keskukselle tehtävää tuottajarekisterihakemusta ja vastuunalaisten tuotteiden kierrätyksestä sekä seurantatietojen luovutuksesta huolehtimista asetuksen asettamien määräysten mukaisesti. Tuottajayhteisöön liittymällä siirtyy kierrätyksestä huolehtiminen yhteisölle, mutta ongelmana on, että teollisuusakkujen tapauksessa vain lyijyakuille löytyy oma tuottajayhteisö, joten yrityksen tulee hoitaa tuottajavastuunsa itse haakeutumalla Pirkanmaan ELY-keskuksen tuottajarekisteriin [147].

Vaikka jätelain määräykset koskevatkin vain Suomen sisäisiä markkinoita, löytyy myös koko Euroopan unionin talousaluetta koskettava direktiivi akkujen tuottajavastuusta (2006/66/EC) [148], joka käsittelee lähes täsmälleen samoja asioita kuin edellä esitetty



valtioneuvoston asetus. Myös tämä EU:n sisäinen direktiivi määrää akkujen tuottajat huolehtimaan akkujen kierrätyksestä, mikä tarkoittaa käytännössä käytettyjen akkujen keräämisestä, käsittelystä ja kierrätyksestä aiheutuvien kustannusten korvaamista.

Kuitenkin jätelain 53.2 §:ssä [149] sekä EU-direktiivin 16. artiklan 5. kohdassa määritellään, että muuhun kuin yksityiskäyttöön tulevien teollisuus- ja ajoneuvoakkujen tapauksessa voi tuottaja yhdessä akun haltijan kanssa sopia kierrätyskustannusten jakamisesta toisin kuin edellä on määrätty. Näin ollen Elematic Oyj voi sopia asiakkaidensa kanssa kierrätyskustannusten siirtämisestä loppukäyttäjän vastuulle, joten kansainvälistä jätteen-seuranta ei ole tarpeen suorittaa. Toimivien akkujen tilapäiselle varastoinnille ei ole yleistä sääntelyä, kunhan se tehdään paloturvallisuudesta huolehtien. Sen sijaan akkuja kuljettaessa olisi syytä tarkistaa vaarallisten aineiden kuljetusta sääntelevät kansainväliset määräykset ja erityisesti litiumakkujen kuljettamisessa tulee olla huolellinen, jotta oikosulun mahdollisuus saadaan rajattua pois.

Huomioitaessa järjestelmän asennuksen ja käytön aikaiset tehtävät, on otettava huomioon sähkötoista annetut määräykset. Ensinnäkin työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) päätös sähköalan töistä (516/2016) [150] kuvaa Suomessa asetettuja vaatimuksia sähkötöiden osalta, joita ovat *sähköpätevyys 1 – 3*. Tämän lisäksi standardin *SFS 6002* mukainen sähkötyöturvallisuuskoulutus vaaditaan käytännössä aina jännitteisten sähkölaitteistoiden asennus-, huolto- ja korjaustöistä.

Sen sijaan hämmennystä on herättänyt vasta 2010-luvulla lisätty *rajoitettu sähköpätevyys 3*, joka otettiin käyttöön erityisesti sähköajoneuvojen huoltotoimintaan liitettynä vaatimuksena. Tämä muutamien tahojen edellyttämä vaatimus on kuitenkin nähty epäoikeudenmukaisena ottaen huomioon ajoneuvojen korjaustoiminnan yleisen vaarallisuuden, joten sähköturvallisuuslakia ollaan muuttamassa siten, että nykyisin voimassa oleva vaatimus poistettaisiin. Edellytyksenä kuitenkin pidettäisiin sitä, että korjausliiketoimintaa suorittavat henkilöt olisivat riittävän perehdytettyjä kyseisen automallin huolto- ja korjaustoiminnan vaatimuksiin. Samassa yhteydessä esitys ottaa kantaa kansallisen sähköturvallisuuslain kokonaisvaltaiseen uudistukseen, jotta sen kaikki epäkohdat saadaan poistettua ja tehtyä nykyisin hyvin epäselvästä säännösjoukosta yhtenäisempi. Uudesta laista tehtiin 16.10.2015 lausuntokierrokselle lähtenyt hallituksen esitys [151] ja lain oli tarkoitus astua voimaan 20.4.2016, mutta eduskunnan käsittelyyn se ei ollut vielä tätä kirjoittaessa päätyntä, joten asian käsittely viivästynee.

Näihin säädöksiin viitaten ja asiasta SESKO ry:n edustajan Juha Vesan kanssa käydyn kirjeenvaihdon tuloksena voidaan päätellä, että tällä hetkellä akkuihin liittyvät turvallisuusmääritykset koskevat standarditasolla vain itse akkuasennuksia ja akustoihin liittyviä muita vaatimuksia. Standardit eivät ota siis suoraan kantaa edellytettyihin pätevyysvaatimuksiin esimerkiksi asennus-, huolto- ja kunnossapitotöiden osalta vaan näitä ohjaa kansallinen lainsäädäntö.

Tässä yhteydessä on kuitenkin huomioitava sähköajoneuvojen yleistymisen myötä lisääntyvät akkujärjestelmät, minkä johdosta myös lainsäädäntö saattaa muuttua lähivuosina. Elematic Oyj:n tapauksessa akustot sijoitetaan kuitenkin suhteellisen kiinteisiin käyttösovellutuksiin, eivätkä onnettomuustyyppiset tilanteet ole niin laaja-alaisia kuin vaikkapa tieliikenteessä olevien sähköajoneuvojen osalta, joten tulossa oleva uusi lainsäädäntö ei todennäköisesti tule ottamaan tähän sovelluskohteeseen vaadittuihin pätevyysluokitukseen mitään kantaa. Suomen sähkötyöturvallisuutta käsittelevä lainsäädäntö edellyttää siten ainoastaan itse akuston jännitetasosta ja laitteiston nimellisjännitteistä riippuvaa sähköturvallisuustutkimtoa, eikä erillistä korkeampaa tutkintotasoa vaadita, vaikka työskentely tapahtuisikin nimenomaan akkujärjestelmien parissa.

### 6.1.2 Akkuasennuksiin liittyvät säädökset ja määräykset

Yleisesti sähköasennuksiin liittyy monia määräyksiä, mutta nimenomaisesti akkuasennuksia käsitteleviä standardeja on varsin vähän. Tutkittavana olevaan Elematic Oyj:n akkuhankkeeseen löytyi liitettäväksi yksi standardi, *SFS-EN 62485-3 "Safety requirements for secondary batteries and battery installations – Part 3: Traction batteries"* [152], joka pohjautuu numeron 62485 IEC-standardiin. Tämä standardi käsittelee teollisuuden sähköajoneuvoja ja muita niihin rinnastettavia laitteita, kuten automaattisesti ohjattavia ajoneuvoja sekä trukkeja. Aihetta sivuaa myös puhtaasti sähkötrukkeja käsittelevä standardi SFS-EN 1175-1, mutta se rajoittuu maksimissaan 240 V<sub>DC</sub> akustoihin, siinä missä nyt tutkittava standardi rajoittaa jännitetasot vasta 1500 V<sub>DC</sub> ja 1000 V<sub>AC</sub> tasolle.

Ongelmaksi muodostui litiumioniakustojen puute kaikkien tutkittavien standardien sisällystä, joten kyseisen akkutyypin osalta ei tällä hetkellä ole kansainvälistä standardia, mikä käsittelee teollisuusluokan litiumakustoja. TTY:llä järjestettiin huhtikuussa 2016 sähköajoneuvoja käsittelevä seminaaripäivä, jossa Juha Vesa luennoi alan standardeista. Hänen esityksestään kävi ilmi, että varsinkin sähköajoneuvoja käsitteleviä uusia standardeja ollaan valmistelemaan muun muassa langattoman latauksen ja akkujen vaihdon osalta, mutta nämä standardit julkaistaan vasta vuosien 2016-2017 välisenä aikana. Tästä huomataan, että akkuteollisuudelta puuttuu yhä kansainvälisellä ja kansallisella tasolla useita standardeja, joten on mahdollista, että myös suuren kokoluokan litiumioniakut saadaan tulevien standardien piiriin.

Palataan nyt tässä luvussa ensimmäisenä esitetyn standardin sisältöön ja sen tuomiin vaatimuksiin akkuasennusten osalta, ottaen samalla huomioon kohteen akustoon suunnitellut jännitetasot. Standardin alussa määritellään suojauskeinot sähköiskujen varalle ja painotetaan, että yli 120 V<sub>DC</sub> tason akustot on suojattava sekä suoran että epäsuoran kontaktin varalta. Tämän lisäksi akkujen varastointitilojen on oltava lukittuja sekä merkittyinä myöhemmin esiteltävillä varoitusmerkeillä. Suoran kontaktin suojauskeinoiksi kelpaavat esimerkiksi jännitteisten osien eristäminen ulkokuoresta ja jännitteisten osien rajaaminen suojakilpien tai koteloiden avulla kosketusetäisyyden ulkopuolelle. Huomionarvoista on,

että mikäli kotelointia käytetään suojausmenetelmänä, tulisi sen luokituksen täyttää standardin *EN 60529* mukaan joko IP2X tai IPXXB -luokitus [153]. Epäsuoran kontaktin varalta suojauskeinoiksi on taas asetettu vaatimuksiksi jännitteisten osien eristäminen, suojamaadoitus sekä jännitteisten osien automaattinen erotus muusta järjestelmästä. Lisää suojauskeinoja on täsmennetty standardissa *IEC 60364-4-41*.

Oikosulkujen estämiseksi on kaapeleiden ja johtimien täytettävä standardin *IEC 60204-1* eristysvaatimukset, mikä tarkoittaa käytännössä vähintään 1 M $\Omega$  eristysresistanssia sekä nimellijännitteeseen verrattuna kaksinkertaisella jännitteellä suoritettavaa ja vähintään yhden sekunnin ajan kestävästä eristystestausta [154]. Lisäksi huoltotöiden aikaisiksi työkaluiksi suositellaan standardin *IEC 60900* täyttäviä välineitä eli 1 500 V<sub>DC</sub> ja 1 000 V<sub>AC</sub> luokituksen täyttäviä käsityökaluja. Akustojen erityisresistanssin alarajaksi on määriteltynä vähintään 1 M $\Omega$  uusien ja täyteen ladattujen akkujen osalta sekä käytössä olleiden, 120 V<sub>DC</sub> tason ylittävien, akkujen osalta vähintään 500  $\Omega$  kerrottuna akun nimellijännitteellä. Eristysresistanssi mitataan standardin mukaisesti akun navan ja laitteen johtavan ulkokuoren väliltä. Tämän lisäksi on suositeltavaa jakaa 120 V<sub>DC</sub> ylittävät akustot niin, että ne pystytään huoltamaan maksimissaan 120V<sub>DC</sub> akustoina. Mikäli tätä ei pystytä toteuttamaan tulisi akuston huoltotöissä käyttää eristävää suojavaatetusta estämään sähköisku jännitteisten osien ja maadoitetun lattian tai muun kohteen välillä.

Vaadittavat kielto- ja varoitusmerkit ovat kielto-merkki ”avotulenteko ja tupakointi kielletty”, varoitusmerkki ”akku tai akusto” sekä ”vaarallinen jännite”, mikäli akuston jännite ylittää 60 V<sub>DC</sub> tason. Tämän lisäksi itse akustoon on merkittävä valmistajan nimi ja tyyppimerkintä, akun nimellijännite ja -kapasiteetti, asentajan nimi, käyttöönottopäivä sekä akuston käyttöön ja hävittämiseen liittyvät ohjeistukset. [152]

## 6.2 Akkuteknologian käyttöönoton vaikutus tuotantoprosessiin

Seuraavaksi tarkastellaan tilannetta, missä Elematic Oyj:n valmistamalle ja asiakasyrityksen hallinnoimalle tuotantolinjastolle toimitetaan yksi tai useampia akkukäyttöisiä tuotantokoneita. Tarkoituksena on luoda tiivis katsaus siihen, mitä asioita sekä linjaston toimittajan että tilaajana olevan loppuasiakkaan tulee huomioida akkuteknologian käyttöönoton yhteydessä. Tämän lyhyen selvityksen päätarkoitus on varmistaa luotettava, turvallinen ja mahdollisimman yksinkertainen ohjeistus, joka palvelee sekä Elematic Oyj:tä että sen asiakasyrityksiä mahdollisimman loogisesti ja kustannustehokkaasti. Käsiteltävät aihealueet liittyvät niin turvallisuus-, logistisiin-, elinkaari- kuin myös käytettävyysspekteihin.

Ensimmäisenä käsiteltävänä aiheena on akkujen teknisen eliniän suhde tuotantolaitteiden elinkaareen, missä tulee huomioida akkujen ikääntymisen myötä kappaleessa 7.1 suunniteltavien akkupakettien vaihtotarpeet ja painottaa koneiden elinkaarimallin vaikutusta valittavaan akkuteknologiaan nähden. Ensisijaisen tärkeää olisi, että akustojen elinkaareen vaikuttava sekä syklinen että aikaperusteinen käyttöikä olisi mallinnettavissa, jotta niiden

vaihtotarpeiden ennustaminen ja siten totuudenmukainen markkinointi asiakkaille olisi toteutettavissa. Koska akkujen aikaperusteinen käyttöikä vaihtelee akkutyypistä riippuen noin 5 ja 10 vuoden välillä, tulee akkupaketteja vaihtaa joka tapauksessa vähintään muutamia kertoja laitteiden odotetun 30 vuoden käyttöiän aikana. Akkujen syklinen käyttöikä tulee kuitenkin todennäköisemmin vastaan jo aiemmin, sillä esimerkiksi LFP -akuille määriteltyjen lataus-purkaussykliden enimmäismäärä on taulukon 2.3 mukaisesti vain 1 000-2 000 sykliä, mikäli akusto mitoitetaan 80-100 % DoD-tason mukaisesti. Täten mitoitettaessa akusto vastaamaan Preparerin tapauksessa vain petikohtaista energiankulutusta, tulee lataus-purkaussyklejä linjastokonseptista riippuen 4-8 kappaletta jokaista työpäivää kohden, mikä tarkoittaisi noin 260 vuosittaisen arkipäivän toimintatahdilla pahimmassa tapauksessa vain puolen vuoden käyttöikää. Näin ollen on järkevämpää mitoittaa akusto käyttäen vähintään 50-70 % DoD-tasoa.

Tästä johtuen myös akkupaketti tulisi suunnitella sellaiseksi, että vastaava akusto on toteutettavissa myös esimerkiksi 25 vuoden päästä siitäkin huolimatta, että nyt valittu akkutoimittaja lopettaisi toimintansa tai valittujen akkutuotteiden valmistamisen. Täydellisesti tähän varautuminen ei tietenkään ole mahdollista, mutta asia on syytä pitää mielessä sekä akkujen toimittajaa että käytettävää teknologiaa valittaessa. Tämän lisäksi sekä uusien akkupakettien toimittamisesta asiakkaalle että käytöstä poistettujen akustojen kiertäys- ja logistiikka-asioista tulisi keskustella ja sopia myös asiakkaan kanssa, kuten luvun 6.1.1 yhteydessä mainittiin. Tärkeintä on siten sisäistää se ajatus, että nyt valittavaan akkuteknologiaan voidaan joutua sitoutumaan suhteellisen pitkäksi aikaa, sillä todennäköisesti ainakin kolmannelta osapuolelta tilattavan BMS -järjestelmän tapauksessa ei järjestelmä välttämättä pysty toimimaan mahdollisesti tulevaisuudessa kehitettävien akkuteknologioiden kanssa. Tähän ei voida kuitenkaan takertua liikaa, sillä tärkeintä olisi nyt kuitenkin löytää mahdollisimman toimiva ratkaisu, joka olisi jo tällä hetkellä toteutettavissa kohtuullisin kustannuksin, joten jos tulevaisuuden akkuteknologiat näyttävät suuntautuvan kokonaan uudentyypisiin akkuihin, voidaan järjestelmä toki päivittää BMS -järjestelmää myöten myös myöhemmässä vaiheessa. Oleellista onkin, että myös asiakasyritys ymmärtää tämän, mutta on valmis sitoutumaan nyt toimitettavaan ”ensimmäisen sukupolven” akkujärjestelmään.

Toisena näkökulmana akkutekniikan käyttöönotossa ovat erilaiset kuljetukseen, varastointiin ja muihin logistisiin seikkoihin pohjautuvat aspektit, mistä ensimmäisenä mainittakoon litiumakkujen kuljetusta koskevat rajoitukset ja turvallisuusvaatimukset. Vaikka akkutekniikan käyttöä koskevissa standardeissa ei ollutkaan erityistä mainintaa kuljetuksesta, tuli Valmet Automotive Oy:n henkilöstön kanssa 8.11.2016 käydyssä asiantuntijakeskustelussa [155] esiin muutamia oleellisia seikkoja, jotka koskettavat litiumioni -akustojen kuljetusvaatimuksia. Tärkein esille tullut asia oli jokaiselta litiumioni -akkuja käyttävältä järjestelmältä tai sen osajärjestelmiltä vaadittavat *UN/DOT 38.3* -standardin [156] mukaiset kuljetustestaukset. Kyseisessä testauksessa haetaan hyväksyntää kahdeksan kohtaiselle tarkistuslistalle, joka sisältää seuraavat asiat:

- Altituditestaus (lentoliikennettä varten)
- Lämpörasitustestaus
- Tärinätestaus
- Tärähdystestaus
- Ulkoisen oikosulun testaus
- Iskutestaus
- Ylilataustestaus
- Pakotettu varauksen purkutestaus.

Ongelmana on kuitenkin se, että vaikka akkukennojen tai -moduulien valmistaja olisikin suorittanut testaukset onnistuneesti, edellytetään testauksien uudelleen suorittamista siinä tapauksessa, että testattuun akkupakettiin tehdään rakenteellisia muutoksia, jotka muuttavat jo testatun paketin ominaisuuksia. Esimerkkinä tästä on tilanne, missä suljetuille akkukennoille on haettu jo standardin mukaiset sertifikaatit, mutta nyt Elematic Oyj:n tarpeisiin luodaan kyseisistä kennoista sopivan jännitetason ja kapasiteetin muodostama paketti. Uhkakuvana Valmet Automotiven henkilöstö esitti tilannetta, missä akkupaketin ominaisuuksista, kuten suuresta koosta johtuen, ei Suomesta löydy sopivaa testauslaitosta, vaan paketti jouduttaisiin rahtaamaan esimerkiksi Keski-Eurooppaan jollekin suurelle testiradalle testattavaksi. Tällöin pelkkien testausten kustannukset nousevat pahimmillaan satoihin tuhansiin euroihin, mikä on selvästi liikaa ottaen huomioon Elematic Oyj:n toimittamien tuotantolaitteiden suhteellisen matalan vuositason tuotantomäärän.

