



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**JUHA TOIVONEN**  
**AKKUJEN HYÖDYNTÄMINEN SILTANOSTURIN**  
**ENERGIAVARASTONA**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 4. touko-  
kuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**Juha Toivonen:** Akkujen hyödyntäminen siltanosturin energiavarastona  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 61 sivua, 4 liitesivua  
Toukokuu 2016  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Pääaine: Tehoelektroniikka  
Tarkastaja: professori Teuvo Suntio

Avainsanat: akku, litiumioniakku, siltanosturi

Diplomityössä tutkittiin litiumioniakkujen hyödyntämistä siltanosturin energiavarastona. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää akkujen käyttöikä ja turvallisuuden liittyvät asiat, sekä luoda akkukäyttöisen siltanosturin akuston mitoitukseen simulointimalli. Selvitetty tekijät otettiin huomioon mallinnettaessa Matlab Simulink -ohjelmistolla akkukäyttöistä nosturia. Tutkimuskohteena oli nimellisnostokyvyltään 5000 kg siltanosturi.

Akkujen turvallisuuden ja käyttöiän kannalta merkittäviä tekijöitä ovat akun käyttölämpötila, sallittu varaustason alue sekä akusta puretun ja akkuun ladatun virran suuruus. Nosturin normaali lämpötila-alue on sama kuin akuille suositeltu lämpötila-alue, joten sitä ei ikääntymisen osalta tarkastella. Selvityksessä tuli ilmi, että akulle tulee määrittää varaustason ylä- ja alarajat, joiden välissä toimiessaan akun ikääntymistä ei tarpeettomasti kiihdytetä. Akun virtarajat määrittyvät akkukemiasta riippuen: LNMC-akulla sallittu purkuvirta on kaksinkertainen nimellisvirtaan nähden, kun LTO:lla sallittu purkuvirta on jopa kymmenkertainen.

Valitut virta- ja varaustason rajat määritettiin halutuksi simuloitavaan järjestelmään. Simuloitavalle järjestelmälle syötettiin lähtöparametreina halutut siirtomatkat ja -nopeudet sekä siirrettävän kuorman massat. Näiden tietojen perusteella mallinnettiin tarvittavat tehofunktiot. Ottamalla huomioon nosturin mekaaniset ja sähköiset häviöt, saatiin määritettyä akulta vaadittava ottoteho eri tilanteissa sekä akuston energia. Näin mallin avulla pystytään määrittämään akkupaketin koko, jotta se riittää valitun nosturin energialähteeksi.

Simulointimallilla testattiin kolmessa eri kuormitustilanteessa kolmella eri akkukemialla: LTO, LNMC ja LFP. Tutkimuksessa huomattiin, että LTO ei valitulla nosturikonseptillä ollut ideaalisin vaihtoehto. Pääsyyinä oli nosturin sähköjärjestelmän hakkuriteholähteen virtaraja, jonka takia LTO:sta ei saatu koko tehopotentiaalia käyttöön. LTO:n kennojen lukumäärä oli lähes kaksinkertainen LNMC:n ja LFP:n vaatimiin kenno-määriin verrattuna. Mallinnettavasta nosturista riippuen paras vaihtoehto oli joko LNMC tai LFP.

Simulointimalli antoi hyvän kuvan eri akkukemioiden kyvystä toimia siltanosturin energiavarastona. Diplomityön tuloksia voidaan hyödyntää myöhemmin, kun mallin toimintaa validoidaan testaamalla todellista akustoa. Konseptin arvioinnissa täytyy tehdä kustannusarvioinnit ennen kuin sen tuotteistamista voidaan harkita.

## ABSTRACT

**Juha Toivonen:** Batteries as an Energy Storage for an Overhead Crane

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 61 pages, 4 Appendix pages

May 2016

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power Electronics

Examiner: Professor Teuvo Suntio

Keywords: battery, lithium-ion battery, overhead crane

This paper studies the utilization of batteries as an energy storage for an overhead crane. The goals were to find out which factors affect to the lifetime and safety issues of lithium-ion batteries. Another goal was to create a simulation model that can be utilized to size a battery pack for an overhead crane. The nominal lifting capacity of the modelled crane was 5000 kg. Simulation was made with Matlab Simulink –program.

To prevent unwanted safety issues and maximize the battery lifetime it is needed to pay attention to temperature, state of charge and current of the battery. The nominal operating temperature for an indoor overhead crane and for a battery have the same range. When charging and discharging a battery, the state of charge shouldn't be allowed to get too high or too low, otherwise the aging will be accelerated. Current limits for batteries should be set based on battery-chemistries, both for charging and discharging. For an example, LTO can discharge with over ten times higher current than LNMC.

Based on studied theory the current and state of charge limits were defined and set in the simulation model. Other initial parameters included speed, distance and mass for travelling and hoisting action of the crane. Within these parameters the simulation model was able to create power functions for travelling and hoisting movements. By adding power losses caused by the electrical and mechanical structure the simulation model calculates the needed power and energy from the battery pack. With built simulation model it was possible to define needed battery pack for different kind of crane use by using different parameter values.

The simulation model was tested with three different crane profiles and with three different battery chemistries: LTO, LNMC and LFP. The criteria was to find the smallest battery pack for each crane profile. Based on simulation results the LTO was not a good option for chosen crane concept. The main reason was that modelled concept needed a high voltage from battery pack due to current limit of a switched-mode converter. LTO itself would have been able to produce needed power with much less cell number than the concept with switched-mode converter needed. Depending on the modelled crane, the best choice was either LNMC or LFP.

Based on the results of this thesis a lithium ion battery pack can be used as an energy storage for an overhead crane. Before batteries can be used, the cost comparison to current power supply methods of overhead crane should be done.

## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Konecranes Global Oy:n tutkimusosastolle kevään 2016 aikana. Työn tarkastajana on toiminut professori Teuvo Suntio ja työn ohjaajana DI Toni Uusiniitty.

Kiitän professori Suntiota työn tarkastamisesta ja prosessin tukemisesta koko diplomityön kirjoittamisen ajan. Kiitän ohjaajaani Tonia laadukkaasta ohjauksesta, erinomaisista neuvoista sekä saumattomasta yhteistyöstä. Esimiehelleni Teemu Puustiselle haluan esittää kiitoksen mahdollisuudesta työn suorittamiseen sekä osoittamastasi luottamuksesta työskentelyyni. Diplomityön aiheen osalta haluan kiittää Tonin lisäksi Anna-Kaisa Repoa mielenkiintoisen aiheen esittelystä.

Haluan kiittää opiskelutovereitani, Sähkökiltaa, PerinneSeuraa, TTYYH14:ta sekä muita tahoja, joiden kanssa sain viettää vuoteni TTY:llä. Ilman teitä ja aktiivista opiskelijatoimintaa en olisi kasvanut ihmisenä näin paljon tai oppinut hallitsemaan erilaisia tilanteita niin hyvin.

Kiitos perheelleni opiskelujeni tukemisesta ja kannustamisesta. Erityiskiitos isälleni, jonka tarjoama viiden tähden hotellin tasoinen palvelu kotioloissa mahdollisti minulle täydellisen työrauhan diplomityöni kirjoittamiseen.

Tärkein kiitokseni on osoitettu sinulle Henriikka. Tukesi opiskeluelämän ja diplomityön aikana sekä erityisesti jokapäiväisessä elämässä on ollut minulle korvaamatonta.

Riihimäellä, 20.5.2016

Juha Toivonen

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	LITIUMIONIAKKU .....	2
2.1	Akkutekniikan kehittyminen .....	2
2.2	Litiumioniakkujen rakenne ja toimintaperiaate.....	3
2.2.1	Akun toimintaperiaate.....	5
2.2.2	Litiumioniakkujen elektrodimateriaalit.....	8
2.3	Akkujen lataustekniikka ja kunnonvalvonta .....	10
2.3.1	Akkujen lataustekniikka.....	11
2.3.2	Kunnonvalvonta .....	14
2.3.3	Turvallisuus.....	16
3.	SILTANOSTURI .....	18
3.1	Nostoliike .....	19
3.2	Siirtoliike.....	24
3.3	Taajuusmuuttajaohjattu moottorikäyttö .....	25
3.3.1	Oikosulkumoottori .....	26
3.3.2	Taajuusmuuttajakäyttö .....	29
3.4	Siltanosturin sähköjärjestelmä.....	32
4.	AKKUKÄYTTÖISEN SILTANOSTURIN MALLINNUS.....	35
4.1	Mallin rakentaminen .....	36
4.1.1	Kuorman mallinnus.....	37
4.1.2	Moottorin ja jarrun mallinnus .....	39
4.1.3	Taajuusmuuttajan mallinnus .....	39
4.1.4	Sähköjärjestelmän muut häviöt.....	40
4.1.5	Akun mallinnus .....	41
4.2	Simulointimallin käyttö.....	44
5.	MALLIN JA TULOSTEN ANALYSOINTI.....	45
5.1	Mallinnettavan nosturin mitoitus .....	45
5.1.1	Nosturin teho- ja energiavaatimukset .....	45
5.1.2	Akuston mitoituskriteerit .....	47
5.2	Mallinnuksen tulokset .....	49
5.3	Mallinnustulosten analysointi .....	52
5.3.1	Akuston valinta .....	53
5.3.2	Mallinnustulosten virhetarkastelu .....	54
6.	YHTEENVETO .....	56
	LÄHTEET.....	58