Turvallisuus- ja käytettävyydaspekteihin pohjautuvat näkemykset myös lopullisen asiakkaalle toimitettavan ratkaisun osalta. Esimerkiksi jonkin akkuvalmistajan kautta mahdollisesti koekäyttöön saatavat akkupaketit ja BMS -järjestelmät voidaan kyllä toimittaa myös asiakkaalle testikäyttöön, kunhan asiakasta ohjeistetaan siihen, että kyseessä on prototyypimallin akusto ja että prototyypin akusto poistetaan asiakkaan toimitiloista välittömästi testausjakson päätteeksi ja korvataan samalla varsinaisella tuotantomallilla. Akkujen turvallisen kuljettamisen, ja siihen haettavien sertifiointien ohella, myös työntekijöiden perehdyttäminen akkuteknologiaan ja sen turvalliseen käyttöön on erityisen tärkeää.

Koska Preparerin, ja mahdollisesti myöhemmin toteutettavien muidenkin tuotantolaitteiden tapauksessa, tulee akkupaketin jännitetaso olemaan mitä luultavammin vähintään 120 V<sub>DC</sub>, joten muutamia asioita on syytä ottaa huomioon. Ensinnäkin akkukaappi on mahdollista rakentaa lukittavaksi, jolloin vain erityisesti litiumioni -akustojen huoltoon koulutettu henkilö voi suorittaa vaadittavia huoltotoimenpiteitä, kuten akkupaketin vaihtoperaatioita. Tämä vaihtoehto kannattaakin ehdottomasti hyödyntää, sillä on vaarana, että kouluttamaton henkilö avaa akkupaketin suojakannen vikatilanteen sattuessa tavanomaisia käsityökaluja apuna käyttäen, ellei rakenteesta tehdä avaimella lukittavaa. Tästä huolimatta akkukaappiin tulee merkitä soveltuvilla varoitusmerkeillä mm. varoitus korkeasta

jännitteestä, akustosta sekä tyyppikilpi, mistä käy ilmi mm. akuston tyyppi, valmistaja, valmistuspäivä, kapasiteetti ja jännitetaso.

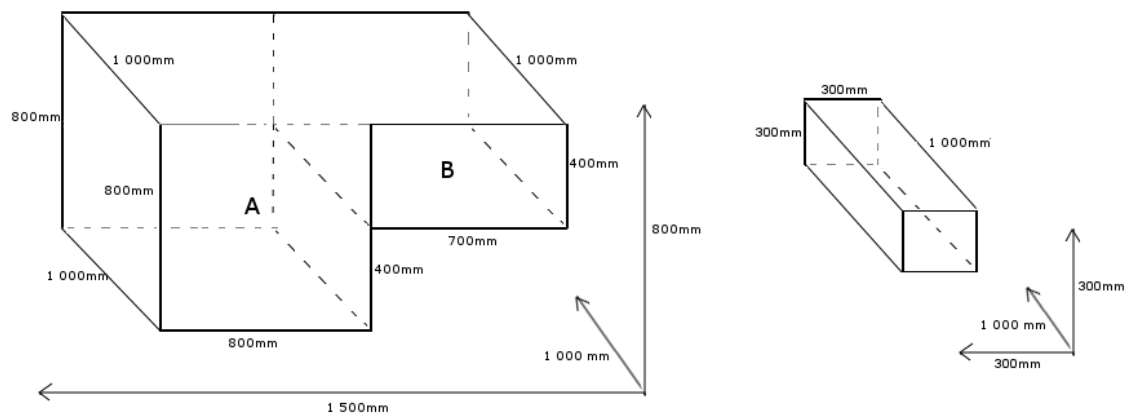
Mikäli edellä mainituista turvallisuustoimenpiteistä huolehditaan, ei juuri muiden kuin erikseen huoltotoimenpiteisiin osoitetun henkilön kouluttamisesta tarvitse huolehtia. Tästä huolimatta koko tuotantolaitoksen henkilökunnalle on syytä laatia paikallisen kielin lisäksi vähintään englanninkielinen turvallisuus- ja käyttöohjeistus, jotta työntekijät ovat tietoisia, kuinka esimerkiksi tulipalon tai laitteen vikaantumisen yhteydessä tulisi toimia. Lisäksi akustot ja niiden ympäristö tulee tarkistaa säännöllisesti, jotta akkujen turvallisuudesta ja niiden oikeasta toiminnasta yhdessä pitkäikäisen elinkaaren kanssa voidaan varmistua.

## 7 TOTEUTUSSUUNNITELMA AKKUTEKNIikkaAN SIIRTYMISESTÄ

Tässä luvussa tarkastellaan suunniteltavaa akku- ja latausjärjestelmää erityisesti välimallin Preparerin osalta, mutta myös täyssähkömallin Preparerin ja poikkisiirtopalkkien osalta tehdään alustava suunnitelma akkutekniikkaan siirtymiseksi. Tarkasteltavia aihealueita ovat kappaleessa 7.1 tarkasteltava akuston ja BMS -järjestelmän valinta ja mitoittaminen, kappaleessa 7.2 tehtävä alustava suunnitelma muiden oheislaitteiden ja -komponenttien valinnasta sekä viimeisessä kappaleessa esiteltävä katsaus latauksen toteutusvaihtoehtoista.

### 7.1 Akuston sekä BMS -järjestelmän valinta ja mitoittaminen

Tässä kappaleessa pyritään löytämään sekä Preparerin että poikkisiirtopalkkien tarpeisiin soveltuva akusto sekä sitä ohjaava BMS -järjestelmä. Mitoitusperusteena akuston kapasiteetille käytetään 30, 50 ja 75 % DoD-tasoja kappaleissa 5.1.1 ja 5.1.2 laskettujen energiatarpeiden pohjalta. Koska sekä Preparerissa että poikkisiirtopalkkeissa on olemassa ennalta määritellyn kokoinen tilavaraus, johon sekä akuston että sen oheislaitteiden tulisi mahtua, tulee tämä rajoitus huomioida jokaisen komponentin valinnan yhteydessä. Asian selkeyttämiseksi on kuvaan 7.1 hahmoteltuna molempien laitteiden yhteydessä oleva tilavaraus.



**Kuva 7.1** Vasemmalla Preparerin ja oikealla poikkisiirtopalkin yhteyteen suunnitellun akkutekniikan tilavaraukset. Kuvasta nähdään Preparerista löytyvä varsinainen tilavarauus (A) ja sen taka-akselin yläpuolella sijaitseva laajennustila (B).

Seuraavaksi jatketaan luvussa 5 aloitettua akuston kapasiteetin määrittelyä käyttämällä kolmea eri DoD-tasoa, missä huomioitavaa on pienemmän DoD-tason tarjoama korke-

ampi syklinen käyttöikä. Haittapuolena DoD-tason laskemiselle on kuitenkin akkupaketin kustannusten kasvaminen lähes lineaarisesti kapasiteettia lisätessä. Soveltuvien akkupakettien lisäksi tässä yhteydessä tarkastellaan myös BMS -järjestelmän valintaa.

### Välimallin Preparerer

Taulukkoon 7.1 on kirjattuna ensimmäiseksi suunniteltavan akkukäyttöisen prototyyppi-laitteen eli imurilla varustetun välimallin Preparererin osalta vaaditut akkukapasiteetit 30, 50, 75 ja 100 % DoD-tasojä vastaavasti. Tässä yhteydessä 100 % DoD-tasoa ei lasketa mukaan eri akkupakettien mitoituksia verrattaessa, vaan se on otettu mukaan taulukon 7.1 vertailuun ainoastaan välimallin Preparererin kuluttaman petikohtaisen energiamäärän kuvaamiseksi.

*Taulukko 7.1. Imurilla varustetun välimallin Preparererin akkukapasiteetin määrittäminen.*

DoD-taso (%)	Akuston kapasiteetti käytettävän konseptin suhteen (kWh)		
	6 x 150m	4 x 150 m	4 x 200 m
30	87,7	58,4	77,9
50	52,6	35,1	46,8
75	35,1	23,4	31,2
100	26,3	17,5	23,3

GS Yuasan kanssa käyty kirjeenvaihto päättyi marraskuun 2016 lopussa siihen tulokseen, että he pystyivät toimittamaan tämän diplomityön sovelluskohteeseen soveltuvan akku- ja BMS- järjestelmän laskelmat [157]. Koska raportissa [79] esitetyt kustannukset GS Yuasan yhdistetyille akku- ja BMS -ratkaisuille voidaan pitää erittäin kohtuullisina, ei tämän diplomityön yhteydessä tehdä Preparererin osalta tarkempaa selvitystä erikseen ostettavien kennojen ja BMS -järjestelmän komponenttien kasaamisesta, koska tämä vaatisi esimerkiksi kappaleessa 6.2 mainitut kuljetusvaatimusten mukaisuustestauksen.

Sähköpostitse saatu GS Yuasan tarjous [157] sisältää ratkaisut sekä välimallin että täyssähkömallin Preparerille, joten ne esitellään yhdessä, vaikka muutoin täyssähkömallin Preparerille ei tehdäkään tässä kappaleessa tarkempaa selvitystä. GS Yuasan lähettämän tarjouksen hintatiedot eivät ole julkisia, joten ne ovat mainittuna ainoastaan raportissa [79]. GS Yuasan esittämät akkuratkaisut koostuvat sekä kuvassa 3.21 esitetyistä LIM50EN-8G että LIM50EN-12G moduuleista. Taulukkoon 7.2 sekä liitteeseen 5 on kirjattuna näiden toteutusvaihtoehtojen akustojen kennomäärät, toimintajännitteet sekä GS Yuasan toimesta mallinnetut syklisten käyttöikäjen ennusteet.



**Taulukko 7.2.** Imurilla varustetun välimallin Preparerin akusto [157].

Linjastotyyppi	Kennomäärä (kpl)	Toimintajännite (V <sub>DC</sub> )	Syklinen elinikä (kpl)
6 x 150 m	56	168-230	10 000
4 x 150 m	44	132-180	8 000
4 x 200 m	56	168-230	8 000

Kaikki esitetyt toteutusratkaisut koostuvat moduulien sarjaankytkennöistä ja koska yksittäiset moduulit koostuvat ainoastaan niiden mallista riippuen joko 8 tai 12 kennon sarjaankytkennästä, ei GS Yuasan esittämässä ratkaisussa ole käytetty lainkaan rinnankytkettyjä akkuja. Taulukossa 7.2 sekä liitteessä 5 esitetyt toimintajännitteet kuvaavat ainoastaan akustosta saatavaa minimi ja maksimijännitettä, mutta todellisessa käyttötilanteessa ei näin laajaa vaihtelua akuston jännitetasossa esiinny. Koska GS Yuasa käyttää moduuleissaan LNMC -tyypin akkukennoja, joiden nimellinen kennojännite on 3,7 V, saadaan akustojen nimellisjännitteiden vaihteluväliksi 118,4-207,2 V<sub>DC</sub>.

Esitettyjen akusto- ja BMS -järjestelmien massat vaihtelevat 110 ja 150 kg välillä ja ulkomitat ovat puolestaan joko 600 x 800 x 750 mm tai 600 x 800 x 1 000 mm [157], joten kaikki GS Yuasan tarjoamat akustot mahtuvat hyvin Preparerin akkukaappiin ilman tarvetta hyödyntää kuvassa 7.1 näkyvää Preparerin takaosan laajennustilaa. Näin ollen laajennustila jää tarvittavien onboard -latureiden sekä DC/DC -muuntimen käyttöön.

### Poikkisiirtopalkit

Poikkisiirtopalkin osalta ei tehdä kuitenkaan taulukon 7.1 mukaista vertailua, koska sen työsykleistä tarkasteltiin kappaleessa 5.1.2 ainoastaan kahta eri työsykliä. Mainittakoon kuitenkin, että luvussa 5 laskettu energiamäärä raskainta työsykliä kohden oli 208 Wh, mistä saadaan 75, 50 ja 30 % DoD-tasoja vastaaviksi energiamääriksi 278, 416 ja 693 Wh. Poikkisiirtopalkkien osalta vaadittu akkukapasiteetti jää alle yhteen kilowattituntiin, vaikka mitoitusperusteena käytettäisiinkin 30 % DoD-tasoa, joten järkevintä on myös mitoitaa akut tähän tasoon, mikäli kuvassa 7.1 esitetty tilavaraus mahdollistaa n. 0,7 kWh akuston oheislaitteineen.

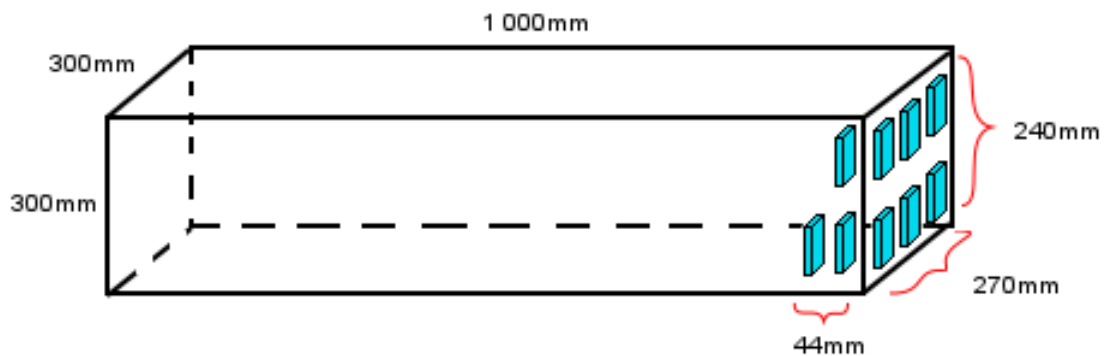
Marraskuun lopussa Esbecon Oy:n Tuomas Ekström ilmoitti, etteivät kappaleessa 5.7 esitetyt, induktiolatausta käyttävät pick-up -yksiköt sovellukaan latauspistekäyttöön, vaan niiden käyttökohteet rajoittuvat pitkiä induktioratoja käyttävien AGV -laitteiden käyttöön. Toinen huomattava asia on näiden Vahlen valmistamien induktioyksiköiden rajoitus akkujen latausjännitteelle, missä mahdolliset jännitetasot ovat joko 24-27 tai 48-56 V<sub>DC</sub>. Näin ollen akuston lataaminen tulee hoitaa Vahlen ratkaisussa joko poikkisiirtopalkkien kiskojen mittaisella induktioradalla tai vastaavalla virranotinkiskolla. Samalla akuston jännitetaso tulee saada määriteltyä 48-56 V<sub>DC</sub> välille.

Otettaessa vertailuun esimerkiksi AEV:n verkkokaupassa tarjolla olevat LFP akkukemian litiumionikennot [58], voidaan 30 % DoD-tasoa vastaavan kapasiteetin mitoittamisen seurauksena saatava akuston jännite laskea poikkisiirtopalkkien osalta. Mitoituksessa käytetään 15 Ah LFP -kennoja, koska niiden energiasisältöön suhteutetut kustannukset ovat alhaisemmat kuin 8 tai 10 Ah kennojen tapauksessa. Koska Vahlen induktioyksiköiden soveltuvuus riippuu osittain suunnitellun akuston jännitetasosta, lasketaan nyt akuston maksimijännite, mikä saadaan laskemalla kapasiteetin täyttymispiste, kun kaikki kennot ovat kytkettynä sarjaan:

$$693 \text{ Wh} / 15 \text{ Ah} = 46,2 \text{ V ja}$$

$$46,2 \text{ V} / 3,2 \text{ V/kpl} = 14,4 \text{ kpl.}$$

Yhtenä vaihtoehtona on siis käyttää poikkisiirtopalkin akustossa 33,49 €/kpl maksavia AEV:n LFP -kennoja, joita vaaditaan ylläolevan laskelman mukaisesti vähintään 15 kappaletta, jolloin akuston hinnaksi tulee noin 502 euroa ja jännitetasoksi juurikin Vahlen vaatimusten mukainen 48 V<sub>DC</sub>. Koska kyseisten kennojen ulkomitat ovat 120 x 90 x 22 cm, saadaan akusto asetettua tilaan, jonka koko nähdään kuvasta 7.2.



**Kuva 7.2** Poikkisiirtopalkin tilavaraukseen kaavailtu akkukennojen sovitus, missä vierekkäisten kennojen vaatimat vähimmäismitoitukset ovat esitettyinä punaisella värillä.

Tarkastellaan seuraavaksi akkujen purkuvirtaa kahdessa kuormitustilanteessa eli nostojen ja laskujen sekä ajoliikkeen aikana. Tämä saadaan laskettua käyttämällä tunnettuja kuormitustehoja sekä akustolle mitoitettua 48 V<sub>DC</sub> jännitetasoa:

$$I_1 = 2\,600 \text{ W} / 48 \text{ V} = 54,2 \text{ A}$$

$$I_2 = 950 \text{ W} / 48 \text{ V} = 19,8 \text{ A}$$

Tässä  $I_1$  edustaa hydraulisen nostimen käytössä syntyvää akuston kuormitusvirtaa ja  $I_2$  puolestaan ajoliikkeen aikana käytettävää kuormitusvirtaa. Kun näitä virranarvoja verrataan akkukennojen tuote-esitteessä [58] ilmoitettuihin maksimivirtoihin, jotka ovat jatkuvassa kuormituksessa 30 A ja hetkellisesti 45 A, havaitaan, että hydraulista nostinta ohjaavan 3 kW oikosulkumoottorin kuormitusvirta ylittää molemmat raja-arvot. Yksinkertaisin ratkaisu tähän on kytkeä kaksi 15 kennon sarjaankytkentää rinnan, jolloin akuston

jännite säilyy 48 voltissa, mutta kennojen läpi kulkevat kuormitusvirrat puolittuvat. Tällöin tarkasteltavien kahden työvaiheen kuormitusvirrat ovat yhtä sarjaankytkentää kohtaan 27,1 ja 9,9 A, mikä on jo pienempi kuin akuille sallittu jatkuvan purkuvirran maksimiarvo. Yhden kennorivin lisääminen kuvassa 6.2 tarkasteltuun mallinnukseen kasvattaa kennorakenteen vaatiman tilavarauksen kaksinkertaiseksi, mutta poikkisiirtopalkkeihin jää silti noin 930 x 300 x 300 mm kokoinen tilavaraus esimerkiksi seuraavaksi tarkasteltavan BMS -järjestelmän sekä mahdollisen induktiolaturin ja DC/DC-konvertterin sovitamista varten.

Poikkisiirtopalkin BMS -järjestelmävaihtoehtojen potentiaalisimmaksi ratkaisuksi jäi Ratio Electricin suomalaisen maahantuojan AEV:n tarjoama kokonaisuus, mikä esiteltiin jo kappaleessa 3.4. Tarvittavat komponentit ja niistä muodostuva BMS -järjestelmän kokonaiskustannus on esitetty taulukossa 7.6.

*Taulukko 7.6. Poikkisiirtopalkille suunnitellun BMS -järjestelmän kustannukset.*

Tuote	Hinta (€/kpl)	Määrä (kpl)	Yhteishinta (€)
Ohjauskeskus	409,20	1	409,20
Kennomoduuli	14,51	30	435,30
Virta-anturi (100 A)	50,84	1	50,84
Esilatauspiiri (12-160 V <sub>DC</sub> )	87,12	1	87,12
		<b>Yhteensä:</b>	<b>982,46</b>

Taulukosta 7.6 osalta havaitaan, että BMS -järjestelmän kustannukset ovat noin 980 euroa jokaista poikkisiirtopalkkia kohden. Kun tähän lisätään vielä edellä esitellyn mukaisesti 30 akkukennosta muodostuva 1 004 euron lisäkustannus, ovat poikkisiirtopalkille suunnitellun akku- ja BMS -järjestelmän kustannukset yhteensä noin 1 987 euroa. Verrattaessa tätä kustannusta kappaleessa 5.1.2 laskettuihin superkondensaattoreiden kustannuksiin tulisivat pelkät superkondensaattorit lähes 3,5-kertaa kalliimmiksi. Kokonaisuudessaan tässä kappaleessa esitellyn järjestelmän kustannuksia voidaan siis pitää kohtuullisina, vaikka koko järjestelmän kustannustaso selviää siinä vaiheessa, kun Vahle onnistuu toimittamaan Elematic Oyj:lle oman ratkaisunsa latausjärjestelmän osalta. Tällä 15 % DoD-tason mitoituksella LFP -kennojen syklinen elinikä tulee luultavasti olemaan vähintään 15 000 sykliä, minkä pitäisi riittää erinomaisesti poikkisiirtopalkkien tarpeeseen.

## 7.2 Järjestelmän muut oheislaitteet ja -komponentit

Tässä kappaleessa tarkastellaan akku- ja BMS -järjestelmän lisäksi vaadittuja oheiskomponentteja sekä muutamia vaihtoehtoisia toteutustapoja. Selkeyden vuoksi akkukäyttöiselle Preparerille laadittu HW-arkkitehtuuri on esitetty liitteessä 6. Myös poikkisiirtopalkkeille laadittiin vastaava HW-arkkitehtuuri, joka on nähtävissä liitteessä 7.

## Preparerer

Preparererin osalta päädyttiin kappaleessa 7.1 samaan tilanteeseen kuin poikkisiirtopalkkienkin osalta. Vaaditut energiamäärät tulevat täytetyksi Preparererin tapauksessa jo 118-207 V<sub>DC</sub> jännitetasoilla, joten käytännössä vaatimuksena on DC -boosterin käyttäminen, ellei nykyisiä oikosulkumoottoreita vaihdeta matalamman jännitetason tasavirtamoottoreihin. Siemensin 30 kW DC/DC -muuntimelle asetetusta 50 A virtarajoituksesta seuraa se, ettei yksi DC/DC -muunnin yksikkö tule riittämään vielä imurilla varustetun välimallin Preparererin käyttöön. Koska imurilla varustetun Preparererin välimallin nettoteho on 20,7 kW ja imurittoman Preparererin välimallin nettoteho puolestaan 18,0 kW, saadaan taulukossa 7.2 ja liitteessä 5 ilmoitettujen kennomäärien perusteella laskettua Preparererin eri mallivariaatioiden 4 x 150 m linjastolle mitoitetujen akustojen nimellisjännitteiksi 162,8 ja 133,2 V<sub>DC</sub>. Tästä voidaan laskea akustolta otettavien kuormitusvirtojen suuruus molemmissa tarkastelutilanteissa:

$$I_1 = 20\,700\text{ W} / 162,8\text{ V} = 127,15\text{ A ja}$$

$$I_2 = 18\,000\text{ W} / 133,2\text{ V} = 135,14\text{ A,}$$

missä  $I_1$  kuvaa imurilla varustetun välimallin Preparererin akuston kuormitusvirtaa ja  $I_2$  taas ilman imuria olevan välimallin Preparererin akuston kuormitusvirtaa.

Edellä lasketuista kuormitusvirroista johtuen eivät edes kaksi rinnankytkettyä Siemensin 30 kW DC/DC -muunninta kykene toimimaan 4 x 150 m linjastoille mitoitetujen akustojen yhteydessä, joten jäljelle jää kolme vaihtoehtoa. Ensinnäkin 30 kW boosterit voidaan korvata joko Siemensin 120 kW mallilla, jonka virtarajana on 200 A tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää ABB:n boosteria, jonka virtarajana on 233 A. ABB:n vaihtoehdossa rajoitteeksi muodostuu kuitenkin boosterin vaatima nestejäähdytys. Kolmas vaihtoehto on käyttää myös 4 x 150 m linjastolla 48 ja 56 kennoa sisältäviä akkumoduuleita, jolloin vastaaviksi kuormitusvirroiksi saadaan laskettua 99,90 ja 101,35 A, mutta tässä kohtaa liikutaan jo kahden Siemensin 30 kW DC/DC -muuntimen ääri rajoilla. Näin ollen olisi järkevintä selvittää vielä GS Yuasalta, että olisiko akustoilla mahdollisuus toimia jatkuvasti niiden nimellisjännitteen yläpuolella kuten taulukon 7.2 ja liitteen 5 ilmoitetut jännitetasot antavat ymmärtää. Tällöin kokoonpano olisi mahdollista toteuttaa kahdella 30 kW boosterilla. Mikäli käyttöympäristön lämpötila kohoaa yli 40 Celsius-asteeseen, tulee kuvassa 3.10 esitetty nimellisvirran alentaminen lämpötilan funktiona ottaa huomioon. Näin ollen olisikin suotavaa mitata käytössä olevasta Preparererista koneen sisällä valittavia lämpötiloja normaaleissa käyttöolosuhteissa. Järkevintä mittaukset olisi tehdä vielä ennen akkukäyttöisen Preparererin fyysisen toteutusvaiheen suorittamista, jotta mahdollisesti tarvittava siirtyminen edellä mainittuihin vaihtoehtoihin DC/DC -muunninmalteihin voitaisiin varmistaa.

Koska Siemensin DC/DC -muuntimet voidaan asettaa vain kuvan 3.7 mukaiseen pystyasentoon, ei Preparerin takaosaan jäävä laajennustila riitä. Tästä syystä DC/DC -muuntimien asennuspaikkana tulee olemaan kuvan 4.4 luonnoksessa näkyvistä, harmaalla värillä merkityistä kojeistokaapeista joko oikean tai vasemmanpuoleinen.

### Poikkisiirtopalkit

Poikkisiirtopalkille mitoitettiin edellisessä kappaleessa  $48 V_{DC}$  jännitetaso, mikä ei kelpaa sellaisenaan palkeissa tällä hetkellä käytettävien  $230/400 V_{AC}$  jännitetason kolmivaiheisten oikosulkumoottoreiden syöttämiseen. Tähän ratkaisuna on joko DC/DC -muuntimen hankinta tai vaihtoehtoisesti matalan jännitetaso DC-moottoreiden hyödyntäminen. Vaikka akuston jännite jääkin poikkisiirtopalkkien tapauksessa 48 volttiin, pystytään oikosulkumoottoreita ajamaan esimerkiksi Siemensin 30 kW DC -boosteria hyödyntämällä sillä, sen maksimiulostulojännitteen ollessa kahdeksankertainen akuston jännitteeseen nähden.

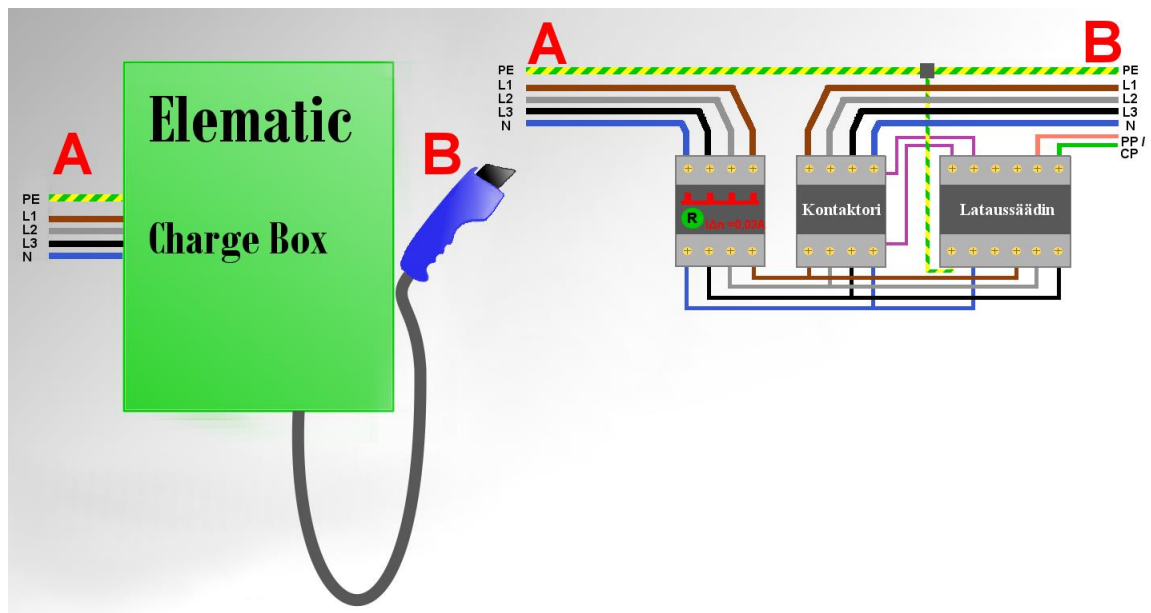
Näin ollen Siemensin DC -boosterilla saatava jännitetaso on maksimissaan  $384 V_{DC}$ , mikä ylittää oikosulkumoottoreiden ohjaukseen käytettävien taajuusmuuttajien välipiiriltä vaaditun  $312 V_{DC}$  jännitetaso. Kyseinen välipiirin jännitetaso riittää kolmiokytkentäisen  $230/400 V_{AC}$  oikosulkumoottorin ajamiseen, jolloin moottorit toimivat  $230 V_{AC}$  jännitetasolla. Siemensin DC -boosterimallit ylittävät kuitenkin kuvassa 6.1 esitetyn tilavarauksen, joten Siemensin vaihtoehtojen hyödyntäminen ei onnistu poikkisiirtopalkeissa, ellei palkkien kokoa pystytä muuttamaan. Näin ollen ABB:n HES -tuoteperheen Siemensin boostereita pienemmät mallit voisivat sopia poikkisiirtopalkeissa käytettäväksi, mutta niiden vaatima nestejäähdytys tulisi suunnitella erikseen. Toinen vaihtoehto olisi syöttää oikosulkumoottoreiden ohjaukseen käytettävien taajuusmuuttajien tasasuuntauspiiriä  $230 V_{AC}$  jännitetaso invertterillä suoraan akustolta, mutta tämän vaihtoehdon tarkastelu jätettiin Elematic Oyj:lle.

Edullisin ratkaisu on kuitenkin nykyisten oikosulkumoottorikäyttöjen korvaaminen  $48 V_{DC}$  tasavirtamoottoreilla, joita tarkasteltiin jo kappaleen 3.1 yhteydessä. Tasavirtamoottorit vaativat kuitenkin DC/DC -muuntimen tavoin toimivan ohjainpiirin, joten niiden hyödyntämiseksi tulisi markkinoilta löytää vähintään 60 A virrankeston omaava 48 voltin ohjainyksikkö. Tätä tarkastelua jatketaan kuitenkin Elematic Oyj:n toimesta alkuvuonna 2017.

### 7.3 Esitys latausjärjestelmän toteutuksesta

Kuvassa 7.3 on esitettyä tuotantolinjastojen yhteyteen suunniteltu latausasema, jonka ulospäin näkyviä komponentteja ovat ainoastaan riittävän IP-luokituksen omaava kotelointi sekä pistokemallinen latausliitin. Vaikka esitetty kytkentä onkin tehty kolmivaiheisena, voidaan järjestelmä muuttaa helposti myös yksivaiheiseksi. Latausaseman sisälle

mahdollisesti asennettavista komponenteista pakollisia ovat ainoastaan henkösuojaukseen käytetty vikavirtasuojakytkin, jonka tulee reagoida vähintään 30 mA vuotovirtaan, kontaktori sekä lataussäädin, joiden vähimmäiskustannukset ovat taulukon 5.9 mukaisesti alle 350 euroa. Vaikka vaadittujen komponenttien hankintakustannukset saattavatkin nousta AEV:n kautta tilattuna, tulee latausaseman hankintakustannuksiksi luultavasti siltikin alle 500 euroa, mikäli mahdollisesti Elematic Oyj:n toimesta toteutettavalle koteloinnille ei määritetä valmistus- ja suunnittelukustannuksia.



**Kuva 7.3** Suunnitellun latausaseman luonnos, missä käytetyt komponentit ovat lataussäädin, kontaktori, vikavirtasuojaja sekä latauspistoke. Latausaseman nimeksi on tässä prototyypissä annettu ”Elematic Charge Box”.

Kuten kuvasta 7.3 on havaittavissa, ohjataan sekä kontaktoria että latauspistokkeen virransyöttöä lataussäätimellä, joita on saatavissa Rolecin lisäksi esimerkiksi Siemensiltä, jonka lataussäädin löytyy mallinumerolla CM-100 [92]. Lataussäätimen ominaisuuksista riippuen voidaan sillä hoitaa useita lisätoimintoja, kuten Siemensin yksikön tapauksessa esimerkiksi väärän tai vaurioituneen kaapelin virheilmoituksia, latauspistokkeen lukituksen tunnistamista tai tuulettimen käynnistyskäskyt. Tärkeimmät ominaisuudet ovat kuitenkin latausliittimessä olevat kaksi signaalijohdinta, jotka kuvaan 7.3 on merkittynä termeillä PP (proximity pilot) ja CP (control pilot). Näistä PP-johtimessa kulkee ladattavalle laitteelle tieto laturin kytkemisestä ja CP-johtimen signaali sisältää mm. ladattavan laitteen tunnistamisessa, maadoituksen jatkuvuuden tarkistamisessa, maksimilatausvirran määrittämisessä ja latauksen katkaisuun käytettävän informaation [158].

## Preparer

Latausjärjestelmä voi myös toimia yksivaiheisena, mutta suurten yksivaiheisten kuormien lisäämisestä verkkoon voi koitua yllättäviä seurauksia. Vaihevirtojen epätasapaino

lisää muun muassa teho- ja jännitehäviöiden sekä harmonisten yliaaltojen ja EMI-häiriöiden riskiä [159]. Elematic Oyj:n sovelluskohteissa käytettävät liittymistehot ovat kuitenkin luokkaa 1 000 kW, joten Preparerin tapauksessa käytettävät 10-15 kW lataustehot eivät ole välttämättä esteenä edes yksivaiheisen kytkennän tapauksessa. Kuitenkin ongelmaksi muodostuu esimerkiksi sulakekokojen kasvu sekä pistokkeille ja johtimille asetettävien vaatimusten nouseminen, joten pyrkimyksenä tulee olla päästä näin suurista yksivaiheisista kuormista eroon.

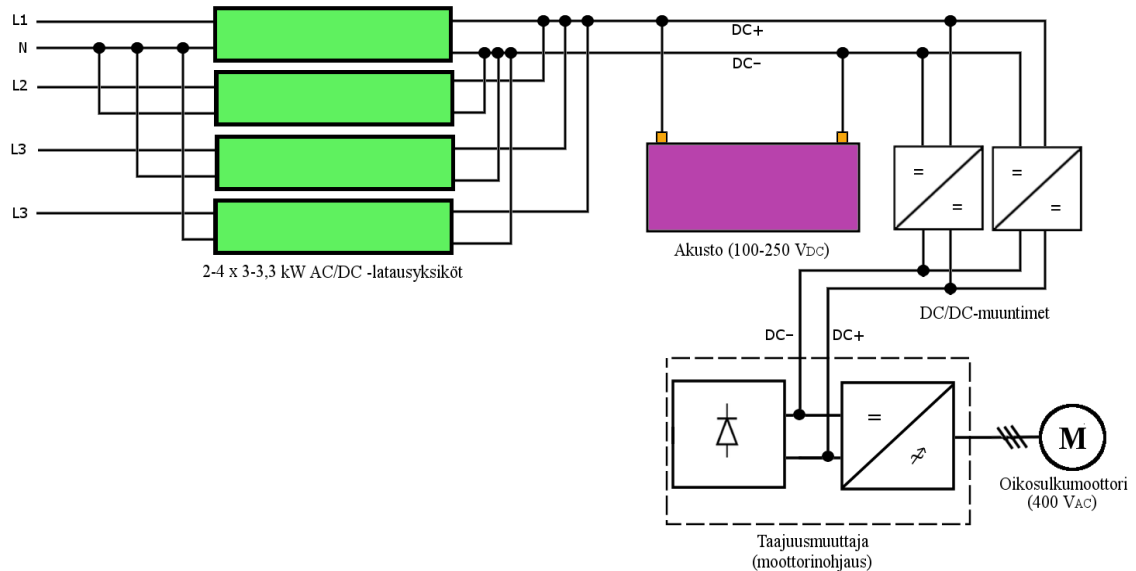
Myös Brusan NLG664 mallia harkittiin sen tukeman kolmivaiheisen virransyötön ja 22 kW lataustehon tuomien hyötyjen valossa, mutta ongelmaksi muodostui sen tukema ulostulojännite, joka on 310-430 V<sub>DC</sub>. Näin ollen tästä nestejäähdytteisestä ja kompaktin kokoisesta NLG664 laturista luovuttiin, sillä sen latausjännite on korkeampi kuin akustoille kappaleessa 7.1 määritellyt alle 250 V<sub>DC</sub> jännitetasot.