LIITE A: Simulointimallin kuvat

LIITE B: Akkujen kuormituskäyrästä

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

### Lyhenteet

BMS	eng. Battery Management System, akun kunnonvalvontayksikkö
C-arvo	eng. C-rate, virran arvo, jolla täyteen ladatun akun varaus puretaan yhden tunnin aikana.
CC	eng. Constant current, akkujen latausmenetelmä
CC/CV	eng. Constant current/constant voltage, akkujen latausmenetelmä
IEC	eng. International Electrotechnical Commission, kansainvälinen standardointiorganisaatio
NiCd	Nikkelikadmiumakku
NiMH	Nikkelimetallihydridiakku
LCO	LiCoO <sub>2</sub> , litiumkoolttioksidiaakku
LFP	LiFePO <sub>4</sub> , litiumrautafosfaattiakku
LMO	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , litiummangaaniakku
LNCA	LiNiCoAlO <sub>2</sub> , litiumnikkelikoolttialumiiniakku
LNMC	LiNiMnCoO <sub>2</sub> , litiumnikkelimangaanikoolttiakku
LiPF <sub>6</sub>	Litiumheksafluorifosfaatti
LiPo	Litiumpolymeeri
LTO	Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub> , litiumtitanaattiakku
PWM	eng. pulse-width modulation, pulssinleveysmodulointi
SEI	eng. solid-electrolyte interphase, akun elektrodin pinnalle muodostuva suojakerros
SOC	eng. state-of charge, akun varaustaso

### Merkinnät

Ah	ampeiritunti
a	kiihtyvyys
a <sub>h</sub>	hidastusvaiheen kiihtyvyys
a <sub>k</sub>	kiihdytysvaiheen kiihtyvyys
C	hiili
C <sub>n</sub>	akun nimelliskapasiteetti
C <sub>p</sub>	polarisaatiokapasitanssi
E <sub>lk</sub>	laskutilanteen kiihdytysenergia koko simuloinnin aikana
E <sub>nk</sub>	nostotilanteen kiihdytysenergia koko simuloinnin aikana
E <sub>ntot</sub>	kokonaisenergia
e <sup>-</sup>	elektroni
F	voima
f <sub>s</sub>	tahtinopeuden taajuus
g	putoamiskiihtyvyys
I	akun virta
I <sub>0</sub>	magnetointivirta

$I_1$	moottorin staattoripuolen virta
$I_2'$	moottorin staattoripuolelle redusoidun roottoripuolen virta
$i$	vaihteiston välitysluku
$J_1'$	suoraviivaisesti liikkuvia massoja vastaava hitausmomentti moottorin akselille redusoituna
$J_B$	jarrun hitausmomentti
$J_{C1}$	moottorin ja vaihteen välisen kytkimen hitausmomentti
$J_{C2}'$	vaihteen ja telan välisen kytkimen hitausmomentti moottorin akselille redusoituna
$J_D'$	telan hitausmomentti moottorin akselille redusoituna
$J_G$	vaihteiston hitausmomentti
$J_M$	moottorin hitausmomentti
$J_{tot}$	kokonaishitausmomentti
$Li$	litium
$Li^+$	positiivisesti varautunut litiumioni
$M$	metalli tai metallikombinaatio
$m_n$	nostettava massa
$m_s$	siirrettävä massa
$n$	moottorin akselin pyörimisnopeus
$n_s$	tahtinopeus
$O_2$	oksidi
$P$	sähköinen teho
$P_1$	Kiihdyttävä teho
$P_{12}$	moottorin ilmaväliteho
$P_2$	Vakionopeudella kuluva teho
$P_3$	Hidastava teho
$P_{Fe}$	moottorin staattorin rautahäviöt
$P_{k1}$	moottorin staattorin resistiiviset häviöt
$P_{k2}$	moottorin roottorin resistiiviset häviöt
$P_{lisä}$	moottorin staattorin lisähäviöt
$P_{max}$	maksimiteho
$P_{mek}$	moottorilta saatava mekaaninen teho
$P_{nmax}$	nostotapahtuman maksimiteho
$P_p$	moottorin mekaaniset häviöt
$P_{smax}$	siirtotapahtuman maksimiteho
$P_y$	teho
$p$	napapariluku
$Q$	sähkövaraus
$R$	akun sarjaresistanssi
$R_1$	moottorin staattoripuolen resistanssi
$R_2'$	moottorin staattoripuolelle redusoidun roottoripuolen resistanssi

$R_p$	akun polarisaatioresistanssi
$r$	telan säde
$s$	suhteellinen jättämä
$T$	momentti
$T_{n1}$	nostoliikkeen vakiomomentti
$T_{n2}$	nostoliikkeen kiihdyttävä momentti
$T_{ntot}$	nostoliikkeen kokonaismomentti
$T_{s1}$	siirtoliikkeen vakiomomentti
$T_{s2}$	siirtoliikkeen kiihdyttävä momentti
$T_{stot}$	siirtoliikkeen kokonaismomentti
$U_1$	moottorin staattorijännite
$U_{oc}$	akun elektrodien välinen eli avoimen piirin jännite
$U_{\sigma 1}$	moottorin staattoripuolen vuotojännite
$U_{\sigma 2}$	moottorin staattoripuolelle redusoidun roottoripuolen vuotojännite
$u$	jännitteen ohjearvo pulssinleveysmoduloinnissa
$u_p$	akun polarisaatiojännite
$u_t$	akun napajännite
$v$	nopeus
$W$	työ
$w$	vierintävastus
$x$	Reaktioyhtälöiden kerroin
$X_{\sigma 1}$	moottorin staattoripuolen hajareaktanssi
$X_{\sigma 2}$	moottorin staattoripuolelle redusoidun roottoripuolen hajareaktanssi
$y$	etäisyys
$z$	nosto- ja siirtokoneiston mekaanisia häviöitä aiheuttavien komponenttien lukumäärä
$Z_0$	magnetointi-impedanssi
$\omega$	kulmanopeus
$\eta'$	mekaaninen hyötysuhde
$\mu$	vierintävastuskerroin



# 1. JOHDANTO

Akkutekniikka on kehittynyt valtavasti viime vuosikymmenien aikana ja erityisesti litiumioniakkujen potentiaali on yleisesti tunnettua. Litiumioniakut edustavat kaupallistettujen akkutekniikoiden kärkeä teho- ja energiatihedeltään. Niitä käytetään laajalti monissa pienemmissä toimilaitteissa, ja ne ovat myös monien nykyaikaisten sähköautojen primäärienergiälähde. Yksittäisistä akkukennoista voidaan rakentaa erilaisiin tarpeisiin parhaiten soveltuva akusto.

Siltanosturi on teollisuudessa yleisesti käytetty laite, jota käytetään raskaiden kuormien nostamisessa ja siirtämisessä. Siltanostureiden nostokyvyt voivat nosturista riippuen yltää jopa satoihin tonneihin. Tässä työssä keskitytään tutkimaan nostokyvyltään 5000 kg kokoista siltanosturia. Siltanosturi tarvitsee toimiakseen sähköenergiaa, jonka siirtäminen rakennuksen sähköverkosta eripituisille etäisyyksille liikkuvalla siltanosturille voi tuottaa ongelmia.

Tässä diplomityössä on tarkoituksena tutkia litiumioniakkujen hyödyntämistä siltanosturin energiavarastona. Työn tarkoituksena on selvittää, millaisia tekijöitä vaadittavan akuston mitoittamisessa on otettava huomioon. Tutkittavaksi akkumateriaaliksi rajataan litiumioniakut, ja muiden akkutekniikoiden potentiaalia ei tässä työssä tarkastella. Litiumioniakuista selvitetään erityisesti turvallisuuteen ja käyttöikään vaikuttavia tekijöitä. Akuston kustannuksia ei työssä tarkastella. Voidakseen korvata perinteisen siltanosturin sähkönsyötön, on akuston oltava pitkäikäinen, mahdollisimman huoltovapaa sekä erityisesti mahdollisimman turvallinen ja luotettava. Siltanosturin liikkussa tehdasympäristössä katonrajassa siihen kohdistetaan huoltotoimenpiteitä harvoin. Siltanosturin sähkönsyöttö täytyy olla mahdollisimman toimintavarma, jotta nosturia käyttävien yritysten prosessit eivät keskeydy.

Työn tavoitteena on litiumioniakkujen teorian selvittämisen lisäksi rakentaa simulointiohjelma, jonka avulla erilaisten nosturien vaatimia akustoja voidaan mitoittaa. Mallinnuksessa on tarkoitus löytää pienin mahdollinen akuston koko eri tilanteisiin. Akuston ikääntymistä ei erikseen mallinneta, mutta turvallisuuteen ja ikääntymiseen vaikuttavat seikat otetaan mahdollisuuksien mukaan huomioon.

Luvussa 2 käsitellään litiumioniakkujen teoriaa ja luvussa 3 siltanosturin toimintaperiaate. Luvussa 4 keskitytään akkukäyttöisen siltanosturin mallintamisen toteutukseen. Luvussa 5 suoritetaan varsinainen mallinnus sekä analysoidaan siitä saatavat tulokset. Luvussa 6 tehdään tämän diplomityön yhteenveto.