CurrentWaysin kanssa käydyssä toisessa keskustelussa [160] saatiin kuitenkin lisää tietoa heidän laturiyksiköidensä vaatimuksista. Heidän mukaansa on täysin mahdollista syöttää heidän latureitaan kolmivaiheisella 400V<sub>AC</sub> jännitteellä ja 50 Hz taajuudella, kunhan jokainen laturi kytketään yhden vaiheen ja nollajohtimen väliin, jolloin syötettävä jännite ei ylitä latureiden raja-arvona olevaa 265 V<sub>AC</sub> tasoa. Näin ollen järjestelmä voitaisiin toteuttaa kuvan 7.4 mukaisesti, missä on kytkettynä neljä CurrentWaysin BC-sarjan 3 kW ilmajäähdytteistä laturia rinnan, millä saavutetaan 12 kW latausteho. Tällaisen järjestelmän kustannukset ovat latausyksiköiden sekä vaadittujen CAN-, AC- ja DC-kaapeleiden kanssa yhteensä 7 680 dollaria ilman toimituskuluja tai ladattavan laitteen puolelle tulevaa latausliitintä, jonka hinta on mahdollista selvittää esimerkiksi AEV:n kautta siinä vaiheessa, kun kaikki tarvittavat oheiskomponentit ja liitintyyppit on päätetty Elematic Oyj:n toimesta. Mikäli 12 kW latausteho osoittautuu vielä GS Yuasan kanssa käytävissä jatko-palavereissa ongelmaksi, voidaan nämä neljä CurrentWaysin laturia korvata myös neljällä Brusan NLG513 -latureilla, joilla saavutetaan vaadittava 13,2 kW latausteho sekä pienempi tilatarve.

Brusan laturissa ongelmaksi asettuu taas sen ulostulojännitteen vaihteluväli, joka on 200-520 V<sub>DC</sub> sekä 12,5 A ulostulovirran maksimitaso, jolloin 3,3 kW latausteho saavutetaan vasta 264 V<sub>DC</sub> jännitetasolla. Sen sijaan CurrentWaysin latureiden ulostulojännite on sekä välimallin että täyssähkömallin Preparerille soveltuvampi: 112-225 V<sub>DC</sub>. Tämän diplomityön viidennessä luvussa tarkastelluista latureista yksikään muu vaihtoehto ei kykene yltämään CurrentWaysin BC -sarjan tasolle niin kustannuksiltaan kuin toiminnallisilta ominaisuuksiltaan. BC -sarjan ominaisuuksia tarkastellessa esille nousee niin hyvä IP -luokitus, soveltuvat jännitetasot kuin toimivat takuu- ja tukipalvelut, joten kyseisiä onboard -latureita voidaan tarkastella sovelluskohteen osalta potentiaalisimpana vaihtoehtona.

Kuvasta 7.4 nähdään yksi esimerkinomainen kytkentätapa onboard -latureille, DC/DC -muuntimille, akustolle sekä taajuusmuuttajalle. Kytkennässä on käytetty neljää onboard

-laturia sekä kahta DC -boosteria, jotka ovat kytkettynä rinnan. Yhden vaiheen vinokuorman pienentämiseksi vain kaksi laturia neljästä on kytkettynä samaan vaiheeseen. DC/DC -muuntimien tehtävänä on puolestaan nostaa 100-250 V<sub>DC</sub> akuston jännitetaso noin 312 V<sub>DC</sub> tasolle, jotta tasajännitteellä voidaan syöttää oikosulkumoottoreita ohjaavia taajuusmuuttajia.



**Kuva 7.4** Preparerin onboard -latureiden kytkentäkaavio, mistä käy ilmi myös akuston, DC/DC -muuntimien ja oikosulkumoottoria ohjaavan taajuusmuuttajan kytkennät. Kuvasta on selkeyden vuoksi jätetty pois mm. kontaktorit, suojamaadoitus ja sulakkeet.

Preparerin latauksen osalta tarkastellaan vielä latausaseman ja latauspistokkeen mitoittamiseen vaikuttavia vaihejohtimien sekä nollajohtimen virtoja. Tämän tarkastelu onkin siitä syystä oleellinen asia, että kuvassa 7.4 esitetyssä onboard -latureiden kytkennässä on yhteen vaiheeseen kytkettynä kaksi laturia, jotta neljän laturin rinnankytkentä saadaan mahdolliseksi. Laskennassa on käytetty Brusin 3,3 kW ulostulotehon omaavien latureiden teknisiä tietoja, koska niille mitoitettu latausasema tulee riittämään myös 3 kW Current-Waysin latureille, joita käyttämällä vaihevirratt jäävät Brusin latureita pienemmiksi. Brusin NLG 513 laturin datalehdeltä [131] nähdään, että latureiden tehokerroin on yli 0,99 ja kappaleessa 5.6 tehdyssä tarkastelussa niiden hyötysuhteeksi arvioitiin 91 prosenttia. Näin voidaan laskea kuvan 7.4 mukaisessa kytkennässä olevat virtatasot latausaseman puolella, käyttäen yhtälöitä 18-19.

$$I_{vaihe} = \frac{P_{vaihe}}{U_{vaihe} \cdot PF} \quad \text{ja} \quad (18)$$

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C, \quad (19)$$

missä  $P_{vaihe}$  kuvaa kyseiseen vaihejohtimeen kytkettyjen latureiden ottotehoa,  $U_{vaihe}$  on 230 V<sub>AC</sub> ja  $PF$  kuvaa laturin tehokerrointa, mikä on tässä tapauksessa 0,99. Kaavassa 19



esiintyvät termit ovat vektorimuotoisia virtaosoittimia, missä  $I_N$  kuvaa nollajohtimen virtaa ja  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  ja  $I_{L3}$  kuvaavat puolestaan vaihevirtoja. Koska vaihetehoksi saadaan laturin hyötysuhteen kautta 3 630 W vaiheiden L1 ja L2 osalta sekä 7 260 W vaiheen L3 osalta, saadaan yhtälöstä 18 ratkaistua vaihevirroiksi 15,94 ja 31,88 A. Jokainen onboard -laturi muodostaa lähes identtisen kuormituksen ainoastaan sillä poikkeuksella, että vaiheeseen L3 on kytkettynä kaksinkertainen kuorma, joten vaihevirtojen välisen kulmaeron voidaan olettaa olevan tasan 120 astetta. Näin ollen nollajohtimen virraksi voidaan laskea yhtälön 19 perusteella:

$$\bar{I}_N = (15,92\angle 0^\circ + 15,92\angle -120^\circ + 31,88\angle 120^\circ) \text{ A} = 15,92\angle 120^\circ \text{ A}.$$

Koska sekä nollajohtimen virta että vaihevirratt ovat alle 32 A, voidaan latausaseman komponenttivalinnoissa käyttää 32 A latausvirralle mitoitettuja komponentteja. Koska kolmannen vaiheen vaihevirta on kuitenkin kaksinkertainen muiden vaiheiden virtoihin nähden, tulee sen suojaukseen kiinnittää suurempi huomio. Tarvittaessa suojaus voidaan toteuttaa myös vaihekohtaisesti, jolloin kuvan 7.3 rakenteeseen tulee jokaiselle vaiheelle omat suojauskomponentit.

### Poikkisiirtopalkit

Poikkisiirtopalkkien yksityiskohtaisen latauksen suunnittelua ei tämän diplomityön yhteydessä tehdä. Tähän ratkaisuun päädyttiin siitä syystä, että yhteistyössä Esbecon Oy:n ja Vahlen kanssa tehtävä selvitystyö oli kesken vielä joulukuun alussa. Tässä vaiheessa Vahlen tarkasteltavaksi oli lähetetty jo poikkisiirtopalkin syklinen kuormitus, energiankulutuslaskelmat sekä täytetty kaavake suunniteltavan latauksen vaatimuksista. Selvitystyö kestää vielä vuoden 2017 alkupuolelle, jonka jälkeen Elematic Oyj:n suunnittelijat jatkanevat järjestelmän valintaa yhdessä Esbeconin ja Vahlen kanssa.

Oleellista on kuitenkin ymmärtää, että poikkisiirtopalkkien lataaminen on toteutettavissa täysin saman tyyppisesti kuin edellä esitetystä suunnitelmasta tehtiin Preparerin osalta. Itse asiassa poikkisiirtopalkkien lataamisessa voidaan hyödyntää muitakin onboard -laturia kuin Preparerille valittua CurrentWaysin tai Brusan laturia, sillä niiden akuston jännitetaso sekä latauksen tehotarve ovat huomattavasti Preparerin asettamia vaatimuksia maltillisempia. Näin ollen poikkisiirtopalkkien kohdalla voidaan hyödyntää lähes kaikkia luvussa 5 esiteltyjä laturivaihtoehtoja.

## 8 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä tehty tutkimus tarkasteltujen työkoneiden muuttamista akkukäyttöiseksi tehtiin, jotta betonielementtien valmistukseen käytettäviä tuotantolinjastoja ja niiden työkoneita toimittava Elematic Oyj voisi vastata paremmin asiakkaidensa toiveisiin sekä parantaa loppuasiakkaidensa tuotannon joustavuutta. Jotta akkukäyttöihin siirtymisen yhteydessä varmistetaan toteutettavan järjestelmän säännösten mukaisuus, tarkasteltiin tässä diplomityössä akkutekniikan käyttöönottoon vaikuttavia säädöksiä ja määräyksiä, käytiin useita asiantuntijakeskusteluita sekä tutkittiin akkutekniikan käyttöönoton vaikutuksia tuotantoon. Näin varmistuttiin siitä, että akkukäyttöihin siirtyminen toteutetaan säännösten mukaisesti, käyttäjäturvallisesti sekä turvallisesti.

Diplomityössä selvitettiin sovelluskohteiksi valittuihin työkoneisiin sopivaa akkutekniikkaa sekä akkutekniikan oheiskomponentteja ja pyrittiin löytämään näille soveltuvat toimittajat. Ensimmäiset akkukäyttöiset prototyypit päätettiin toteuttaa kahden tarkastellun laitteen osalta, joita olivat harjakoneena toimiva Preparer sekä valumuottipöytien siirtoon käytettävät poikkisiirtopalkit. Näistä Preparer asetti selvästi suuremmat vaatimukset, sillä sen tehotarve liikkuu noin 20 kW tuntumassa siinä, missä poikkisiirtopalkkien vaatima käyttöteho on noin 3 kW. Kyseisten laitteiden sähköistys on hoidettu aikaisemmin kaapelirummun kautta, joten akkukäyttöihin siirtyminen vaati useiden oheislaitteiden tarkastelemista. Keskeisimmässä asemassa olivat DC/DC -muuntimien, BMS:n sekä lataukseen tarvittavien komponenttien mitoitus ja valinta yhdessä komponenttien yhteensopivuuden ja käyttöympäristöön soveltuvuuden varmistamisen kanssa.

Käytettävän akkuteknologian valinta oli haasteellista, sillä markkinoilla on lukuisia eri valmistajia sekä akkuteknologioita. Suuresta valmistajamäärästä haittapuoleksi osoittautui se, ettei valmistajien suorittamien mittausten mittausta- ja ilmoittamista säännellä kovinkaan tiukasti, joten eri teknologioiden vertailu osoittautui haasteelliseksi. Lyijyakkujen käyttämistä sovelluskohteissa ei rajoittanut niinkään niiden paino vaan niiden vaatima tila yhdessä hitaan lataamisen ja mahdollisesti tulevaisuudessa voimaantulevan lyijyn käyttökiellon kanssa. Koska lyijyakkujen kapasiteetista voidaan hyödyntää tehokkaasti maksimissaan 30 prosenttia, osoittautuivat ne tämän diplomityön tarkastelussa lähes yhtä kalliiksi vaihtoehdoksi kuin litiumioniakut, joiden kapasiteetista voidaan käyttää jopa yli 80 prosenttia. NiMH -akkujen heikkoutena on puolestaan niiden syklinen käyttöikä litiumioniakkuihin verrattuna, joten akkujärjestelmät päätettiin toteuttaa litiumionitekniikalla, jonka kustannukset ovat laskeneet viime vuosina merkittävästi. Lopulta käytettäväksi litiumionitekniikaksi valikoitui Preparerin osalta LNMC, kun taas poikkisiirtopalkkeissa päädyttiin alustavasti käyttämään LFP -kennoja.

Myös erilaisia moottorikäyttöjä ja niiden ohjaustapoja tutkittiin tässä diplomityössä. Lähtökohtana oli tutkia nykyisten kolmivaiheisten oikosulkumoottoreiden korvaamista tasavirtamoottoreilla, jolloin järjestelmästä saataisiin yksinkertaisempi sekä mahdollisesti kustannustasoltaan edullisempi. Tarkempi tarkastelu osoitti kuitenkin muutamia oleellisia ja huomioonotettavia seikkoja. Ensinnäkin harjallisten tasavirtamoottoreiden huoltoväli osoittautui kohtuuttoman tiheäksi, joten niiden ei katsottu täyttävän sovelluskohteen kriteereitä. Toisena huomiona esitettiin tasavirtamoottoreiden ohjaukseen käytettävien moottorinohjausmoduulien heikko skaalautuminen käytettäville teho- ja jännitealueille, mikä asettaa rajoitteita tasavirtamoottoreiden hyödyntämiselle. Potentiaalisimpana vaihtoehtona pidettiin nykyisten oikosulkumoottoreiden säilyttäminen ns. välimallin Prepare-rin ensimmäisen akkukäyttöisen prototyypin yhteydessä sekä tasavirtamoottoreita ja niiden ohjaimia koskevan tutkimuksen jatkaminen esimerkiksi yhteistyössä SKS Group Oy:n kanssa. Tässä vaihtoehdossa yksinkertaisimmaksi toteutusratkaisuksi nähtiin noin 100-230 voltin akkujännitteen nostaminen DC/DC -muuntimilla  $312 V_{DC}$  tasolle, jolloin muuntimien ulostulojännite voidaan syöttää suoraan kolmioon kytkettyjen oikosulkumoottoreita ohjaavan taajuusmuuttajan välipiiriin. Sen sijaan poikkisiirtopalkkien osalta todettiin, että matalan jännitetaso tasavirtamoottorikäytöt voisivat sopia niiden yhteyteen jo tässä vaiheessa. Lopullista päätöstä ei kuitenkaan vielä tehty, koska soveltuvan moottorinohjaimen löytäminen vaatii vielä jatkotutkimuksia.

Latauksen osalta tehty tarkastelu osoitti, että markkinoilta löytyy runsaasti eri tyyppisiä latausvaihtoehtoja sekä valmistajia. Teknis-taloudellisesta näkökulmasta parhaaksi vaihtoehtoksi osoittautui ratkaisu, missä laitteen ulkopuolelle tuleva latausasema rakennetaan itsenäisesti Elematic Oyj:n toimesta, mutta laitteen sisälle asennetaan kiinteästi tarvittava määrä noin 3 kW tehoisia onboard -latausyksiköitä. Lisäksi onboard -latureiden tulee olla suojaerotettuja, jotta niiden rinnankytkentä tehonlisäämiseksi on mahdollista. Kyseiset latausyksiköt muuntavat latausaseman syöttävän vaihtojännitteen tasajännitteeksi, joten ne voidaan kytkeä suoraan akustoon. Myös latausjärjestelmän osalta tämän diplomityön tutkimuksessa löydettiin molemmille laitteille soveltuva hw-arkkitehtuuri. Konkreettisimpana onnistumisena voidaan pitää latausasemalle tehtyä sähkösuunnittelua, minkä avulla saadaan merkittäviä kustannussäästöjä, kun latausasemaa ei tarvitse ostaa kolmannelta osapuolelta vaan se voidaan rakentaa Elematic Oyj:llä ja toimittaa loppuasiakkaalle.

Kokonaisuudessaan tämä diplomityö antaa kattavan kuvan akkuteknologian nykytilasta sekä sen kustannustason kehittymisen odotteista yhdessä keskeisimpien oheiskomponenttien kuvauksen kanssa. Koska molemmille tarkasteltaville laitteille löytyi toteuttamiskelpoinen akku- ja latauskonsepti tarvittavine oheislaitteineen, voidaan työn katsoa vastaa- van myös keskeisimpiin tutkimuskysymyksiin onnistuneesti. Akkuteknologian vauhdikas eteneminen tulee odotettavasti jatkuvaan myös tulevaisuudessa, joten alan kehityskään- teitä kannattaa seurata aktiivisesti, vaikka akkukäyttöiset laitekonepit toteutetaankin tällä hetkellä parhaiten soveltuvalla teknologialla. Näin voidaan taata Elematic Oyj:n py- syminen kehityksen kärjessä.

## LÄHTEET

- [1] Battery University, BU-101: When Was the Battery Invented, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.3.2016): [http://batteryuniversity.com/learn/article/when\\_was\\_the\\_battery\\_invented](http://batteryuniversity.com/learn/article/when_was_the_battery_invented)
- [2] Tekniikka & Talous, Kiinteä elektrolyytti tekee akusta kestävän, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.3.2016): <http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/kiinteaelektrolyytti-tekee-akusta-kestavan-satoja-tuhansia-latauskertoja-energiatiheys-30-3329222>
- [3] Trojan Battery Company, Battery sizing guidelines, 2 p. Saatavissa (viitattu 20.3.2016): [http://www.trojanbattery.com/pdf/TRJN0168\\_BattSizeGuideFL.pdf](http://www.trojanbattery.com/pdf/TRJN0168_BattSizeGuideFL.pdf)
- [4] Michael Root, The TAB Battery Book, An In-Depth Guide to Construction, Design and Use, The McGraw-Hill Companies, 2011, 252 p.
- [5] David Linden, Thomas B. Reddy, Handbook of Batteries, 3<sup>rd</sup> edition, The McGraw-Hill Companies, 2011, 1454 p.
- [6] Victron Energy, Gel and AGM Batteries, 4 p. Saatavissa (viitattu 11.11.2016): <https://finnish.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-GEL-and-AGM-Batteries-EN.pdf>
- [7] Victron Energy, 12,8 Volt Lithium-Iron-Phosphate Batteries, 2 p. Saatavissa (viitattu 15.11.2016): <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-12,8-Volt-lithium-iron-phosphate-batteries-EN.pdf>
- [8] Joni Markkula (TUT), Antti Supponen (TUT) ja Kai Vuorilehto (Aalto), Tampereen teknillisellä yliopistolla 13.4.2016 käyty asiantuntijakeskustelu.
- [9] JP. Wiaux, C. Chanson, The Lithium-Ion Battery, Service Life Parameters, Geneva, May 2013. Saatavissa (viitattu 15.11.2016): <https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/8126481/EVE-06-05e.pdf?api=v2>
- [10] Clean Technica, Battery Lifetime: How Long Can Electric Vehicle Batteries Last. Saatavissa (viitattu 15.11.2016): <https://cleantechnica.com/2016/05/31/battery-lifetime-long-can-electric-vehicle-batteries-last/>
- [11] Leclanché, Energy Storage Systems for Marine, 2 p. Saatavissa (viitattu 15.11.2016): [http://www.leclanche.com/fileadmin/user\\_upload/markets\\_solutions/transportation/leclanche-mobile-storage-systems\\_us\\_lowres.pdf](http://www.leclanche.com/fileadmin/user_upload/markets_solutions/transportation/leclanche-mobile-storage-systems_us_lowres.pdf)
- [12] NEI Corporation, Lithium Titanate Based Batteries for High Rate and High Cyclic Life Applications, 8 p. Saatavissa (viitattu 15.11.2016): [http://neicorporation.com/white-papers/NEI\\_White\\_Paper\\_LTO.pdf](http://neicorporation.com/white-papers/NEI_White_Paper_LTO.pdf)

- [13] Cobasys, Inside Nickel Metal Hydride Battery, 14 p. Saatavissa (viitattu 15.11.2016): [http://www.cobasys.com/pdf/tutorial/inside\\_nimh\\_battery\\_technology.pdf](http://www.cobasys.com/pdf/tutorial/inside_nimh_battery_technology.pdf)
- [14] Lightning Global, Lithium-ion Battery Overview, Technical Notes, Issue 10, May 2012, 8 p. Saatavissa (viitattu 15.10.2016): [https://www.lightning-global.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/67\\_Issue10\\_Lithium-ion-Battery\\_TechNote\\_final.pdf](https://www.lightning-global.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/67_Issue10_Lithium-ion-Battery_TechNote_final.pdf)
- [15] Aging mechanism in Li ion cells and calendar life predictions, *Journal of Power Sources* 97-98, 2001, 13-21.
- [16] RoperId, Tesla Model S, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.5.2016): <http://www.roperId.com/science/TeslaModelS.htm>
- [17] Charged, *Electric Vehicles Magazine*. Tesla's batteries – past, present and future, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.5.2016): <https://chargedevs.com/features/teslas-batteries-past-present-and-future/>
- [18] Tekniikka&Talous, EU tahtoo kieltää lyijyakut, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.3.2016): <https://summa.talentum.fi/article/tt/eu-tahtoo-kieltaa-lyijyakut/255688>
- [19] Green Car Congress, GS Yuasa develops 12V Li-ion battery for start/stop applications, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.3.2016): <http://www.green-carcongress.com/2014/02/20140213-gsyuasa.html>
- [20] DIRECTIVE 2002/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment
- [21] Small Battery Company, Industrial Nickel Metal Hydride (NiMH) Batteries, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.3.2016): [http://www.smallbattery.company.org.uk/sbc\\_industrial\\_nimh.htm](http://www.smallbattery.company.org.uk/sbc_industrial_nimh.htm)
- [22] Björn Nykvist & Måns Nilsson, Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles, *Nature Climate Change* 5, 329–332 (2015).
- [23] Battery University, BU-205: Types of Lithium-Ion, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.11.2016): [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)
- [24] GWL Power, Lithium Titanate (LTO) Cells – technical Advantages, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.11.2016): <https://www.ev-power.eu/LTO-Tech/>
- [25] Davide Andrea, *Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs*, Artech House, 2010, 300 p.

- [26] Toivonen Juha, Akkujen hyödyntäminen siltanosturin energiavarastoina, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, toukokuu 2016, 61s. + liitt. 4s.
- [27] Battery University, BU-409: Charging Lithium-ion, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.11.2016): [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_lithium\\_ion\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries)
- [28] Chris Mi, Xi Zhang, Vehicle Power Management, modelling, control and optimization, Springer, 2011, 346 p.
- [29] Tekniikka&Talous, Maailman ensimmäinen syntyi Suomeen – DC-verkko vähentää katkoja ja on älykäs, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.6.2016): <http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/maailman-ensimmainen-syntyi-suomeen-dc-verkko-vahentaa-katkoja-ja-on-alykas-6240430>
- [30] ABB, Tekninen opas nro 1, suora momenttisäätö Saatavissa (viitattu 12.10.2016): <https://library.e.abb.com/public/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/Tekninenopasnro1.pdf>
- [31] Markkanen Jarmo, Tahtikoneen 3-vaihe-magnetointilaitteen toteutus, insinööriyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu, huhtikuu 2016, 55s. + liitt. 3s.
- [32] Rekola Jenni (TTY), sähköpostin välityksellä 1.-2.8.2016 välisenä aikana käyty asiantuntijakeskustelu
- [33] Laitinen Timo, SKS Group Oy, sähköposti- ja puhelinkeskustelut 23.8. – 28.11.2016 välisenä aikana.
- [34] Leroy-Somer, LSK D.C. motors 2 to 750 kW, technical catalogue (ei julkinen)
- [35] Plant Services, DC motors: Why are they still used?, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.10.2016): <http://plantservices.com/articles/2010/02dcmotors/>
- [36] Golden Motor Technology Co Ltd., 3 kW 48V BLDC motor datasheet, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.11.2016): <http://www.goldenmotor.com/hubmotors/hubmotor-imgs/HPM3000-48V3KW%20Data.pdf>
- [37] Golden Motor Technology Co Ltd., 3 kW 72V BLDC motor datasheet, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.11.2016): <http://www.goldenmotor.com/hubmotors/hubmotor-imgs/HPM3000-72V3KW%20Data.pdf>
- [38] National Instruments, Power Electronics Fundamentals: DC to AC Power - Inverters, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.7.2016): <http://www.ni.com/tutorial/14674/en/>
- [39] Emden University of Applied Sciences, Operation of 3-phase fully-controlled rectifier, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.11.2016): [http://www.technik-emden.de/~elmalab/projekte/ws9899/pe\\_html/ch05s1/ch05s1p1.htm](http://www.technik-emden.de/~elmalab/projekte/ws9899/pe_html/ch05s1/ch05s1p1.htm)

- [40] VTT, Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytössä, 76 s. Saatavissa (viitattu 24.10.2016): <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/TAMU-loppuraportti.pdf>
- [41] EDN Network, Tear Down: The nuances of variable-frequency drives, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.10.2016): <http://www.edn.com/design/analog/4371295/Teardown-The-nuances-of-variable-frequency-drives>
- [42] Kokkonen Jesse, Sähkökäytön valintaperiaatteet ja monimoottorikäytöt malmin laaduntasauksessa, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, maaliskuu 2007, 66 s. + liitt. 2 s.
- [43] United States Patent, Regenerative Hydraulic Lift, October 10, 2006, appl. no. 11/548,256
- [44] Bucher Hydraulics, Hydraulic lift with a regenerative drive system, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.10.2016): <http://www.bucherhydraulics.com/41413/41407/Topline-navigation/NEWSletter/Hydraulic-lift-with-regen/Technical-Articles/Hydraulic-lift-with-regen/index.aspx>
- [45] ElecCircuit, 12 to 24 volt DC converter circuits, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.10.2016): <http://www.eleccircuit.com/converter-dc12v-to-24v-2a-by-ic-40106-and-mosfet-buz11/>
- [46] Schaefer Power, DC/DC Converts, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.10.2016): <http://www.schaeferpower.com/content/content/dcdc-converters>
- [47] Siemens, Sinamics DCP, DC Power Converter, Sales slides, 19 p. (ei julkinen)
- [48] Siemens, Sinamics DCP, DC Power Converter, Technical slides, 54 p. (luottamuksellinen)
- [49] Heinonen Vilho, Kalatie Timo, Siemens, Elematic Oyj:n toimipisteellä 5.10.2016 käyty asiantuntijakeskustelu sekä Siemensin 17.10.2016 jättämä tarjous kokonaisjärjestelmän komponenteista.
- [50] Siemens, Sinamics S120, Commissioning Manual, 01/2011, 260 p. Saatavissa (viitattu 26.10.2016): [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/703/49084703/att\\_61724/v1/IH1\\_112011\\_eng\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/703/49084703/att_61724/v1/IH1_112011_eng_en-US.pdf)
- [51] Vuorivirta Antti, ABB Marketing Manager, Elematic Oyj:lle 10.12.2016 jätetty sähköpostiviesti.
- [52] ABB:n HES880 -taajuusmuuttajien esite. Saatavissa (viitattu 26.10.2016): [https://library.e.abb.com/public/16e1c494f464488ca878df1e096ebe92/Drive\\_modules\\_HES880\\_flyer.pdf](https://library.e.abb.com/public/16e1c494f464488ca878df1e096ebe92/Drive_modules_HES880_flyer.pdf)

- [53] Järventausta Pertti (TTY), Aurola Taisto (Elematic Oyj), Sirkka Jouni (Elematic Oyj), Tampereen teknillisellä yliopistolla 8.6.2016 käyty keskustelu.
- [54] Hyperdrive, Modular CAN Battery Management System CAN-BMS, [http://hyperdriveinnovation.com/images/editor/Brochure\\_Inserts/Modular\\_CAN\\_data\\_sheet.pdf](http://hyperdriveinnovation.com/images/editor/Brochure_Inserts/Modular_CAN_data_sheet.pdf) /viitattu 17.7.2016
- [55] Davide Andrea, Battery Management System for Large Lithium Ion Battery Packs. Artech House. 2010, 271 p.
- [56] Manzanita Micro Power Systems, Battery Regulators, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.7.2016): [http://www.manzanitamicro.com/products?page=shop.browse&category\\_id=22](http://www.manzanitamicro.com/products?page=shop.browse&category_id=22)
- [57] Manzanita Micro Power Systems, Mk3 Pba BMS, datasheet. Saatavissa (viitattu 17.7.2016): <http://www.manzanitamicro.com/downloads/category/18-battery-management-systems?download=87%3Alibms>
- [58] Arctic Electric Vehicles Oy, verkkokauppa, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.10.2016): [http://arctic-ev.omaverkkokauppa.fi/epages/arctic-ev.sf/fi\\_FI/?ObjectPath=/Shops/2015010202/Categories/%22BMS%20/%20Sulakkeet%20/%20Kontaktorit%20jne.%22](http://arctic-ev.omaverkkokauppa.fi/epages/arctic-ev.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/2015010202/Categories/%22BMS%20/%20Sulakkeet%20/%20Kontaktorit%20jne.%22)
- [59] Arctic Electric Vehicles Oy:n BMS -järjestelmän käyttöopas. Saatavissa (viitattu 20.10.2016): [http://www.123electric.nl/uploads/file/BMS\\_EV\\_Manual\\_v1\\_4.pdf](http://www.123electric.nl/uploads/file/BMS_EV_Manual_v1_4.pdf)
- [60] Arctic Electric Vehicles Oy:n Off-Grid BMS -järjestelmän käyttöopas. Saatavissa (viitattu 20.10.2016): [http://www.123electric.nl/uploads/file/BMS\\_Offgrid\\_Manual\\_v1\\_1.pdf](http://www.123electric.nl/uploads/file/BMS_Offgrid_Manual_v1_1.pdf)
- [61] GS Yuasa litiumioni -moduulit, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.8.2016): [http://s399157097.onlinehome.us/images/news/LIM50E\\_Modules\\_img\\_0.jpg](http://s399157097.onlinehome.us/images/news/LIM50E_Modules_img_0.jpg)
- [62] GS Yuasa, Industrial Litium-Ion Batteries, LIM 50E Module, datasheet. (ei julkinen)
- [63] Wen Han, GS Yuasa Business Development Executive, sähköpostin välityksellä 21.6. - 5.8.2016 välisenä aikana käyty asiantuntijakeskustelu.
- [64] J. Mäkinen. ABB, Electric buses, why buses are a very interesting application of electrification of transportation? April 13<sup>th</sup> 2016. 69 p.
- [65] Chris Mi, Xi Zhang, Vehicle Power Management, modelling, control and optimization, Springer, 2011, 346 p.
- [66] Maxwell supercapacitors, 160V Module, datasheet. Saatavissa (viitattu 4.4.2016): [http://www.maxwell.com/images/documents/160VModule\\_DS\\_3000246\\_6.pdf](http://www.maxwell.com/images/documents/160VModule_DS_3000246_6.pdf)



- [67] Mouser Electronics, Passive Components, Supercapacitors, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.4.2016): [http://www.mouser.fi/Passive-Components/Capacitors/Supercapacitors-Ultracapacitors/\\_/N-5x76s/](http://www.mouser.fi/Passive-Components/Capacitors/Supercapacitors-Ultracapacitors/_/N-5x76s/)
- [68] Maxwell 125V Module, datasheet. Saatavissa (viitattu 4.4.2016): [http://www.maxwell.com/images/documents/125vmodule\\_ds\\_1014696-7.pdf](http://www.maxwell.com/images/documents/125vmodule_ds_1014696-7.pdf)
- [69] Ioxus iMOD, datasheet. Saatavissa (viitattu 4.4.2016): [http://www.mouser.com/ds/2/212/KEM\\_S6005\\_S01-416689.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/212/KEM_S6005_S01-416689.pdf)
- [70] Kemet S01, datasheet. Saatavissa (viitattu 4.4.2016): [http://www.mouser.com/ds/2/212/KEM\\_S6005\\_S01-416689.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/212/KEM_S6005_S01-416689.pdf)
- [71] Sino Group, Sino-report. Ultra Capacitor Technology and Market Forecast ~2020, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.7.2016): <http://www.sino-report.com/b/dianzi/yuanqijian/20121011/1175.html> /
- [72] Tekniikka&Talous, Tehokas superkondensaattori tekee tietä autoihin, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.7.2016): <http://www.tekniikkatalous.fi/tiede/2014-04-23/Tehokas-superkondensaattori-tekee-tiet%C3%A4-s%C3%A4hk%C3%B6autoihin-3319202.html>
- [73] Heiska Teemu, Akkukäyttöisten tuotantolaitteiden latausinfraan alkuselviyty, opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, toukokuu 2016. 46 s. + liitt. 4 s.
- [74] Aurola Taisto, Sirkka Jouni, Elematic Oyj:n Akaan toimipisteellä 23.3.2016 käyty palaveri.
- [75] Elematic Oyj, Precast Academy IX, Tampere, June 11-13, 2003. (ei julkinen)
- [76] Elematic Oyj, EDGE HC prosessikuvaus ja laitemäärityt. (ei julkinen)
- [77] Elematic Oyj, Prosessilaitteiden sähkökaaviot. (ei julkinen)
- [78] Aurola Taisto, Sirkka Jouni, Elematic Oyj:n Akaan toimipisteellä 8.2.2016 käyty palaveri.
- [79] Honkoaho Riku, työraportti, Elematic Oyj, 2016 (luottamuksellinen).
- [80] Lead Acid and Grid Storage, Energy Storage Journal, April 23, 2015, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.7.2016): <http://www.energystoragejournal.com/lead-acid-and-grid-storage/>
- [81] Saarinen Joni, Phoenix Contact Area Manager, Sirkka Jouni, Aurola Taisto, Elematic Oyj:n Akaan toimipisteellä 11.5.2016 käyty asiantuntijakeskustelu.

- [82] Elematic Oyj, Preparer E9-1200, Technical Specification Sheet. (ei julkinen)
- [83] Elematic Oyj, Future Preparer E9-1200, mallikuva. (ei julkinen)
- [84] Aurola Taisto, Elematic Oyj, 23.8. – 22.9.2016 sähköpostin välityksellä käyty asiantuntijakeskustelu.
- [85] Aurola Taisto, Elematic Oyj, 20.7.2016 sähköpostin välityksellä käyty keskustelu.
- [86] Elematic Oyj, Cross Transfer 10, Technical Specification Sheet. (ei julkinen)
- [87] Current Ways Technologies, EV Chargers, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.10.2016): <http://www.currentways.com/ev-battery-chargers/>
- [88] Ratio Electric B.V., Charging Solutions Brochure. Saatavissa (viitattu 22.10.2016): <http://www.ratio.nl/files/Brochure%20Charging%20Solution%20s.pdf>
- [89] Phoenix Contact, Charging technology for E-Mobility, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 31.10.2016): [https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads\\_ed/global/web\\_dwl\\_promotion/52006703\\_EN\\_DE\\_E-Mobility\\_Lo-Res.pdf](https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/global/web_dwl_promotion/52006703_EN_DE_E-Mobility_Lo-Res.pdf)
- [90] Electropaedia, Electric Vehicle Charging Infrastructure, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.10.2016): <http://www.mpoweruk.com/infrastructure.htm>
- [91] Tuulilasi, Sähköauton pikalautausasema on usean kymppitonin investointi, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.10.2016): <http://www.tuulilasi.fi/blogit/sahkolinjaaho/sahkoauton-pikalatausasema-usean-kymppitonin-investointi>
- [92] Siemens, Charging Controller CM-100 Electric vehicle charging in accordance with IEC standards, 4p. Saatavissa (viitattu 29.11.2016): <http://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/ce/Documentsu20Brochures/e10003-e38-11t-g2131-7600.pdf>
- [93] Bosch, Electric Vehicle Solutions, Power Max, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.10.2016): <https://www.boschevsolutions.com/charging-stations/power-max>
- [94] EV-West, Catalog, Siemens VersiCharge, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.10.2016): [http://www.evwest.com/catalog/product\\_info.php?manufacturers\\_id=23&products\\_id=394&osCsId=scmlgk2qs2huvjtjkvaf6jhvm6](http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?manufacturers_id=23&products_id=394&osCsId=scmlgk2qs2huvjtjkvaf6jhvm6)
- [95] Siemens, VersiCharge charger, operational manual. Saatavissa (viitattu 14.10.2016): [https://w3.usa.siemens.com/us/internet-dms/btlv/residential/residential/docs\\_home/sie\\_im\\_versicharge.pdf](https://w3.usa.siemens.com/us/internet-dms/btlv/residential/residential/docs_home/sie_im_versicharge.pdf)