## 2. LITIUMIONIAKKU

Termiä akku käytetään sekundäärisestä paristosta. Paristo tarkoittaa käsitteenä energia-lähdettä, jossa kemiallinen energia voidaan muuntaa suoraan sähköenergiaksi [1]. Paristot voidaan jakaa primäärisiin ja sekundäärisiin paristoihin. Molemmat pystyvät luovuttamaan energiaa, mutta sekundääriparistoja voidaan myös ladata useita kertoja uudelleen. Joillakin akkumateriaaleilla latauskertojen lukumäärä voi ylittää jopa tuhansiin. Juuri uudelleenlatauskyky tekee akuista moniin sovellutuksiin käyttökelpoisia energiavarastoja.

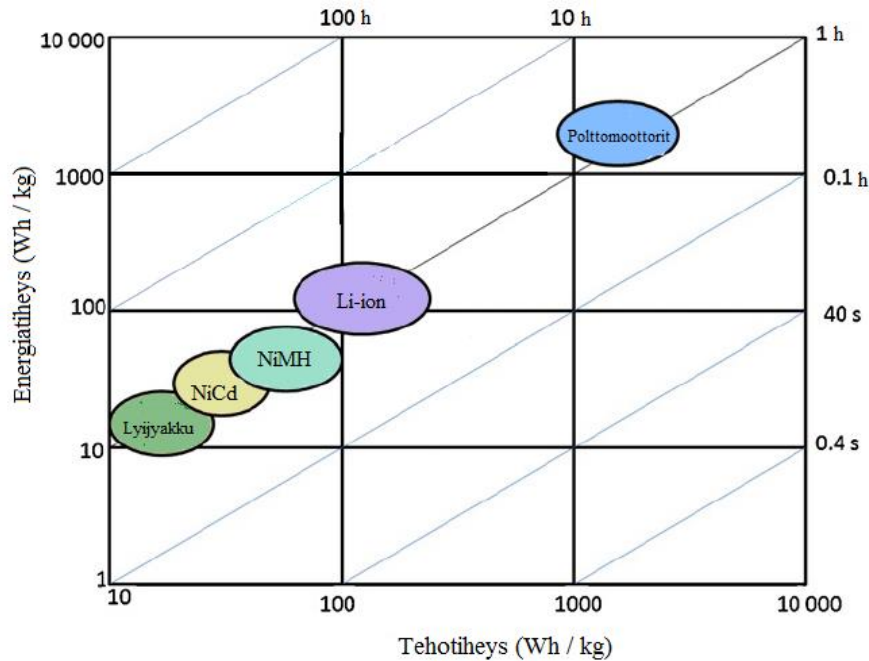
### 2.1 Akkutekniikan kehittyminen

Italialainen fyysikko Alessandro Volta (1745–1827) kehitti teoriaansa staattisen sähkön varastoimisesta 1700-luvun lopulla ja hänen vuonna 1799 keksimänsä Voltan patsas on ensimmäinen ihmisen kehittämä sähköenergiaa varastoiva kokonaisuus. Tämän Napoleonille vuonna 1800 esitellyn pariston esi-isän jälkeen on sähköenergian varastointia tutkittu jo yli kahden vuosisadan ajan. Voltan patsas kuin myös seuraavat soveltavat keksinnöt edustivat primääriparistoja. [2] Vuonna 1859 ranskalainen fyysikko Gaston Planté (1834–1889) kehitti lyijyhappoakun, joka oli ensimmäinen uudelleen ladattava paristo. Myös nykyiset, erityisesti autoteollisuudessa käytetyt 12 voltin lyijyakut pohjautuvat tähän Plantén keksintöön. [3]

Lyijyakun keksimisen jälkeen on esitelty lukuisia eri akkutyyppejä ja niiden variaatioita. Ensimmäisenä pääryhmänä lyijyakkujen keksimisen jälkeen kehitettiin nikkelikadmiumakku (NiCd), joka esiteltiin 1899. Nämä kaksi akkutyyppeä hallitsivat markkinoita koko 1900-luvun ja ovat edelleen käytössä monissa sovellutuksissa. 2000-luvulla erityisesti NiCd-akut ovat menettäneet markkinaosuuttaan, kun nikkelimetallihydridiakut (NiMH) ja litiumioniakut ovat tulleet saataville. Näiden kehitystyö alkoi toden teolla 1970-luvulla, ja ensimmäiset kaupalliset versiot tulivat markkinoille 1989 (NiMH) ja 1991 (litiumioniakku). [2,4]

Kuvassa 1 on esitetty Ragonen kuvaaja erilaisista energiavarastoista. Pystyakselilla on esitetty energiatiheys ja vaaka-akselilla tehotiheys kilogrammaa kohden. Diagonaalisesti olevilla viivoilla on kuvattu aika, jonka energiavarasto tarvitsee luovuttaakseen siihen sitoutuneen energian vaaka-akselin mukaisella vakioteholla. Edellä lueteltuja neljää kaupallistettua akkutekniikkaa tarkasteltaessa voidaan huomata, että litiumioniakut ovat energia- ja tehotiheydeltään edellä kilpailijoitaan. Kuvassa on esitetty vertailun vuoksi myös alue, jolla polttomoottorista ulos saatava teho- ja energia-alue yleisesti sijaitsee. Kuten kuvasta 1 huomataan, ei akkujen tarjoama teho/energia yllä vielä polttomoottorien

polttoaineiden tasolle. Yhä paranevat akkujen suorituskyvyt kuitenkin edistävät esimerkiksi sähköautojen asemaa polttomoottorikäyttöisten autojen haastajana.



**Kuva 1** Ragonen kuvaaja energia- ja tehotehyydelle. Muokattu lähteestä [5].

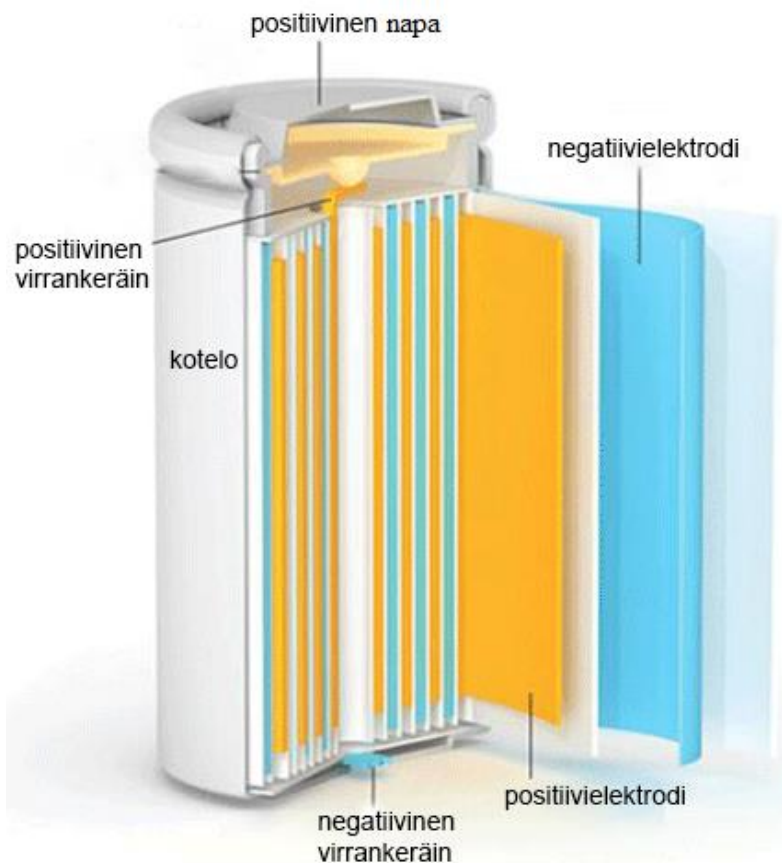
NiCd-, NiMH- ja lyijyakut häviävät vertailussa litiumioniakuille monessa eri ominaisuudessa. Energia- ja tehotehyyys, itsepurkautuvuus käyttämättömänä sekä käyttöikä ovat esimerkkejä tekijöistä, jotka voidaan lukea selvästi litiumioniakun eduksi muihin kaupallistettuihin tekniikkoihin verrattuna. Lisäksi litiumioniakuilla ei ole niin sanottua muistiominaisuutta, joka varsinkin NiCd-akulla pienentää akun kapasiteettia ja täten heikentää merkittävästi akun käytettävyyttä. [6] Tässä diplomityössä rajataan tutkimuskohteeksi litiumioniakkujen hyödynnettävyys siltanosturikäytön primäärienergiälähteenä, joten muut akkutekniikat jätetään tarkemmin tarkastelematta. Seuraavissa alaluvuissa keskitytään litiumioniakun ominaisuuksiin ja toimintaperiaatteisiin. Nosturin vaatima energiamäärä on sen verran suuri, että yksittäinen akkukenno ei pysty tarvittavaa energiaa tuottamaan. Puhuttaessa akustosta tarkoitetaan akkukennoista rinnan- ja sarjaankytkentöjen avulla muodostettua akkupakettia.