- [96] AeroVironment EV Solutions, Electric Vehicle Charging Station Configurations. Saatavissa (viitattu 14.10.2016): <http://www.westcoastgreenhighway.com/pdfs/Level2EVSE.pdf>
- [97] Arctic Electric Vehicles Oy, verkkokauppa. Rolec latauspisteet, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.11.2016): [http://arctic-ev.omaverkkokauppa.fi/epages/arctic-ev.sf/fi\\_FI/?ObjectPath=/Shops/2015010202/Categories/Saehkoeautojen\\_latauspisteet/Rolec\\_latauspisteet](http://arctic-ev.omaverkkokauppa.fi/epages/arctic-ev.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/2015010202/Categories/Saehkoeautojen_latauspisteet/Rolec_latauspisteet)
- [98] Metron Shop, EV Charger, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.10.2016): <http://eauto.si/metron-shop/?product=pc05-type2cee-3x16a-3-phase-carrier-case-copy>
- [99] EV OneStop, Catalog, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.11.2016): <https://evonestop.co.uk>
- [100] EV Connectors, Catalog. Tyypin 2 latausliitin, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.11.2016): [https://evconnectors.com/Type-2-Electric-Vehicle-Charging-Cables-and-Sockets/Type-2-Connectors-32-amp/Type-2-32-amp-Vehicle-Inlets?product\\_id=173](https://evconnectors.com/Type-2-Electric-Vehicle-Charging-Cables-and-Sockets/Type-2-Connectors-32-amp/Type-2-32-amp-Vehicle-Inlets?product_id=173)
- [101] Lahti Toni, Arctic Electric Vehicles Oy, sähköpostikeskustelu 24.10.-2.11.2016 välisenä aikana.
- [102] General Motors, Electric Vehicle DC Fast Charging, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.10.2016): <http://www.gmdesolutions.com/services/index.php?c=3200&s=3202&p=6578>
- [103] Bosch, Power DC Plus, Electric Vehicle DC Fast Charging, datasheet. Saatavissa (viitattu 14.10.2016): <http://www.electrumcharging.com/wp-content/uploads/pdf/Bosch%20Power%20DC%20Plus%20Spec%20Shee.pdf>
- [104] Green Car Congress, Bosch offering sub-10\$K 24 kW DC fast charger for North America, 7 July 2015, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.10.2016): <http://www.greencarcongress.com/2015/07/20150707-bosch.html>
- [105] Fleetcarma, A Simple Guide to DC Fast Charging. Saatavissa (viitattu 18.10.2016): <http://www.fleetcarma.com/dc-fast-charging-guide/>
- [106] Garo, Latausasemat, 12 s. Saatavissa (viitattu 10.10.2016): [http://www.garo.fi/fileadmin/garofi/Kataloger/AU/Latausasemat\\_05-13.pdf](http://www.garo.fi/fileadmin/garofi/Kataloger/AU/Latausasemat_05-13.pdf)
- [107] Electrek, Switzerland is getting a new fast-charging network worthy of the Tesla Supercharger: 150kW chargers at 100 sites, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.10.2016): <https://electrek.co/2016/06/21/switzerland-fast-charging-network-worthy-tesla-supercharger-150kw/>
- [108] Tesla Motors Wiki, Supercharger, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.10.2016): <http://www.teslamotors.wiki/wiki/Supercharger>

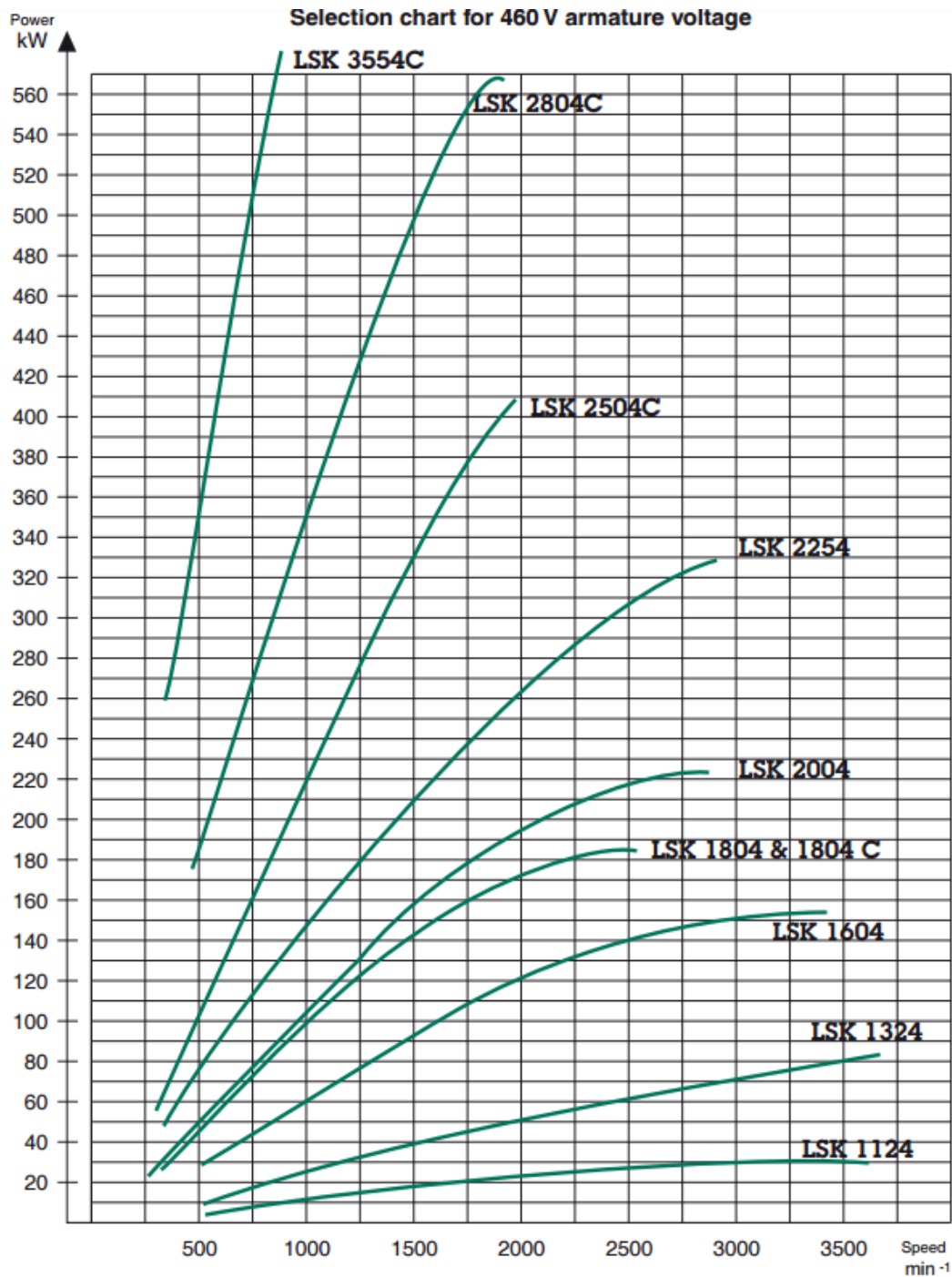
- [109] CHAdeMO Announces High Power (150 kW) version of the Protocol, 1 p. Saatavissa (viitattu 12.10.2016): [http://www.chademo.com/wp/wp-content/uploads/2016/06/2016-06-01\\_High\\_power\\_CHAdeMO.pdf](http://www.chademo.com/wp/wp-content/uploads/2016/06/2016-06-01_High_power_CHAdeMO.pdf)
- [110] EVTV Motor Verks, CHAdeMO 50kw DC-DC Charge Station, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.10.2016): <http://store.evtv.me/proddetail.php?prod=dcdcchargestation>
- [111] Inside EV, Current Cost of 50-kW CHAdeMO DC Quick Charger Around \$16,500?, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.11.2016): <http://insideevs.com/current-cost-of-50-kw-chademo-dc-quick-charger-around-16500/>
- [112] Mori Raddrizzatori, High Frequency Chargers for Traction Batteries, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.11.2016): <http://batterycomponents.com/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FFile-1417505112.pdf>
- [113] Suomenakut.fi, verkkokauppa. Exide geeliakku 12V/120Ah, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.11.2016): [https://suomenakut.fi/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=24035781](https://suomenakut.fi/index.php?main_page=product_info&products_id=24035781)
- [114] Infineon, Hybrid Electric and Electric Cars, Electromobility driven by Semiconductor Innovations, brochure, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.11.2016): <http://www.infineon.com/cms/en/applications/automotive/product-solutions-hev-ev/ac-dc-battery-charger/>
- [115] GM Wholesale Direct, verkkokauppa. Chevrolet Volt OEM -charger, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.10.2016): <http://www.gmwholesaledirect.com/oe-gm/22799689>
- [116] Chevrolet Volt, Charger Manual, 11 p., Saatavissa (viitattu 14.10.2016): <http://media3.ev-tv.me/ChevyVoltLearChargerOperations.pdf>
- [117] Tesla Gear, Dual Charger with Installation, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.10.2016): <http://shop.teslamotors.com/products/2nd-onboard-charger>
- [118] Manzanita Micro Power Systems, chargers, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.11.2016): [http://www.manzanitamicro.com/products?page=shop.browse&category\\_id=14&vmcchk=1](http://www.manzanitamicro.com/products?page=shop.browse&category_id=14&vmcchk=1)
- [119] Manzanita Micro Power Systems, PFC-20/30/40/50 chargers I-V characteristic, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.11.2016): [http://www.manzanitamicro.com/products?page=shop.browse&category\\_id=14&vmcchk=1](http://www.manzanitamicro.com/products?page=shop.browse&category_id=14&vmcchk=1)
- [120] Manzanita Micro Power Systems, PFC-20/30/40 charger datasheet, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.11.2016): <http://www.mazanitamicro.com/downloads/category/15-chargers?download=69%3Apfc20-30-40-spec-sheet>

- [121] Manzanita Micro Power Systems, PFC-50/75 charger datasheet, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.11.2016): <http://www.manzanitamicro.com/downloads/category/15-chargers?download=70%3Apfc50-75-spec-sheet>
- [122] EV-West, Catalog, verkkosivu, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.11.2016): <http://www.evwest.com/catalog/index.php?cPath=12>
- [123] EV-West, Elcon PFC5000 charger, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.11.2016): [http://www.evwest.com/catalog/product\\_info.php?cPath=12&products\\_id=97](http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=12&products_id=97)
- [124] EV-West, Elcon PFC5000 charger datasheet, 5 p. Saatavissa (viitattu 3.11.2016): [http://evwest.com/support/specsheets/PFC\\_5000.pdf](http://evwest.com/support/specsheets/PFC_5000.pdf)
- [125] EVT Motor Verks, Configurable 4 kW Charger, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.11.2016): <http://store.evtv.me/proddetail.php?prod=168vcharger>
- [126] Rowena Clark, Current Ways Technologies, Sales Support Coordinator, sähköpostikeskustelu 30.11.2016.
- [127] Current Ways Technologies, BC -series battery charger, datasheet. Saatavissa (viitattu 22.10.2016): <http://www.currentways.com/wp-content/uploads/2013/09/BC-Series-112-450-VDC-Air-Cooled-09.16.13.pdf>
- [128] EVT Motor Verks, Cables for Brusa, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.11.2016): <http://store.evtv.me/proddetail.php?prod=brusacables>
- [129] EVT Motor Verks, Brusa NLG513 Charger, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.11.2016): <http://store.evtv.me/proddetail.php?prod=brusanlg>
- [130] Brusa Elektronik AG, NLG513 Air: 230 VAC/16 A, 400 VDC, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.11.2016): <http://www.brusa.biz/en/products/charger/charger-400-v/nlg513-air.html>
- [131] Brusa Elektronik AG, NLG513 On – Board Charger, datasheet, 2 p. Saatavissa (viitattu 4.11.2016): [http://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA\\_DB\\_EN\\_NLG513.pdf](http://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA_DB_EN_NLG513.pdf)
- [132] Brusa Elektronik AG, NLG514 On – Board Charger, datasheet, 2 p. Saatavissa (viitattu 4.11.2016): [http://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA\\_DB\\_EN\\_NLG514.pdf](http://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA_DB_EN_NLG514.pdf)
- [133] Brusa Elektronik AG, NLG664 On – Board Charger, datasheet, 2 p. Saatavissa (viitattu 4.11.2016): [http://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA\\_DB\\_EN\\_NLG664.pdf](http://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA_DB_EN_NLG664.pdf)
- [134] Brusa Elektronik AG, NLG667 On – Board Charger, datasheet, 2 p. Saatavissa (viitattu 4.11.2016): [http://www.brusa.biz/fileadmin/Diverses/Download/Datenblaetter/BRUSA\\_DB\\_EN\\_NLG667.pdf](http://www.brusa.biz/fileadmin/Diverses/Download/Datenblaetter/BRUSA_DB_EN_NLG667.pdf)

- [135] Metric Mind Corporation, price list, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.10.2016): <http://www.metricmind.com/price-list/>
- [136] Nichicon, EV Power Station. New possibilities to make your car a lifestyle power source, 4 p. Saatavissa (viitattu 17.10.2016): [http://www.nichicon.co.jp/english/eco/pdfs/2012e\\_02.pdf](http://www.nichicon.co.jp/english/eco/pdfs/2012e_02.pdf)
- [137] Metric Mind Corporation, Nissan Leaf upgrade project, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.10.2016): <http://www.metricmind.com/leaf/main.htm>
- [138] Metric Mind Corporation, Nissan Leaf booster chargers, block diagram, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.10.2016): [http://www.metricmind.com/leaf/line\\_art/block\\_diag.gif](http://www.metricmind.com/leaf/line_art/block_diag.gif)
- [139] IEC 61980-1:2015 Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements
- [140] Auto Concept reviews.com, Peugeot TULIP Urban Electric Car Concept 1995, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.8.2016): [http://www.autoconcept-reviews.com/cars\\_reviews/peugeot/peugeot-tulip-electric-car-concept-1995/cars\\_reviews-peugeot-tulip-electric-car-concept-1995.html](http://www.autoconcept-reviews.com/cars_reviews/peugeot/peugeot-tulip-electric-car-concept-1995/cars_reviews-peugeot-tulip-electric-car-concept-1995.html)
- [141] Beretta Joseph, Automotive Electricity: Electric Drive, 2010, Wiley. 304 p.
- [142] WiTricity, Highly Resonant Wireless Power Transfer: Safe, Efficient, and over Distance, 32 p. Saatavissa (viitattu 17.10.2016): <http://www.witricity.com/assets/highly-resonant-power-transfer-kesler-witricity-2013.pdf>
- [143] Ekström Tuomas, Saarinen Harri, Esbecon Oy, sähköpostikeskustelu 3.4-1.12.2016 välisenä aikana.
- [144] Vahle, Systems In Motion, Battery Charging Systems catalog, 8p. (ei julkinen)
- [145] Vahle, Systems In Motion, CPS catalog, 15p. (ei julkinen)
- [146] Valtioneuvoston asetus paristoista ja akuista (520/2014).
- [147] Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu, Akkujen ja paristojen tuottajavastuu, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 18.4.2016) [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus\\_ja\\_tuotanto/Jatteet\\_ja\\_jatehuolto/Tuottajavastuu/Akut\\_ja\\_paristot](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Jatteet_ja_jatehuolto/Tuottajavastuu/Akut_ja_paristot)
- [148] DIRECTIVE 2006/66/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC
- [149] Jätelaki (646/2011).
- [150] Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähköalan töistä (516/1996).

- [151] Hallituksen esitys uudeksi sähköturvallisuuslaiksi. Saatavissa (viitattu 23.4.2016): [https://www.tem.fi/files/44078/STL\\_HE\\_19\\_10\\_2015\\_luonnos.pdf](https://www.tem.fi/files/44078/STL_HE_19_10_2015_luonnos.pdf)
- [152] SFS-EN 62485-3 Safety requirements for secondary batteries and battery installations – Part 3: Traction Batteries
- [153] SFS-EN 50272-2 Safety requirements for secondary batteries and battery installations – Part 2: Stationary batteries
- [154] Bender-UK Ltd. Insulation resistance – testing, measuring and monitoring, 8 p. Saatavissa (viitattu 6.12.2016): [http://www.bender-uk.com/fileadmin/bender-uk/news/Article\\_Insulation\\_resistance\\_testing\\_measuring\\_monitoring\\_en.pdf](http://www.bender-uk.com/fileadmin/bender-uk/news/Article_Insulation_resistance_testing_measuring_monitoring_en.pdf)
- [155] Kylä-Kaila Jyri, Mattila Jari, Räsänen Matti ja Kelkka Juuso, Valmet Automotive Oy, Uudessakaupungissa 8.11.2016 käyty asiantuntijakeskustelu.
- [156] Intertek Group plc, UN Transportation Testing (UN DOT 38.3) for Lithium Batteries, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.11.2016): <http://www.intertek.com/energy-storage/un-transportation-testing/>
- [157] Wen Han, Stevenson Peter, GS Yuasa, sähköpostin ja puhelimen välityksellä käydyt asiantuntijakeskustelut 10.11. - 28.11.2016 välisenä aikana.
- [158] Brusa, Definition and implementation of a global EV charging infrastructure, 33 p. Saatavissa (viitattu 13.8.2016): <https://www.yumpu.com/en/document/view/39489467/definition-and-implementation-of-a-global-ev-park-amp-charge>
- [159] Electrical Engineering Portal, Balancing of single-phase loads to achieve energy efficiency, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.11.2016): <http://electrical-engineering-portal.com/balancing-of-single-phase-loads-to-achieve-energy-efficiency>
- [160] Leitner Ladge, CurrentWays, sähköpostikeskustelu 30.11.2016.