## 2.2 Litiumioniakkujen rakenne ja toimintaperiaate

Akkuihin liittyen on laadittu standardeja, jotta alan toimintatavat olisivat yhtenäisiä. Standardointi auttaa myös vertailemaan eri valmistajien toimittamia akkuja keskenään, kun akkujen ominaisuudet on määriteltävä saman standardin mukaan. Alalla on useita standardointiorganisaatioita, joista yksi merkittävimmistä on IEC (eng. International Electrotechnical Commission). Muitakin standardointijärjestöjä on olemassa. Tämä voi aiheuttaa

hankaluuksia vertailtaessa akkujen soveltuvuutta samankaltaiseen käyttötarkoitukseen, sillä järjestöjen standardit eivät ole kaikilta osin yhteneviä.

Markkinoilla olevien akkujen koko vaihtelee paljon paitsi sähköisten ominaisuuksien myös fyysisten mittojen osalta, vaikka standardoinnilla on pyritty yhdenmukaistamaan tarjolla olevia akkumalleja. Fyysisiltä mitoiltaan samanlainen akku ei välttämättä vastaa teknisiltä ominaisuuksiltaan toista kooltaan identtistä akkua, vaan esimerkiksi akun kapasiteetti voi vaihdella akkumateriaalista ja valmistajasta riippuen. Yksi nykyajan yleisimmistä litiumioniakkujen fyysisistä malleista on sylinterimuotoinen 18650-akku. 18650-sarjan akkujen nimi tulee sylinterin ulkomitoista, jossa 18 identifioi halkaisijaa ja 65,0 korkeutta millimetreinä. Todelliset tarkat mitat voivat hieman varioida standardin mukaisista arvoista. Kyseistä akkutyypin käytetään esimerkiksi Teslan sähköautoissa ja monissa kannettavissa tietokoneissa. [6] Kuvassa 2 on esitetty kyseisen akkutyypin poikkileikkauskuva.



**Kuva 2 Sylinterimallisen 18650-akun rakenne. Muokattu lähteestä [7].**

Akun pääkomponentit ovat elektrolyytti sekä positiivinen ja negatiivinen elektrodi. Elektrodeja kutsutaan kirjallisuudessa yleisesti katodiksi ja anodiksi, mutta tässä työssä elektrodeista käytetään termejä positiivielektrodi ja negatiivielektrodi vastaavassa järjestyksessä. Akkuun varastoidun kemiallisen energian muuntuminen sähköiseksi energiaksi ja

sitä kautta sähkövirran syntyminen perustuu elektrodeilla tapahtuviin hapetus-pelkistysreaktioihin. Kemiallisten reaktioiden määritelmän mukaisesti elektrodi, jossa tapahtuu hapetusreaktio, kutsutaan anodiksi. Vastaavasti elektrodi, jossa tapahtuu pelkistysreaktio, kutsutaan katodiksi. Kun anodilla tapahtuu hapetusreaktio, on myös katodilla tapahtuva päinvastainen pelkistysreaktio, jotta järjestelmän sähköinen neutraalisuus säilyy. [8] Litiumioniakussa hapetusreaktiossa litium  $Li$  eroaa elektroniksi  $e^-$  sekä positiivisesti varautuneeksi litiumioniksi  $Li^+$ . Pelkistysreaktiossa edellä mainitut varauksenkuljettajat yhtyvät varaukseltaan neutraaliksi litiumatomiksi.

Elektrodi rakentuu aktiivisista ja tukevista materiaaleista. Tukimateriaalien tehtävä on parantaa elektrodin johtavuuskykyä sekä tarjota rakenteellista tukea. Elektrodien pinnalla olevat virrankeräimet toimivat elektronien kulkutien mahdollistajana elektrodin navoilta sen aktiivisille materiaaleille. Aktiivimateriaalit osallistuvat akussa tapahtuviin kemiallisiin reaktioihin, jotka mahdollistavat sähköisen energian muuntamisen kemialliseksi energiaksi ja päinvastoin. [9]

Elektrodimateriaalit ovat huokoisia hilamaisia rakenteita, joissa elektrodeissa olevat atomit ovat järjestäytyneet säännönmukaisesti. Litiumioniakussa litiumionit siirtyvät akkua ladattaessa tai purettaessa elektrodilta toiselle ja asettuvat hilamaisessa rakenteessa esiintyviin väleihin ilman, että kiinnittyvät tiukasti ympäröivään elektrodiin. Tätä kemiallista reaktiota kutsutaan interkalaatioksi [2]. Interkalaatiossa ionin ja elektrodin välille ei muodostu kovalenttista sidosta, mikä mahdollistaa ionien vapaamman liikkumisen akussa. Litiumioniakkujen kyky varastoida suhteellisen suurta määrää energiaa on perustunut litiumioniakkujen tutkimuksen alkuajoista 1970-luvulta lähtien yhä tähän päivään asti interkalaation hyödyntämiseen. [2]

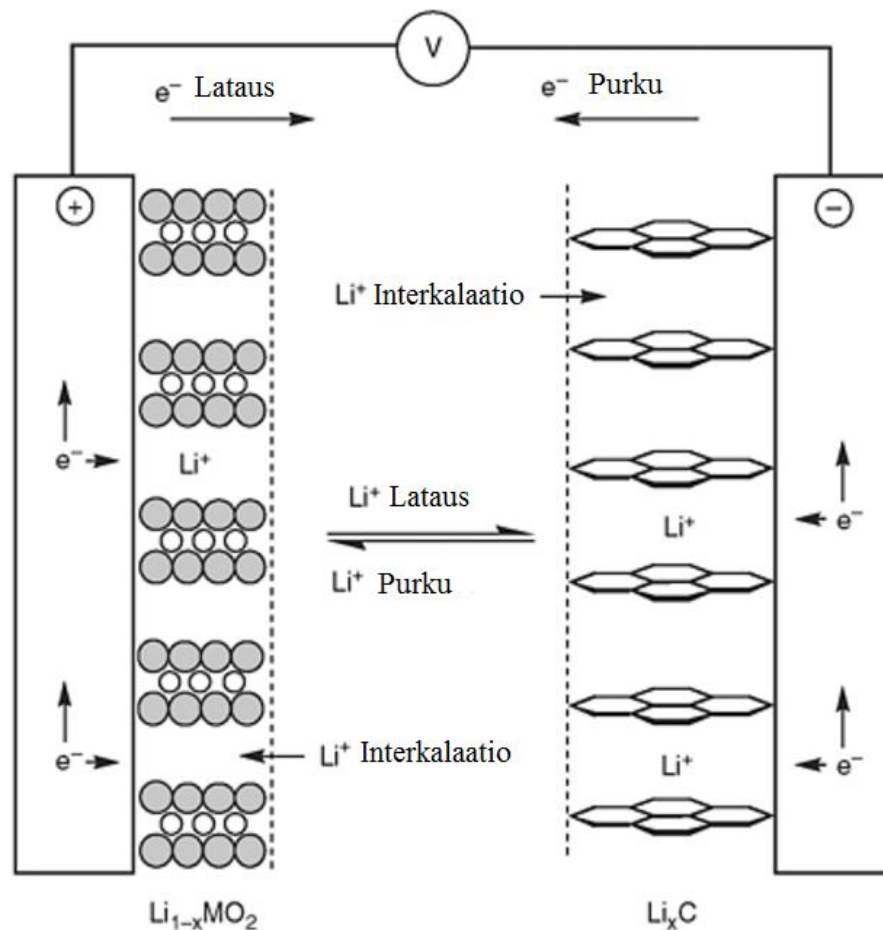
Litiumionin irtoaminen rakenteesta ei saa vaikuttaa merkittävästi elektrodin hilarakenteeseen, jotta akun lataus- ja purkutapahtumien kokonaismäärä pysyy mahdollisimman suurena. Elektrodimateriaalit eivät saa myöskään liueta elektrolyyttiin, ainoastaan reaktiotuotteena syntyvä positiivisesti varautunut litiumioni siirtyy elektrolyyttiin.

### 2.2.1 Akun toimintaperiaate

Akussa on elektrolyyttiin upotettuna positiivinen ja negatiivinen elektrodi. Elektrolyytti mahdollistaa ionien kulkeutumisen elektrodilta toiselle huokoista materiaalia olevan separaattorin läpi. Separaattorin tehtävänä on erottaa elektrodit toisistaan ja täten ehkäistä sisäinen oikosulku. Vaikka separaattori on huokoista materiaalia, toimii se samalla sähköisenä eristeenä ja ehkäisee elektronien kulkeutumisen itsensä läpi tarjoten kulkutien ainoastaan litiumioneille. Akun elektrodien navat voidaan yhdistää kuorman tai latauslaitteen kautta, jolloin sähköinen virtapiiri täydentyy ja elektroneille tarjoutuu kulkutie. Jos elektrodeja ei ole yhdistetty toisiinsa ulkoisen johtimen kautta, ei elektrodeilla ta-

pahdu hapetus-pelkistysreaktioita, Tällöin myöskään litiumioneilla ei ole merkittävää liikettä, jolloin akun varaustilanne ei käyttämättömänä juurikaan muutu. Litiumioniakulla onkin hyvin pieni itsepurkautuvuus verrattuna muihin akkutekniikoihin. [6,8]

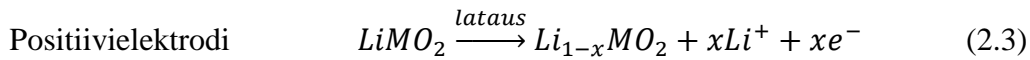
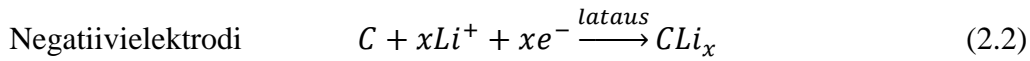
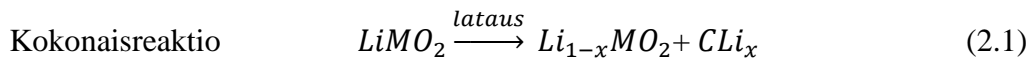
Elektrolyytti on litiumioniakuissa yleensä nestemäinen suola, jolla on hyvä sähkönjohtavuuskyky. Esimerkkinä voidaan mainita yksi yleisimmistä elektrolyyttimateriaaleista litiumheksafluorifosfaatti ( $\text{LiPF}_6$ ). Sillä on hyvä johtavuus ja ionien siirtokyky. Se ei ole myöskään herkkä reagoimaan elektrodimateriaalien kanssa. Erityisesti uudemmissa litiumioniakkutekniikoissa on käytetty geelimäistä elektrolyyttiä. Tällaista akkua kutsutaan yleisesti litiumpolymeeriakuksi ( $\text{LiPo}$ ).  $\text{LiPo}$ -akussa ei ole erikseen separaattoria, vaan hienojakoinen geeli mahdollistaa litiumionien kulkeutumisen elektrodilta toiselle estäen samalla elektronien kulkeutumisen itsensä läpi. [6] Litiumioniakun toimintaa lataus- ja purkutilanteissa on havainnollistettu kuvassa 3 yksittäisen akkukennon avulla.



**Kuva 3 Litiumioniakun toimintaperiaate. Muokattu lähteestä [8].**

Alla on esitetty yhtälöissä (2.1-2.3) esimerkin kautta litiumioniakussa tapahtuvien hapetus-pelkistysreaktioiden reaktioyhtälöt.  $M$  merkitsee jotain metallia tai metallikombinaatiota, jota litiumioniakun positiivielektrodimateriaalissa käytetään. Reaktioyhtälöiden

suunta on akkua ladattaessa oikealle. Kun akun varausta puretaan eli akun halutaan luovuttavan energiaa, tapahtuvat reaktiot päinvastaiseen suuntaan eli lukusuunnassa vasemmalle.



Yhtälöissä (2.1-2.3) käytetyt merkinnät:

Li	Litium
Li <sup>+</sup>	Positiivisesti varautunut litiumioni
e <sup>-</sup>	elektroni
M	Metalli tai metallikombinaatio
O <sub>2</sub>	Oksidi
C	Hiili
x	kerroin

Akkua ladattaessa elektrodit kytketään napojensa avulla ulkoiseen latauslaitteeseen. Positiivielektrodille pakkautuneet elektronit suuntaavat latauslaitteen läpi negatiivielektrodille ulkoista johdinta pitkin, jossa ne pelkistyvät elektrolyytin kautta saapuvien litiumionien kanssa. Kun kaikki positiivielektrodilla hapettuneet litiumionit ovat pelkistyneet negatiivielektrodilla, ei akussa enää tapahdu reaktioita ja akku on siten täyteen ladattu.

Jos akun elektrodit kytketään napojensa kautta ulkoiseen kuormaan kiinni, aloittaa akku energian luovuttamisen, jolloin kuorma vastaanottaa tarvitsemansa sähköenergian. Kuorman havaitsema sähkövirta on negatiivisesti varautuneiden elektronien liikehdintää negatiivielektrodilta positiivielektrodille. Negatiivielektrodilla tapahtuu hapetusreaktio, jolloin esimerkkireaktioyhtälöiden yhtälön (2.2) mukaisesti reaktiotuotteena vapautuu sama määrä litiumioneja ja elektroneja. Litiumioni siirtyy elektrolyytin läpi positiivielektrodille, jossa se pelkistyy ulkoista johdinta pitkin kulkeutuvan elektronin kanssa yhtälön (2.3) mukaisesti.

Elektrodimateriaalin kidehilan tulisi olla sellainen, että se pystyy vastaanottamaan mahdollisimman suuren määrän litiumioneja hilarakenteensa väleihin, sillä akun kapasiteetti on suoraan verrannollinen reaktioihin osallistuvan litiumin määrään. Elektrodille voidaan myös määritellä litiumin täyttöaste, eli kuinka paljon litiumia elektrodilla on suhteessa maksimimäärään [9].

Akkukennossa molemmilla elektrodeilla on toisistaan eroava sähköstaattinen potentiaali, jonka suuruudessa merkittävimmät tekijät ovat elektrodimateriaali sekä litiumin täyttöaste elektrodilla. Positiivielektrodilla on yleensä huomattavasti korkeampi potentiaali kuin negatiivielektrodilla. Elektrodien potentiaalien ollessa erisuuria on niiden välillä potentiaaliero, joka määrittää akkukennon avoimen piirin jännitteen. Täyteen ladatussa akussa litiumionit ovat pakkautuneet negatiivielektrodille ja potentiaaliero elektrodien välillä on suurimmillaan. Yksittäisessä kennossa potentiaaliero voi olla tällöin yli 4 V, jos negatiivielektrodimateriaalina on grafiitti. Kun akkua kuormitetaan, alkaa litiumionien siirtyminen positiivielektrodille, mikä tasoittaa potentiaaliero ja siten laskee kennon jännitettä. Kun elektrodien väliseen potentiaalieroon otetaan huomioon muiden komponenttien aiheuttamat jännitehäviöt, saadaan elektrodeihin kytkettyjen napojen väliltä mitattua niiden potentiaaliero eli akun napajännite.

### 2.2.2 Litiumioniakkujen elektrodimateriaalit

Litium soveltuu hyvin akkumateriaaliksi kemiallisten ominaisuuksiensa takia. Se on painoltaan kevyt sekä metallien jännitesarjan mukaisesti epäjaloin eli metalleista paras pelkistin. Litium on herkkä osallistumaan kemiallisiin reaktioihin. Akun toiminnan kannalta on oleellista, että litium esiintyy akussa ionimuodossa, eikä metalloidu purku- ja lataustapahtumien aikana. Metalloitunut litium ei enää osallistu reaktioihin, mikä laskee akun käytettävissä olevaa kapasiteettia. Ionimuotoinen litium puolestaan pystyy liikkumaan elektrodien välillä, kuten edellisessä luvussa esitettiin.

Litiumioniakkujen valmistajat erottelevat valikoimissaan usein toisistaan niin sanotut tehoakut ja energia-akut. Tehoakuissa pyritään maksimoimaan hetkellinen ulostuloteho mahdollisimman suureksi. Tehoakuilla akun sisältämä energiamäärä ei ole niin merkittävä tekijä. Vastaavasti energia-akuissa tehon suuruus ei ole merkittävä, vaan niissä pyritään maksimoimaan akkuun varautunut energia ja täten varmistamaan akun pitkäaikainen käyttö latauskertojen välillä. Mitä vaativampiin sovellutuksiin mennään, sitä enemmän pyritään optimoimaan sekä teho- että energiaominaisuudet mahdollisimman hyväiksi.

Taulukossa 1 on esitetty eräs vertailu eri elektrodimateriaalien eroista akun ominaisuuksissa. Kuten taulukosta 1 nähdään, vaihtelevat eri akkukemioiden ominaisuudet suhteessa toisiinsa, ja oikean akun valinta sovellutukseen on monipuolinen mitoitustehtävä. Yksittäisen akun arvot voivat vaihdella valmistajasta riippuen taulukon 1 arvoista, mutta taulukosta saa käsityksen eri akkukemioiden suhteesta toisiinsa nähden.



**Taulukko 1 Litiumioniakkujen ominaisuuksia [6]**

Akku	LCO	LMO	LNMC	LFP	LNCA	LTO
Jännite (V)	3,60	3,75	3,65	3,25	3,60	2,40
Energia- tiheys (Wh/kg)	150-200	100-150	150-220	90-120	200-260	70-80
Latausvirta (C-arvo)	0,7-1,0	0,7-1,0	0,7-1,0	1,0	0,7	1
Purkuvirta (C-arvo)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	10
Käyttökertojen Lukumäärä	500- 1000	300-700	1000- 2000	1000- 2000	500	3000- 7000

Erilaisia elektrodimateriaaleja on vuosikymmenten saatossa kehitetty useita. Akun nimi litiumioniakuissa kuvaa yleensä positiivielektrodissa käytettävää materiaalia. Positiivielektrodi on litiumioniakuissa metallioksidia tai -fosfaattia, joihin on lisätty litiumioneja. Negatiivielektrodi on nykypäivänä useimmiten grafiittia. Tämä pätee taulukon 1 ensimmäiseen 5 akkukemiaan. Poikkeuksen tekee taulukon viimeisessä sarakkeessa esitetty litiumtitanaattioksidi (LTO), jolloin akku myös nimetään sen mukaan. LTO-akulla positiivielektrodina toimii jokin tavallisista, taulukossa 1 esitetyistä positiivielektrodimateriaaleista. Selvimmin LTO-akun ero muihin akkukemioihin näkyy akun tuottamasta jännitteestä, sillä LTO-akulla nimellisyännite on tyypillisesti 2,4 V, kun muilla litiumioniakuilla jännite vaihtelee 3,5 V molemmin puolin. Jos LTO:n positiivielektrodina on litiumrauta-fosfaatti (LFP), on akun nimellisyännite alle 2V. [10] Matalamman napajännitteen takia akustoa rakennettaessa LTO-akkukemioita pitää kytkeä sarjaan noin 1,5-kertainen määrä verrattuna muihin akkukemioihin saman jännitetason saavuttamiseksi. Vastaavasti LTO-akusta ulos saatava purkuvirta sekä käyttökertojen lukumäärä on selvästi muita tekniikoita korkeampi.