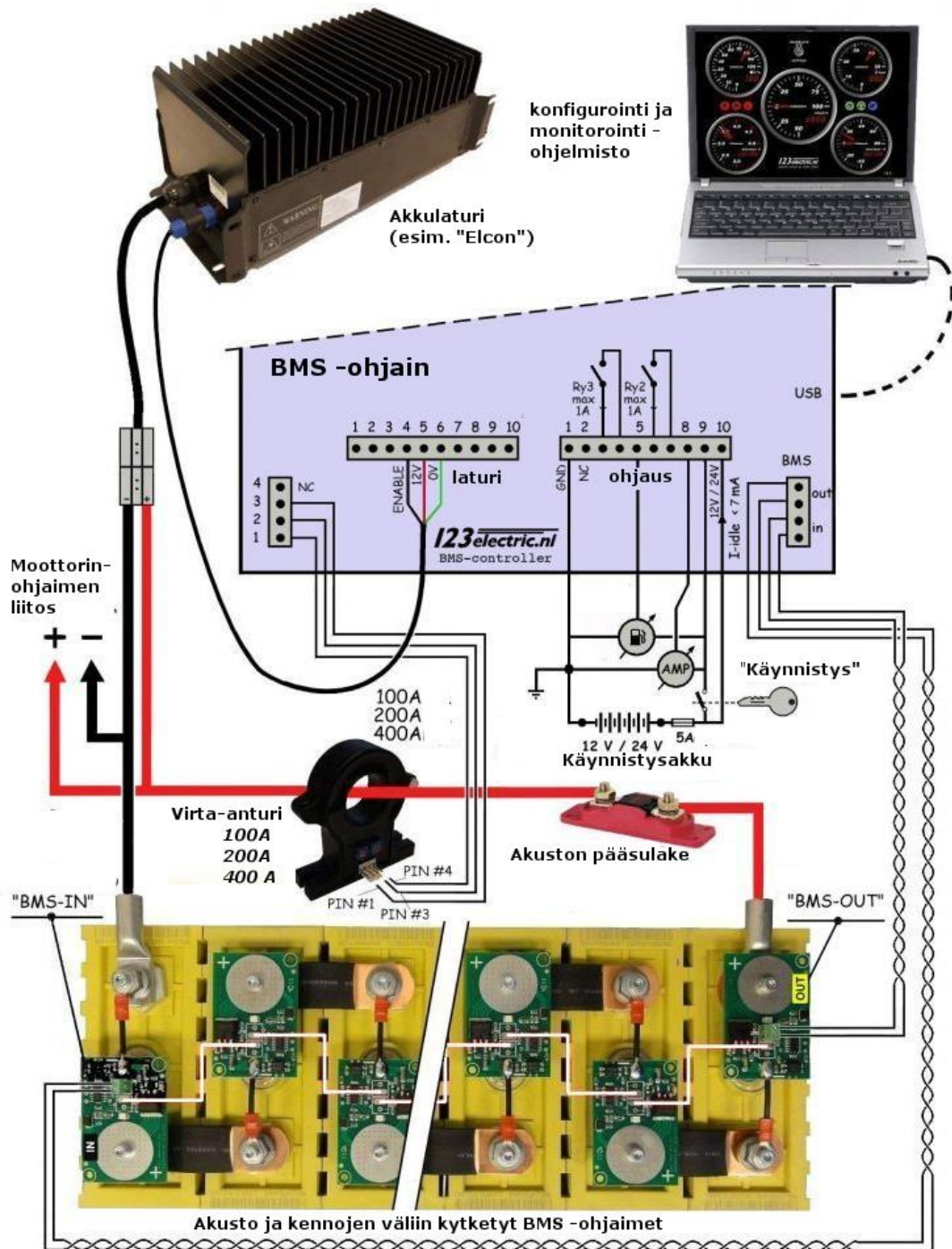
## LIITE 1: LEROY-SOMERSIN TASAVIRTAMOOTTOREIDEN MALLIVARIAATIOT



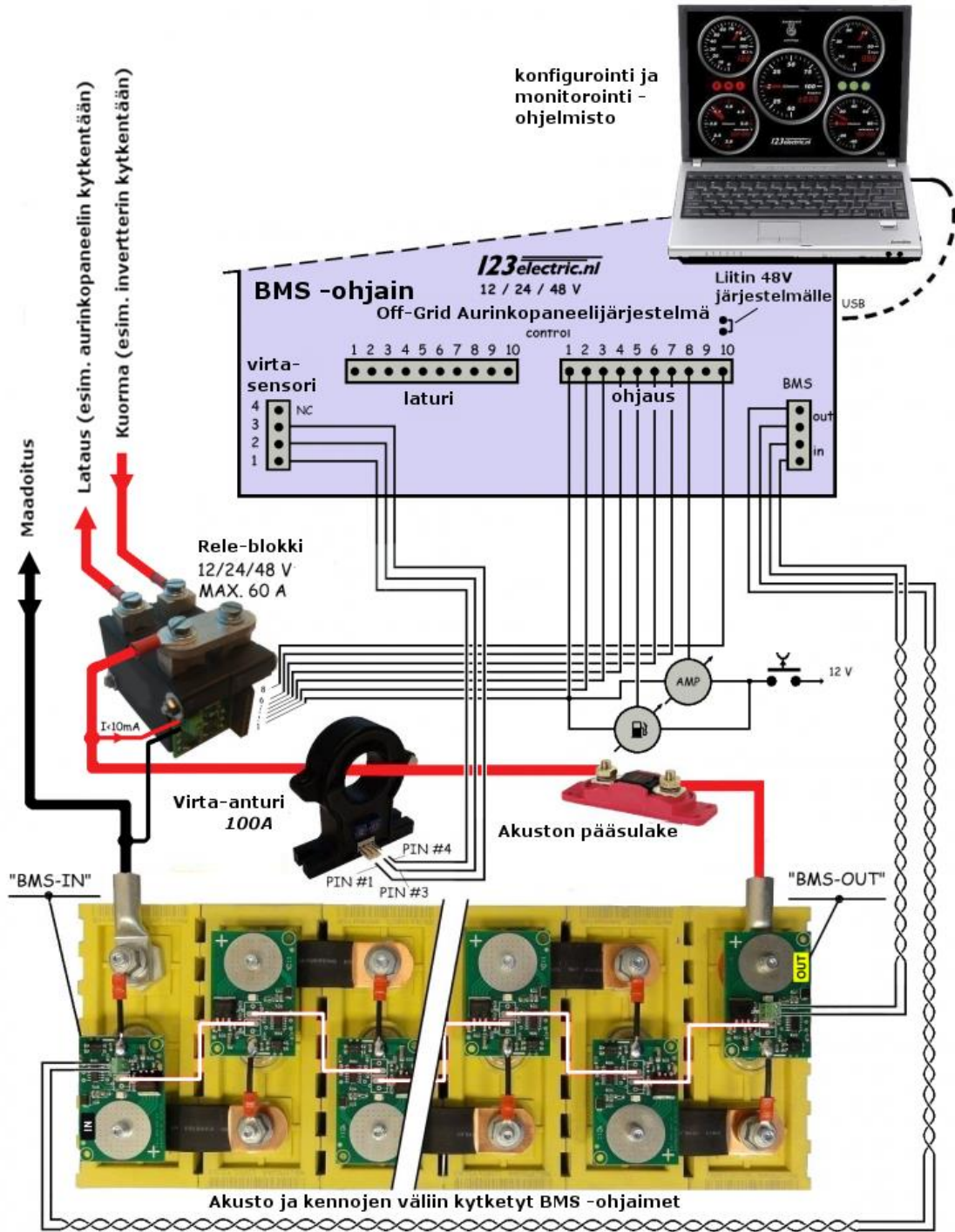
*Kuva 1 LSK:n tasavirtamoottoreiden mallivariaatioiden kategorisointi tehon ja pyörimisnopeuden mukaan [34].*



## LIITE 2: ARCTIC ELECTRIC VEHICLES OY:N BMS -JÄRJESTELMÄ-VAIHTOEHDOT

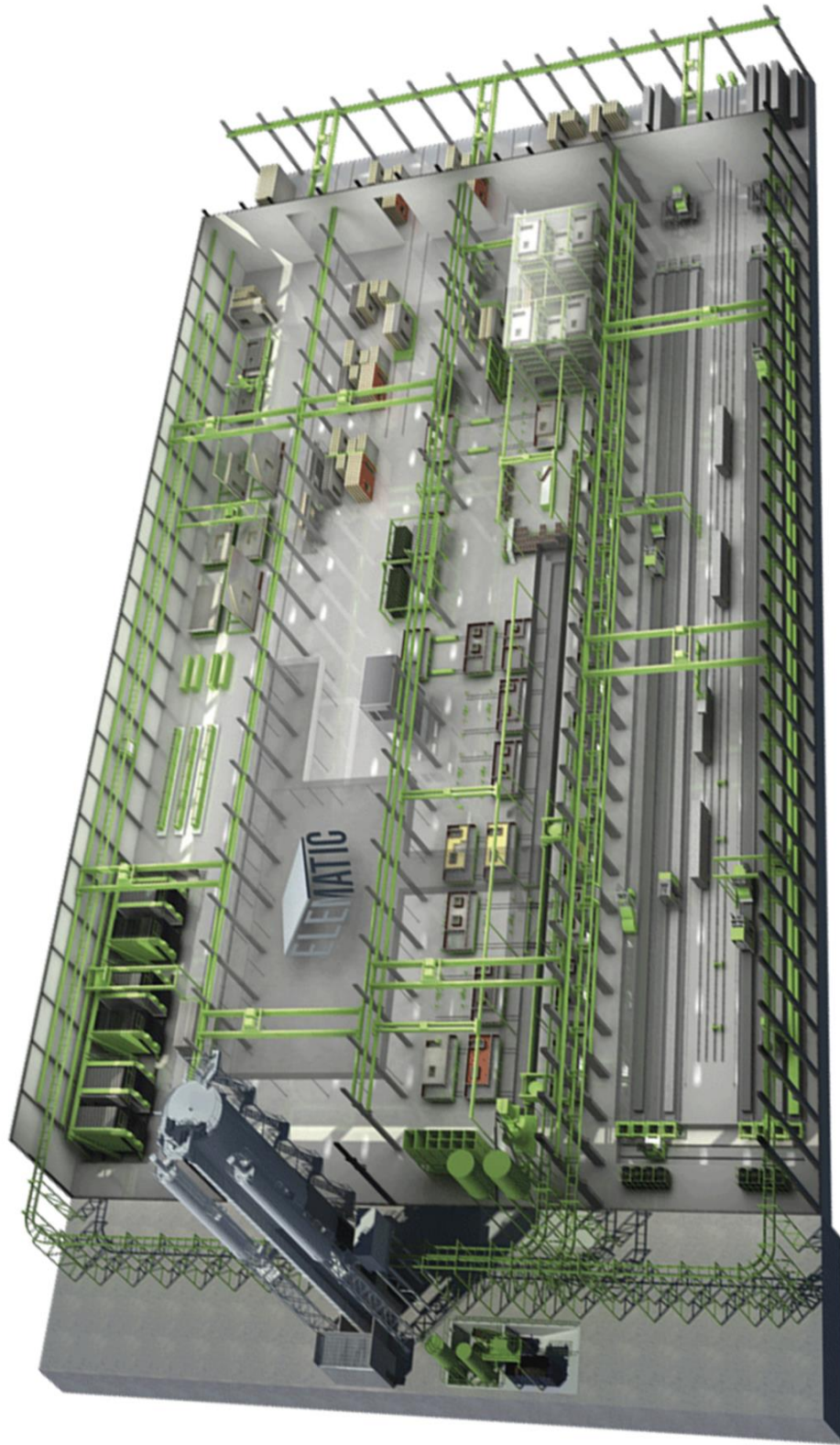


Kuva 2 BMS-järjestelmävaihtoehto 1, muokattu lähteestä [59].



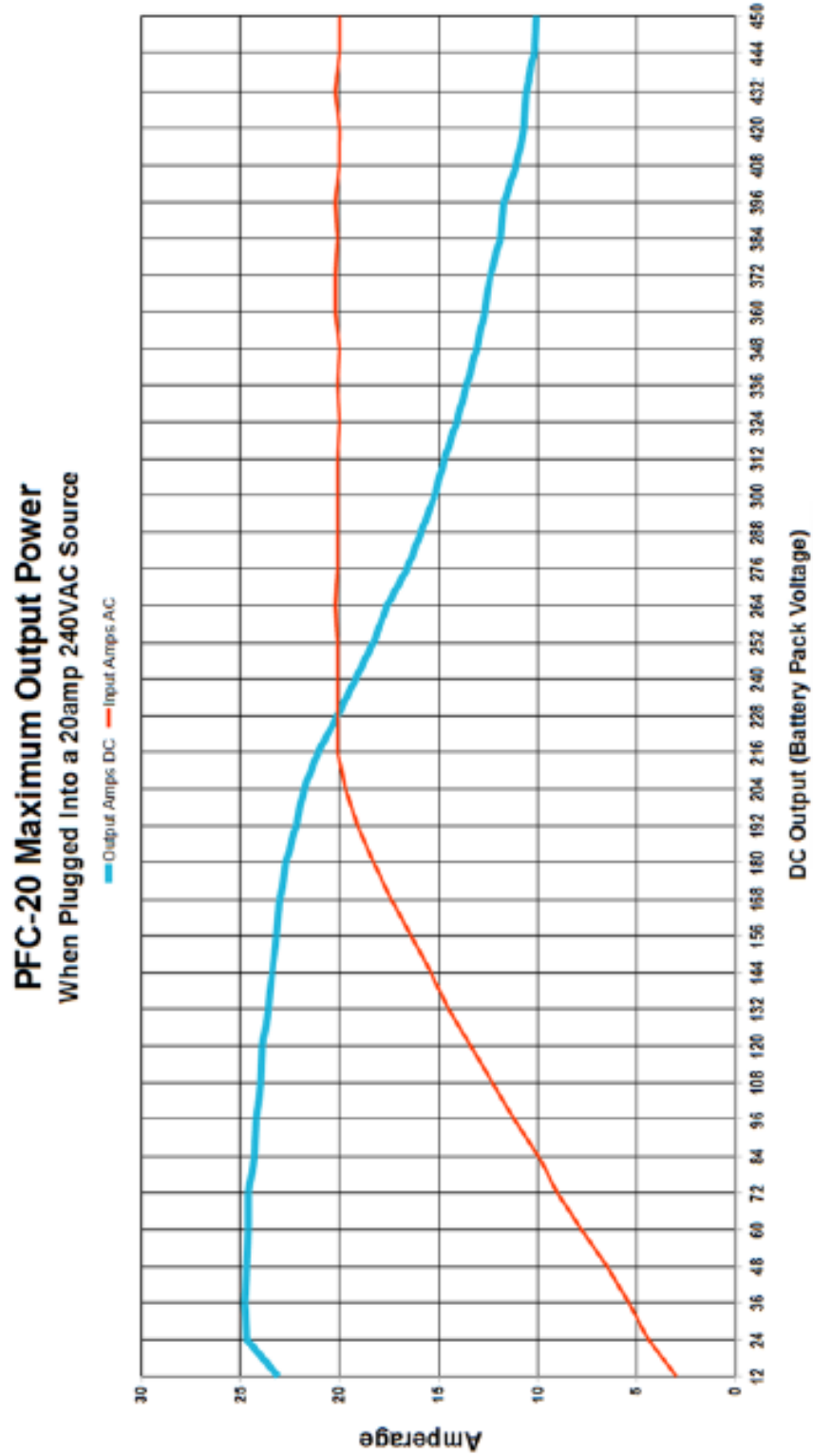
Kuva 3 BMS-järjestelmävaihtoehto 2, muokattu lähteestä [60].

**LIITE 3: ELEMATIC OY:N EDGE -LINJASTOKONSEPTIN HAVAINNE-  
KUVA**



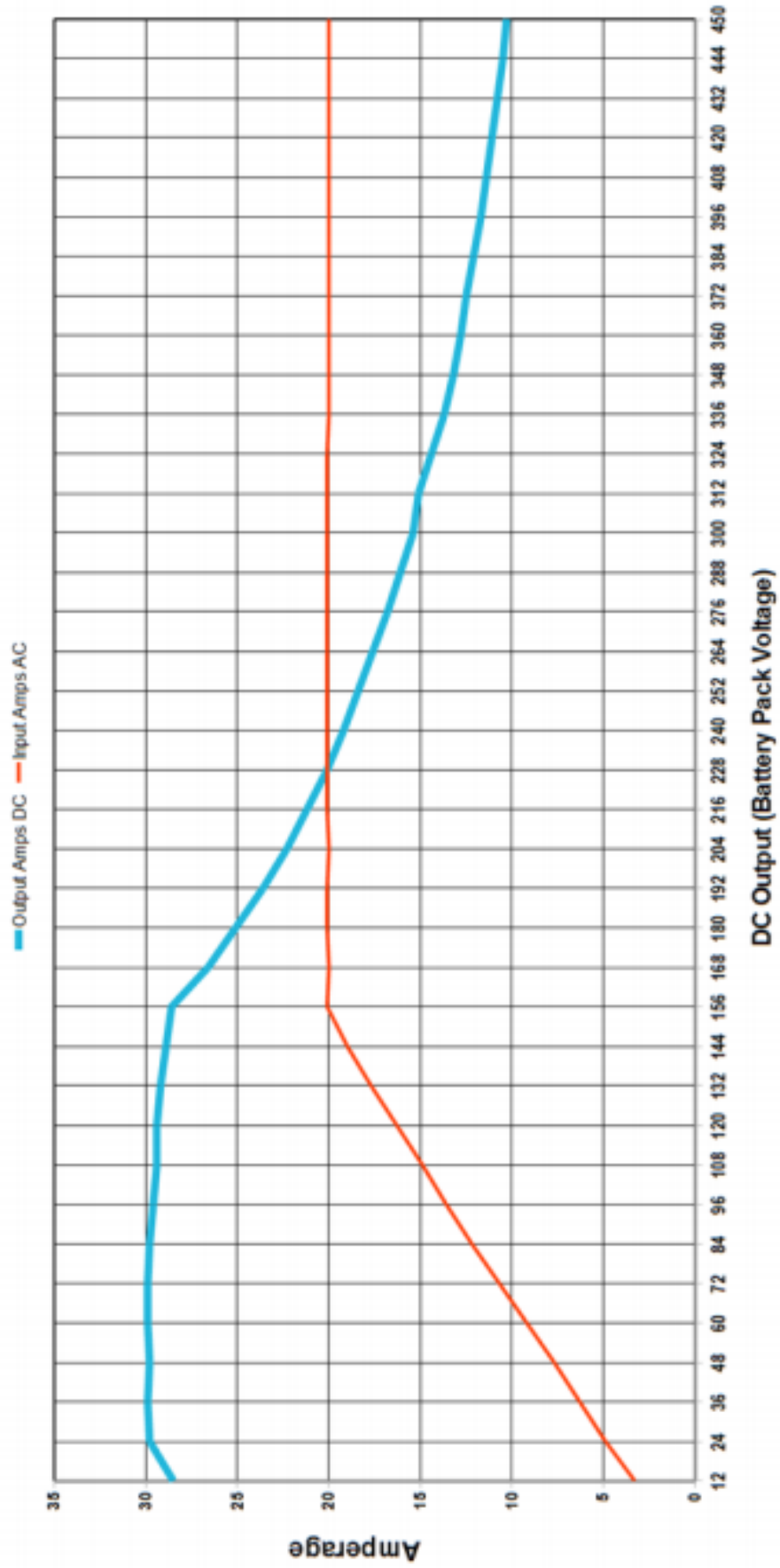
*Kuva 4 EDGE-linjastokonseptin havainnekuva [75].*