Litiumioniakuilla, joilla negatiivielektrodina toimii grafiitti, muodostuu ensimmäisellä tai ensimmäisillä latauskerroilla negatiivielektrodin pinnalle suojakerros, josta käytetään termiä SEI (eng., solid-electrolyte interphase). SEI:n tehtävänä on päästää litiumionit itsensä läpi grafiitille, mutta samalla suojata grafiittia peruuttamattomilta kemiallisilta reaktioilta, jotka tekisivät akusta käyttökelvottoman. Muiden elektrodimateriaalien ja elektrolyytin välille ei SEI-kerrosta merkittävässä määrin muodostu. Normaaliolosuhteissa nämä elektrodit ja elektrolyytti eivät myöskään reagoi. [6,11]

Elektrodimateriaaliparit määrittävät akkujen ominaisuudet. Tärkeimpiä ominaisuuksia ovat akun energia, napajännite, lataus- ja purkuvirtojen arvot, käyttökertojen lukumäärä sekä lämpötila-alueet, joilla akkua suositellaan käytettävän. Erityisesti mainittakoon akun kapasiteetti, joka kerrotaan datalehdillä ampeeritunteina (Ah). Lataus- ja purkuvirtojen

arvot kerrotaan usein niin sanottuna C-arvona (eng. C-rate), joka kuvaa sallitun virran arvoa suhteessa maksimikapasiteettiin. 1 C:n suuruinen virran arvo on määritetty sellaiseksi, että täyden akun varaus saadaan purettua täysin yhden tunnin kuluessa. Esimerkiksi kapasiteetiltaan 20 Ah:n kokoiselle akulle tämä tarkoittaisi 20 A:n suuruista virtaa. Purettaessa 2 C:n arvolla virran suuruus vastaavalle akulle olisi 40 A ja purkuaika puoli tuntia.

### 2.3 Akkujen lataustekniikka ja kunnonvalvonta

Sekä latausmenetelmiin että kunnonvalvontaan liittyy oleellisena akkujen mallintaminen, jonka pohjalta niihin liittyvät järjestelmät voidaan suunnitella. Akku on ominaisuuksiensa takia toiminnaltaan epälineaarinen komponentti, joten sen käyttäytymisen täydellinen mallintaminen on haastavaa. Mitä tarkemmin lataustapahtuma tai kunnonvalvonta halutaan optimoida, sitä tarkemmin myös akun toiminta pitää onnistua mallintamaan. Akkuja voidaan mallintaa sekä sähkökemiallisten mallien, piiriteoriomallien että matemaattisten mallien avulla [12]. Kaikki lähestymistavat hyödyntävät akusta mitattavien suureiden, kuten jännitteen, virran ja lämpötilan arvoja. Sähkökemiallisten mallien avulla päästään tarkempaan mallinnukseen, sillä ne ottavat useimmiten huomioon useampia muuttuvia tekijöitä. Todella tarkkaan mallinnukseen päästäkseen täytyy kuitenkin ottaa huomioon erittäin suuri joukko muuttujia, mikä vaatii mallintavalta järjestelmältä paljon laskentatehoa kokonaisvaikutuksien huomioimiseksi. Piiriteoriomallien ja matemaattisten mallien avulla pyritään mallintamaan akkuja yksinkertaistetussa muodossa. Ne antavat pääsääntöisesti riittävän tarkan arvion akun toiminnasta, ja ne ovat useimmiten kaupallisessa käytössä olevien laitteiden toiminnan suunnittelun taustalla. Esimerkiksi seuraavassa luvussa esiteltävät CC- ja CC/CV-latausmenetelmät pohjautuvat usein yksinkertaiseen akkumalliin.

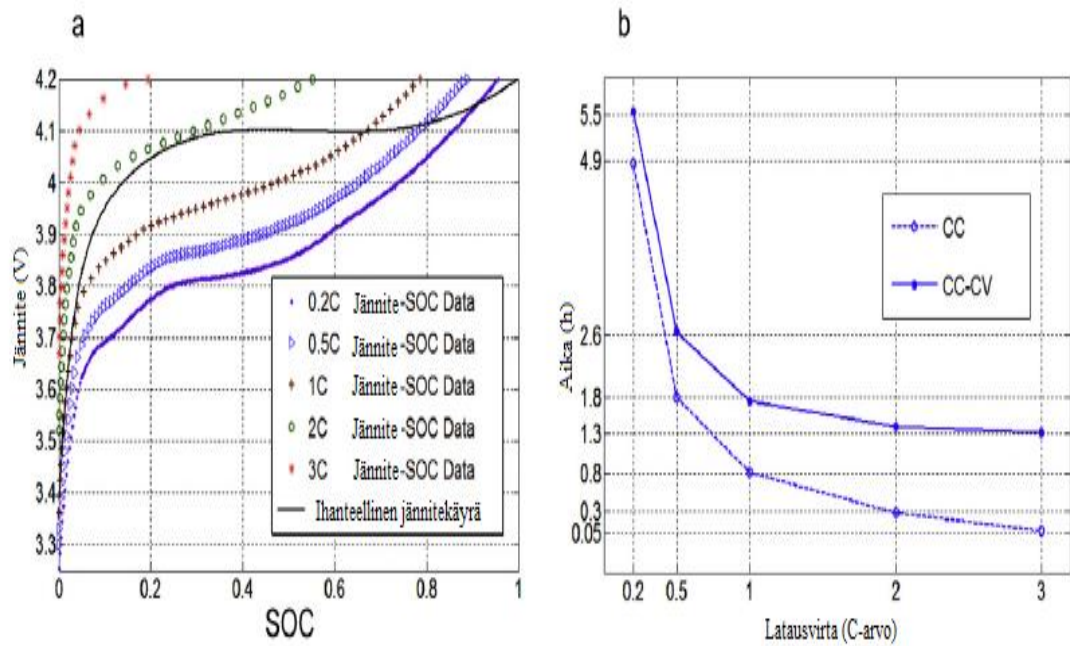
Erilaisia malleja, jotka ottavat eri tarkkuudella akun ominaisuuksia huomioon, on lukuisia. Hu et al. ovat tehneet vertailututkimuksen [12] kahdentoista erilaisen piiriteoriomallin soveltumisesta akkujen mallintamiseen. Vertailututkimuksessa käytettiin kahta eri litiumioniakkukemialla, joiden käyttäytymistä tutkittiin kolmessa eri lämpötilassa. Jokaisen piiriteoriomallin osalta tarkasteltiin, kuinka hyvin ne pystyvät kuvaamaan akun todellista käyttäytymistä eri olosuhteissa. Kummallekin tutkitulle akkukemialle löydettiin erikseen parhaiten niiden toimintaa kuvaava malli. Tutkimus myös osoitti, että teoreettisesti tarkemmin toimintaa kuvaava malli ei välttämättä anna merkittävästi parempaa tarkkuutta suhteessa mallin kompleksisuuteen. Valittaessa käytännön toimilaitteiden suunniteluun soveltuvaa mallia joudutaan usein ottamaan huomioon tarkkuudesta saatavat hyödyt ja mallin kompleksisuudesta koituvat haitat. Liian monimutkaiset mallit voivat aiheuttaa ongelmia järjestelmän suunnittelun ja kustannusten osalta.

### 2.3.1 Akkujen lataustekniikka

Akkuja ladataan kytkemällä akku ulkoiseen sähkövarausta luovuttavaan laitteeseen. Tällöin positiivielektrodilla tapahtuvassa reaktiossa vapautuvien elektronien ja positiivisesti varautuneiden litiumionien suunta on kohti negatiivielektrodia. Latauksen optimointi on erityisen tärkeää esimerkiksi sähköajoneuvoissa, joiden toimintaedellytyksen kannalta lataustapahtumalla on merkittävä rooli. Ajoneuvon akuston lataus pitää tapahtua mahdollisimman nopeasti auton käyttöajan maksimoimiseksi.

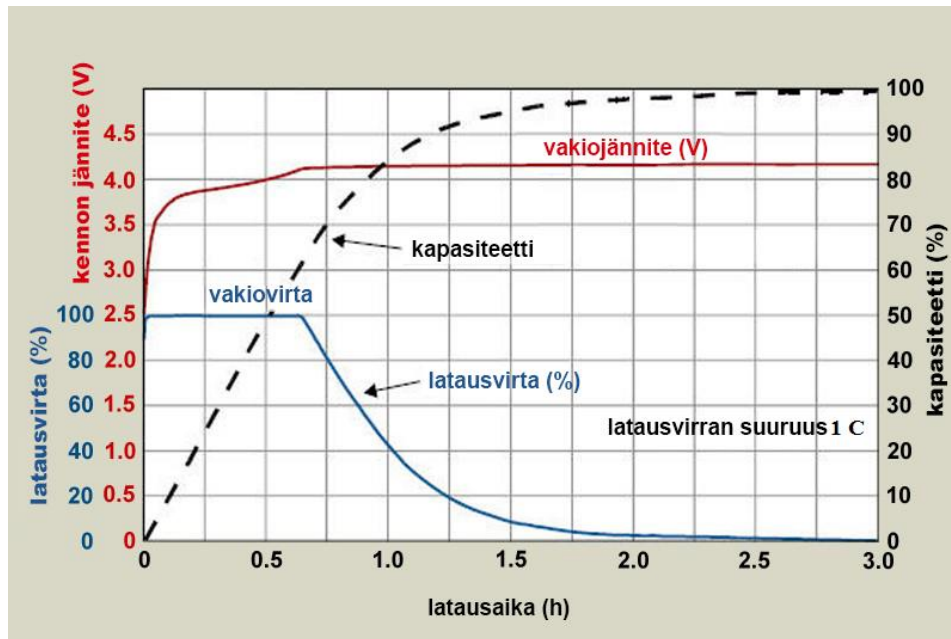
Lataustapahtuman pitäisi vaikuttaa mahdollisimman vähän akun rakenteeseen ja sitä kautta akun ikääntymiseen, mikä yleensä tarkoittaa käytettävissä olevan kapasiteetin laskua. Lataustapahtuman pitäisi olla mahdollisimman nopea, mutta toisaalta luotettava ja turvallinen. Akkujen lataamiseen on kehitetty useita eri menetelmiä. Mitä optimoidumpi latausmenetelmä on akun latautumisen kannalta, sitä monimutkaisempi järjestelmä lataustapahtuman ohjaamiseen tarvitaan. Monimutkaisemmat järjestelmät vaativat useampia komponentteja ja vaativampaa ohjelmistoa, jolloin kustannukset kasvavat, mikä on haasteena niiden kaupallistumiselle. [13,14]

Yksinkertaisin tapa ladata akkua on kytkeä se latauslaitteeseen, joka syöttää akkua jollakin vakiovirran arvolla, kunnes akku saavuttaa halutun jännitteen. Menetelmä tunnetaan termillä CC (eng. Constant current, vakiovirta). Sitä käytettäessä akun ominaisuuksien tuntemus on välttämätöntä, jotta akun kapasiteetti saadaan halutulla tavalla maksimaalisesti hyödynnettyä. Alla olevassa kuvassa on selvennetty latausvirran suuruuden vaikutusta, jos käytössä on vakiovirtalataus. Kuten kuvasta 4 nähdään, pienenee latausaika sitä mukaan, mitä suuremmalla virralla akkua ladataan. Toisaalta kuvasta 4 voidaan huomata, että vaikka nopealla latauksella saavutetaan akun ylin jännitetaso nopeasti, niin akun varaustaso jää huomattavan alhaiseksi verrattuna teoreettiseen maksimiin. Akuille ilmoitetaan suurin suositeltu latausvirta, jotta akun ominaisuudet eivät merkittävästi heikkene. Kun haetaan nopeamman lataustapahtuman ja suuremman varaustason välistä kompromissia, joudutaan lataus suorittamaan monimutkaisemmilla tekniikoilla.



**Kuva 4** Latausvirran arvon merkitys. a) Jännitteen ja akun varaustason yhteys latausvirran avulla esitettynä. b) Lataustapahtuman kesto eri virran arvoilla. Muokattu lähteestä [13].

Litiumioniakkujen latauslaitteiden yleisin toimintatapa nykyisissä kaupallisissa laturiratkaisuissa on CC/CV-menetelmä (eng. Constant current/constant voltage), jossa akkua ladataan ensin halutulla vakiovirralla, kunnes akun jännite on saavuttanut halutun tason. Kun kyseinen jännitetaso on saavutettu, suoritetaan loppulataus pitämällä akkua vakiojännitteessä (CV). Kun jännite pidetään vakiona, pienenee virta samanaikaisesti, kunnes akku saavuttaa halutun varaustason. Lataus lopetetaan, kun vakiojännitteellä on ladattu haluttu aika, tai kun latausvirta on laskenut alle sovitun rajan. Kuvassa 5 on havainnollistettu tämän lataustekniikan toimintaa. Kuva selventää lataustekniikan perusideaa, jossa akku latautuu, vaikka jännite onkin jo saavuttanut sovitun ylärajan.



**Kuva 5 CC/CV-latausmenetelmä. Muokattu lähteestä [15].**

CC/CV-menetelmä on yleisimpiä lataustekniikoita, sillä verrattuna vakiovirtamenetelmään sillä voidaan optimoida latausnopeutta ja varaustason nostoa huomattavasti paremmin. CC/CV on tekniikaltaan yksinkertaisesti toteutettavissa ja siten kustannuksiltaan edullinen, joten se on laajasti käytetty latausmenetelmä litiumioniakkujen latureissa. CC/CV-tekniikan yksinkertaisuus asettaa myös rajoitteita. Mitä pienemmällä vakiovirralla akkua ensin ladataan, sitä kauemmin kestää, että akku saavuttaa määritetyn jännite-ajan, joka pidentää kokonaislatausaikaa. Korkea virta nostaa akun lämpötilaa, mikä heikentää latauksen hyötysuhdetta lämpöhäviöiden myötä. Korkea virta myös rasittaa akun mekaanista rakennetta, joka nopeuttaa ikääntymistä kapasiteetin laskun myötä. Koska CC/CV-tekniikassa virta määritetään ennalta johonkin vakioarvoon, valitaan se yleensä melko pieneksi, jottei korkea latausvirta turhaan heikentäisi akkua. [16]

CC- ja CC/CV-menetelmät ovat yksinkertaisia ja kustannuksiltaan edullisia toteuttaa, mutta samalla ne ovat kaukana ideaalisesta lataustapahtumasta. Akusta riippuen voidaan pyrkiä löytämään optimaalinen vakiovirran arvo, jotta kokonaislatausaika CC/CV-menetelmällä jäisi mahdollisimman lyhyeksi. Teoreettisesti optimaalisin CC/CV-menetelmän latausaika kestää kuitenkin huomattavasti kauemmin kuin edistyneemmät, erilaisia tekniikoita yhdistelevät latausmenetelmät. [16]

Vaihtoehtona perinteisille menetelmille on luotu useita tekniikoita, joissa on pyritty kehittämään lataustapahtumaa paremmin litiumioniakulle soveltuvaksi. Optimointiin pyrkivät ratkaisut pyrkivät usein hyödyntämään muuttuvaa virran arvoa koko lataustapahtuman ajan. Virta voi olla joko etukäteen määritetty askelmaisesti muuttuvaksi, tai se voi tarkkailla latauksen aikana akusta saatavia mittasuureita. Tällöin latauslaite voi toimia mittaustulosten perusteella ennalta määritellyn algoritmin mukaisesti. Kun akkua lada-

taan, ionien ja elektronien liike-energia aiheuttaa lämpötilan nousua. Yksi vaihtoehto latauksen optimointiin on lämpötilatarkkailuun perustuva lataustapa: virtaa kasvatetaan ja suurennetaan sen mukaan, miten akun lämpötila käyttäytyy lataustapahtuman yhteydessä. Täten saadaan kasvatettua hyötysuhdetta sekä nopeutettua latausaikaa, sillä akulle saadaan syötettyä jatkuvasti sen hetkiseen tilanteeseen soveltuva maksimivirta. Kuten aikaisemmin todettiin, optimaalisten latausmenetelmien käyttöä käytännön sovellutuksissa hankaloittaa niiden monimutkaisuus ja sitä kautta kustannusten nousu. [16, 17]

### 2.3.2 Kunnonvalvonta

Litiumioniakku täytyy käytännössä aina varustaa erillisellä suojauspiirillä, johon kuuluu osana kunnonvalvontayksikkö, jonka yleinen lyhenne on BMS (eng., Battery Management System). Kunnonvalvontayksikön tehtävänä on huolehtia lataus- ja purkuvaiheessa akun luotettavasta ja turvallisesta toiminnasta. Se tarkkailee akusta erilaisia parametreja ja tarvittaessa kytkee akun turvallisesti irti muusta järjestelmästä. BMS:n tehtävänä on myös huolehtia akun kennojen tasapainotuksesta sekä lämpötilanvalvonnasta. Akustossa on monesti sarjaan kytkettynä useampi akkukenno, ja sarjaankytkennän heikoin lenkki vaikuttaa koko järjestelmän toimintaan. Tasapainottamalla näitä eroja voidaan välttää monia vaaratilanteita ja pidentää akuston käyttöikä. [9]

BMS toimii sen mukaan, millaiset toimintaparametrit sille asetetaan eli miten se on ohjelmoitu toimimaan. Ohjelmointi riippuu mallista, jota on käytetty suunnittelun apuna. Kuten aiemmin todettiin, erilaisia malleja on kehitelty useita, mutta kaupallisissa sovellutuksissa matemaattiset mallit ja piiriteoriomallit ovat yleisimpiä. Ne pystyvät kuvaamaan staattisessa tilassa olevaa akkua hyvin. Kun akkua kuormitetaan ja sitä myöten akun tila vaihtelee, muuttuu parametrien laskenta ja mallintaminen huomattavasti hankalammaksi. Tällöin myös mallinnuksen aiheuttamat virheet kasvavat. Litiumioniakku tarvitsee toimintansa tueksi turvallisen ja luotettavan BMS:n. Matemaattisten tai piiriteoriomallin pohjalta suunnitellut BMS:t eivät sovellu vaativampaan käyttöön, vaan niissä hyödynnetään sähkökemiallisten mallien pohjalta rakennettuja ohjelmistoja. [9] Sopivan BMS:n valinta akkutyypistä ja käyttötarkoituksesta riippuen on tärkeää. Hyvä suunnittelu pidentää käyttöikä, sillä akun ominaisuudet muuttuvat ajan kuluessa. BMS:n pitää pystyä tukemaan akun toimintaa koko akun käyttöajan ajan. Liian yksinkertaisen mallin pohjalta suunniteltu BMS ei välttämättä pysty mallintamaan akkua sen ikäännyttyä oikein, mikä voi tarpeettomasti lyhentää elinikää.