**LIITE 4: MANZANITA MICRO -LATUREIDEN ULOS- JA SISÄÄNTULO-  
VIRTOJEN KUVAAJAT AKUSTON JÄNNITETASON FUNK-  
TIONA**



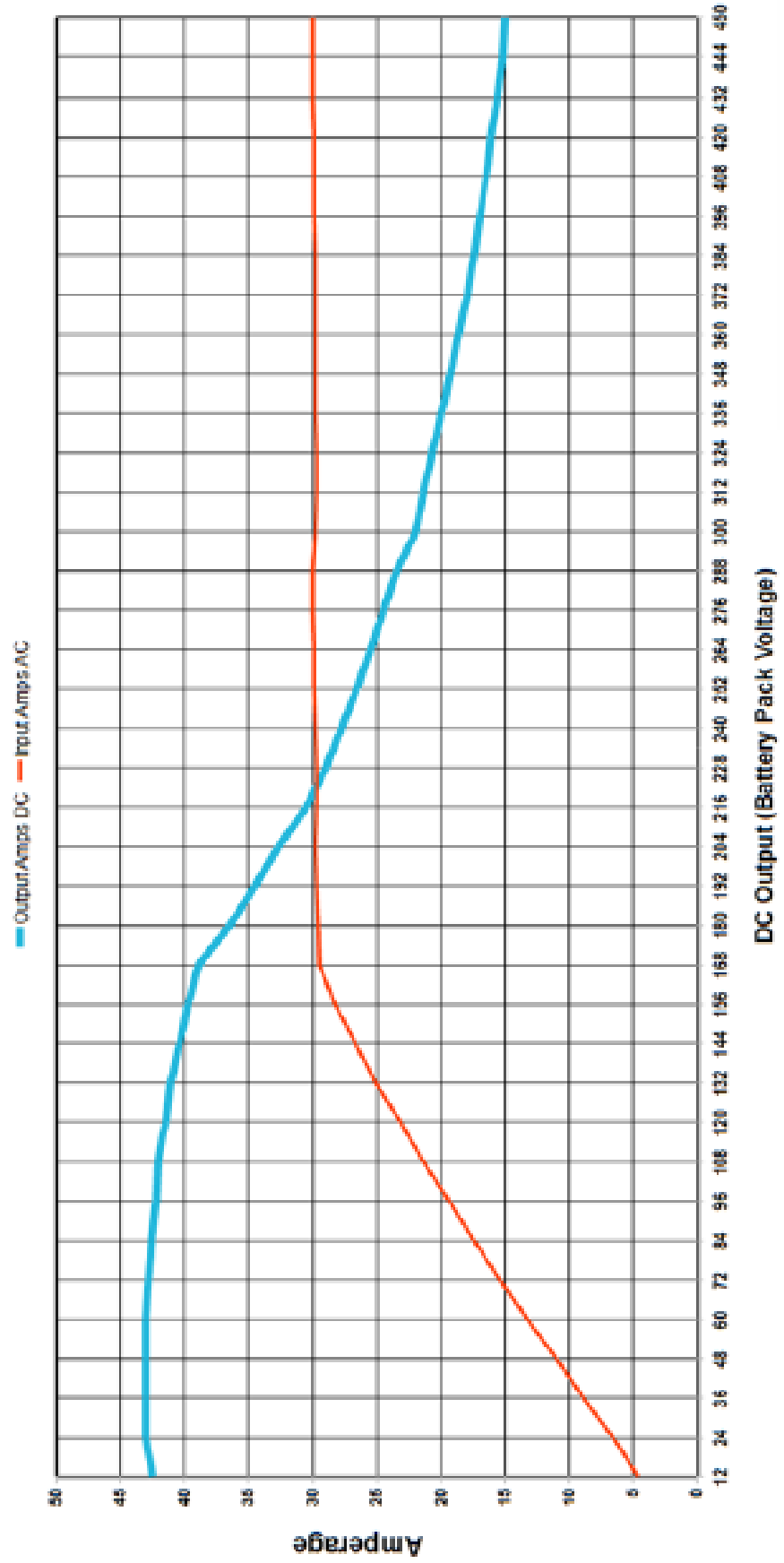
*Kuva 5 PFC-20 laturin ulostulotehon kuvaaja [119].*

**PFC-20B Maximum Output Power  
When Plugged Into a 20amp 240VAC Source**



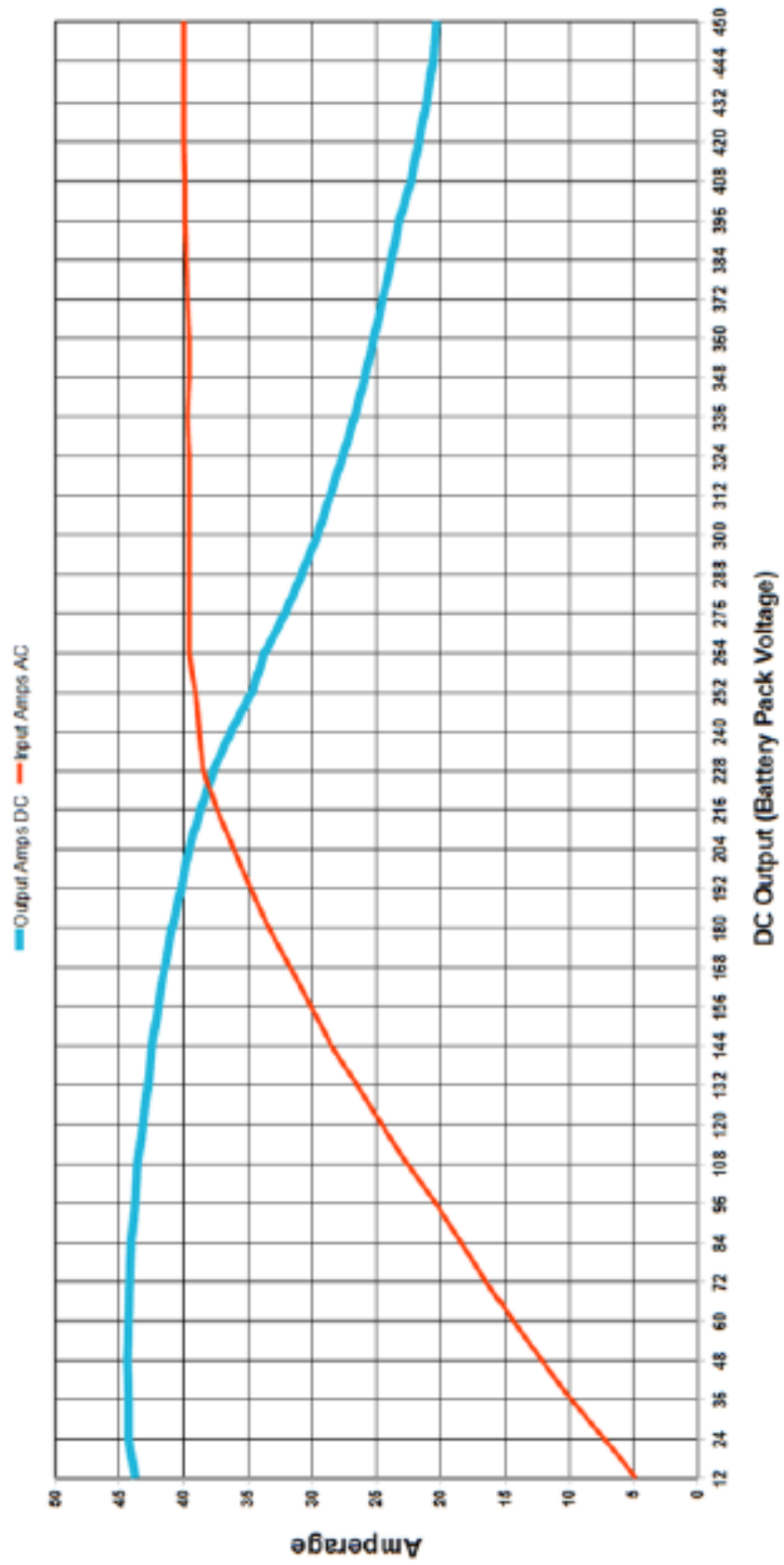
*Kuva 6 PFC-20B laturin ulostulotehon kuvaaja [119].*

### PFC-30 Maximum Output Power When Plugged Into a 30amp 240VAC Source



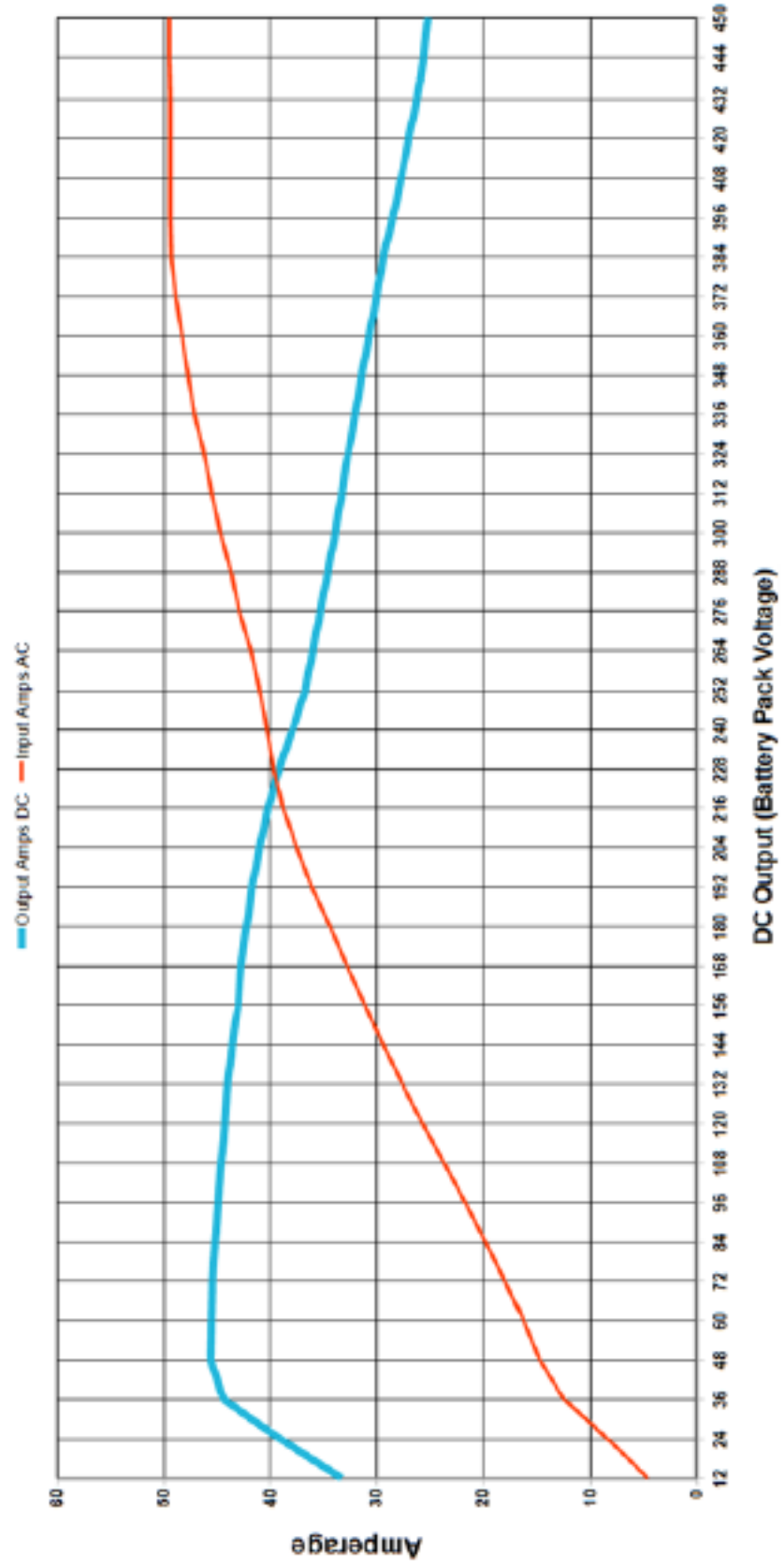
Kuva 7 PFC-30 laturin ulostulotehon kuvaaja [119].

### PFC-40 Maximum Output Power When Plugged Into a 50amp 240VAC Source



Kuva 8 PFC-40 laturin ulostulotehon kuvaaja [119].

### PFC-50 Maximum Output Power When Plugged Into a 50amp 240VAC Source



Kuva 9 PFC-50 laturin ulostulotehon kuvaaja [119].



**LIITE 5: GS YUASAN TARJOAMAT AKKUKÄYTTÖISEN PREPARERIN AKUSTOKONSEPTIT**

*Taulukko 1. Ilman imuria olevan välimallin Preparerin akusto [157].*

<b>Linjastotyyppi</b>	<b>Kennomäärä (kpl)</b>	<b>Toimintajännite (V<sub>DC</sub>)</b>	<b>Syklinen elinikä (kpl)</b>
6 x 150 m	48	144-197	10 000
4 x 150 m	36	108-148	8 000
4 x 200 m	48	144-197	8 000

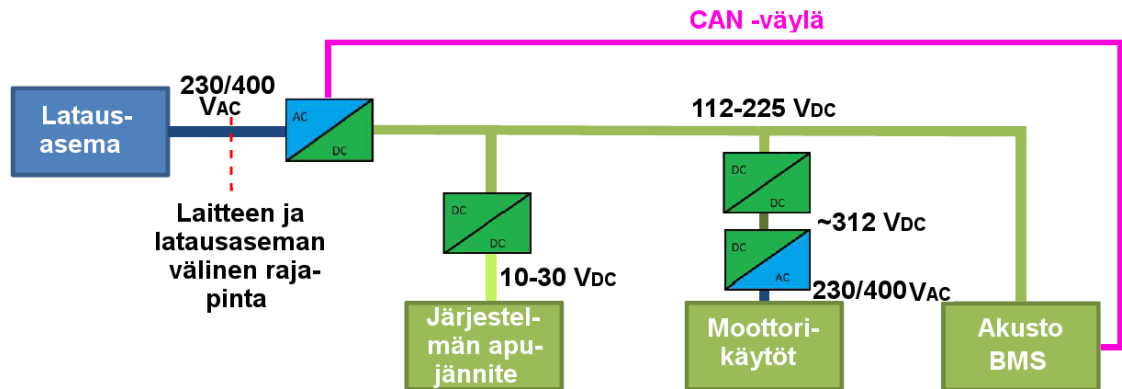
*Taulukko 2. Imurilla varustetun täyssähkömallin Preparerin akusto [157].*

<b>Linjastotyyppi</b>	<b>Kennomäärä (kpl)</b>	<b>Toimintajännite (V<sub>DC</sub>)</b>	<b>Syklinen elinikä (kpl)</b>
6 x 150 m	48	144-197	10 000
4 x 150 m	36	108-148	8 000
4 x 200 m	48	144-197	8 000

*Taulukko 3. Ilman imuria olevan täyssähkömallin Preparerin akusto [157].*

<b>Linjastotyyppi</b>	<b>Kennomäärä (kpl)</b>	<b>Toimintajännite (V<sub>DC</sub>)</b>	<b>Syklinen elinikä (kpl)</b>
6 x 150 m	44	132-180	10 000
4 x 150 m	32	96-131	8 000
4 x 200 m	44	132-180	8 000

## LIITE 6: AKKUKÄYTTÖISEN PREPARERIN HW-ARKKITEHTUURI

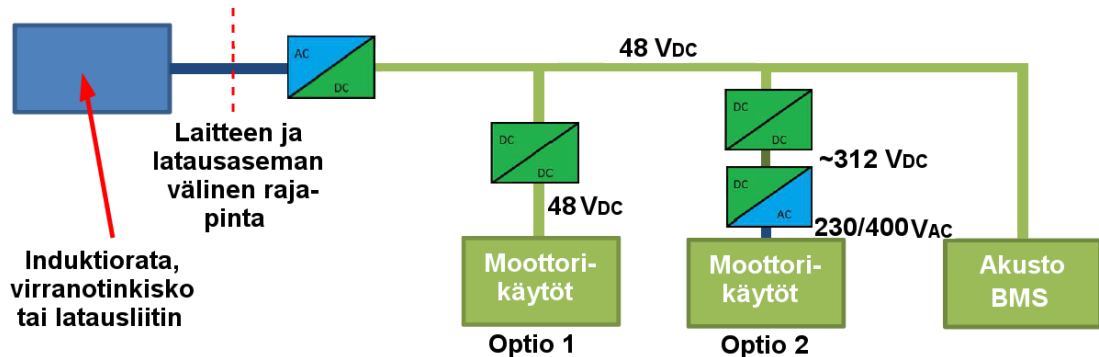


**Kuva 10** Akkukäyttöisen Preparerin välimallin HW-arkkitehtuuri sekä suunnitellut jännitetasot. Järjestelmässä apujännitettä tarvitaan moottorikäyttöjen DC/DC -muuntimia varten.

**Taulukko 4.** Akkukäyttöisen välimallin Preparerin laitteistokonsepti.

Komponentti	Kuvaus	Jännitetaso	Toimittajaoptiot
Laturi	3 kW, 2-4 kpl (CAN -väylä)	230/400V <sub>AC</sub> → 112-225 V <sub>DC</sub>	CurrentWays
BMS	Integroitu akustoon (CAN -väylä)	-	GS Yuasa
Akusto	LNMC akkukemia	112-225 V <sub>DC</sub>	GS Yuasa
DC/DC	Moottorikäyttöjä varten	112-225 V <sub>DC</sub> → 312 V <sub>DC</sub>	ABB (HES-880) / Siemens (DCP 30/120 kW)
DC/DC	Apujännitettä varten	112-225 V <sub>DC</sub> → 10-30 V <sub>DC</sub>	ABB / Siemens
Taajuusmuuttajat	Moottorikäyttöjen ohjaukseen	312 V <sub>DC</sub> → 230/400V <sub>AC</sub>	ABB / Siemens
Moottorit	Kolmivaiheiset oikosulkimoottorit	230/400 V <sub>AC</sub>	ABB

## LIITE 7: AKKUKÄYTTÖISEN POIKKISIIRTOPALKIN HW-ARKKITEHTUURI



*Kuva 11* Akkukäyttöisen poikkisiirtopalkin HW-arkkitehtuuri sekä suunnitellut jännitetasot, kuvasta nähdään kaksi vaihtoehtoista moottorikäyttöä eri jännitetasoilla. Optio 1 kuvaa erillisellä moottorinohjausmoduulilla ohjattavia 48 V tasavirtamoottoreita ja vastavasti optio 2 kuvaa taajuusmuuttajalla ohjattavia kolmivaiheisia oikosulkumoottoreita.

*Taulukko 5.* Akkukäyttöisen poikkisiirtopalkin laitteistokonsepti.

Komponentti	Kuvaus	Jännitetaso	Toimittajaoptiot
Laturi	Vaatii lisätietoja Vahlelta	230/400V <sub>AC</sub> → 48 V <sub>DC</sub>	Vahle
BMS	Kts. liite 2 ja taulukko 6.6	-	AEV
Akusto	LFP akkukemia	48 V <sub>DC</sub>	AEV
DC/DC <sup>(1)</sup>	Moottorikäyttöjä varten	48 V <sub>DC</sub> → 312 V <sub>DC</sub>	ABB (HES-880) / Siemens (DCP 30/120 kW)
DC/DC <sup>(1)</sup>	Apujännitettä varten	48 V <sub>DC</sub> → 10-30 V <sub>DC</sub>	ABB / Siemens
Taajuusmuuttajat <sup>(1)</sup>	Moottorikäyttöjen ohjaukseen	312 V <sub>DC</sub> → 230/400V <sub>AC</sub>	ABB / Siemens
Moottorit <sup>(1)</sup>	Kolmivaiheiset oikosulkimoottorit	230/400 V <sub>AC</sub>	ABB
Ohjain <sup>(2)</sup>	Tasavirtamoottoreiden ohjaukseen	48 V <sub>DC</sub>	-
Moottorit <sup>(2)</sup>	Tasavirtamoottorit	48 V <sub>DC</sub>	-

(1 ja (2) -optiot ovat keskenään vaihtoehtoisia.