BMS:n tehtävänä on myös tarkkailla akun varaustasoa käytön aikana. Varaustasosta käytetään termiä SOC (eng. State-of-charge). Suoraan varaustasoa ei voi määrittää, vaan sitä pitää estimoida mitattavien suureiden ja valitun mallin avulla. Varaustilaan vaikuttavat sekä akun ikä, sen kokema virta että akussa tapahtuvat lämpötilavaihtelut. Näillä kaikilla on vaikutus akun kemiallisiin ominaisuuksiin ja sitä kautta sähköenergian varastointikykyyn. Ampeerituntilaskentaan perustuva menetelmä on varaustason määrittämisestä yleisin. Sen toiminta perustuu purku- tai latausvirran mittaamiseen yhtälön (2.4)

mukaisesti. Integroimalla mitattu virta ajan funktiona voidaan laskea siirtynyt varaus, jonka avulla voidaan varaustaso estimoida yhtälön (2.5) mukaan. Ampeerituntilaskennan pohjalta on kehitetty tarkempia laskentamalleja, joissa pyritään takaisinkytkettyjen mitauksien erosuureiden avulla ottamaan mittausvirheet huomioon. Kuten jo aiemmin todettua, käyttäytymiseltään epälineaariset akut aiheuttavat mallinnuksessa haasteita, sillä tarkempi mallinnus vaatii toimiakseen monimutkaisempaa mittaus- ja laskentajärjestelmää. Tämä pätee myös varaustason määrittelyssä. Monta eri muuttujaa huomioon ottavat järjestelmät joutuvat suorittamaan useita laskutapahtumia. Pienetkin mittausvirheet voivat tuottaa haasteita kokonaislaskentanopeudelle ja virhetarkkuudelle. [18]

$$Q = \int_0^t I dt \quad (2.4)$$

$$SOC = \frac{cn-Q}{cn} \quad (2.5)$$

$$\Sigma U = U_1 + U_2 + \dots + U_{n-1} + U_n \quad (2.6)$$

Yhtälöissä (2.4-2.6):

Q	Sähkövaraus
I	Akun virta
C <sub>n</sub>	Nimelliskapasiteetti
SOC	Varaustaso
U	Jännite

Yksittäisen akkukennon nimellisjännite on suhteellisen pieni, kuten taulukossa 1 esitetiin. Akuston jännite on yhtälön (2.6) mukaisesti sarjaankytkettyjen akkukennojen jännitteiden summa. Akustoihin on sopivan jännitetason saavuttamiseksi kytkettävä useita akkukennoja sarjaan. Mitä enemmän kennoja on sarjaankytkettynä, sitä suuremmaksi koko järjestelmän riskit nousevat. Kennojen välillä voi olla epätasapainoa useista eri syistä johtuen, esimerkiksi kennon sisäisten resistanssien erojen tai ikääntymisen myötä tapahtuvan materiaalirakenteen heikkenemisen myötä. Yksittäisiä kennoja pitäisikin tarkastella erikseen, jotta vältetään vaarallisilta yli- tai alilatauksilta.

Akkukennolle määritellään jännitteen sallitut ylä- ja alarajat, joiden välissä akkukennon oletetaan turvallisesti toimivan. Jos kennojen jännitteet ovat epätasapainossa, voi akkua ladattaessa tapahtua vaaratilanteita. Jos akustossa on yksi tai useampi heikossa kunnossa oleva kenno, nousee latausvaiheessa akun terveiden kennojen jännite haluttua korkeammaksi, kun koko järjestelmän jännite pyritään nostamaan haluttuun arvoon. Terveiden kennojen jännitteen kasvaessa niiden varaustaso saattaa nousta lähelle teoreettista maksimia, mikä voi aiheuttaa elektrodeilla normaaleista reaktioista poikkeavia sivureaktioita. Sivureaktiona voi esiintyä esimerkiksi höyrystymisreaktioita, joiden myötä paineen kasvaessa akku voi jopa räjähtää. [9] Mitä pidemmälle valmistumistekniikka kehittyy, sitä

pienemmäksi samalla tavalla valmistettujen kennojen väliset erot kapenevat. Tätä teoremaa pyrkivät useat kunnonvalvontaohjelmistot jo nykyään hyödyntämään mittaamalla samanaikaisesti useamman kennon rinnan- tai sarjaankytkentää, sillä oletettu mittausvirhe on pieni.

### 2.3.3 Turvallisuus

Akkupaketin suunnittelussa täytyy ottaa huomioon akun turvallisuusnäkökulmat. Suunnittelussa on oltava tarkkana, miten akun halutaan toimivan syötettävän järjestelmän osana. Vaikka akun teoreettinen napajännite on esimerkiksi litiumkربولttioksidiaakulla (LCO) noin 4,35 V, ei akun jännitettä kannata näin suureksi nostaa. Myös hyvin tyhjäksi purkaminen voi nopeuttaa ikääntymistä. Elektrodiin rasittaminen varaustason ääripäissä voi johtaa sekä litiumionien että elektrodiin aktiivimateriaalien menettämiseen. Vaikka korkeammalla jännitteellä saadaan alkuvaiheessa suurempi kapasiteetti hyödynnettyä, ikääntyy akku tällaisella käytöllä nopeasti. Litiumioniakuilla on hyvin pieni itsepurkauvuus, joten kapasiteetti ei merkittävästi laske kuormittamattomassa akussa. Jos akkua kuitenkin varastoidaan korkeassa jännitetasossa, voi kapasiteetti vähentyä elektrodilla tapahtuvien sivureaktioiden takia. Tämä lyhentää akun elinikää. [19, 20, 21]

Akulle määritetään lämpötila-alue, jolla akkua suositellaan käytettävän. Korkeammassa lämpötilassa akun sisäinen impedanssi pienenee, jolloin ionien liike-energia kiihtyy, joka kasvattaa elektrodiin kokema mekaanista stressiä. Jos toimitaan liian matalassa lämpötilassa, kasvaa elektrodeilla tapahtuvien sivureaktioiden todennäköisyys. Sivureaktiot ovat reaktioita, jotka eivät kuulu akun normaaleihin hapetus-pelkistysreaktioihin. Suurin osa sivureaktioista on akulle haitallisia. Matalissa lämpötiloissa sisäinen impedanssi kasvaa, mikä hidastaa lataustapahtumaa. [20]

Luvussa 2.2.2 esiteltiin lyhyesti, miten eri elektrodimateriaalien ominaisuudet vaihtelevat suorituskyvyn näkökulmasta. Elektrodimateriaalit eroavat myös turvallisuuteen ja ikääntymiseen vaikuttavien tekijöiden osalta. Litiumioniakut ikääntyvät pääsääntöisesti kolmella eri tavalla: litiumionien määrän pieneneminen (litiumin metalloituminen), elektrodiin aktiivimateriaalien määrän pieneneminen sekä akun sisäisen kinetiikan heikkeneminen. [11, 19, 20]. Käyttöolosuhteilla kuten korkeassa lämpötilassa toimimisella voi olla edellä lueteltuihin kiihdyttävä vaikutus, samoin kun valmistusmenetelmien aiheuttamalla epäpuhtauksilla [21]. Litiumin metalloituminen liittyy yleensä lataustapahtumaan. Akun kapasiteetti pienenee, jos energiaa vapauttaviin reaktioihin ei ole enää käytettävissä yhtä suurta määrää litiumia. [9,20]

Elektrodimateriaalien yhteydessä esiteltiin, kuinka grafiittipohjaisissa negatiivielektrodeissa syntyy SEI-kerros elektrodin ja elektrolyytin väliin. Sisäisen kinetiikan heikkeneminen liittyy kasvaviin impedansseihin SEI-kerroksen kasvun takia [11]. SEI:ssä syntyy ajan myötä säröjä, joiden läpi elektrolyytin hiukkaset ja litiumioneja vastaanottanut grafiitti voivat reagoida. Säröt tarjoavat näille reaktioille yhteyden, jota pitkin ajan kuluessa



metalloituvan litiumin määrä kasvaa ja lisää grafiittia siirtyy SEI-kerrokseen. Kapasiteettia menetetään, kun hapetus-pelkistysreaktioihin osallistuvan aktiivimateriaalin ja litiumionien määrä pienenee. Samalla SEI:n kasvun myötä akun sisäinen impedanssi kasvaa hidastaen lataus- ja purkutapahtumaa. Tämä ilmiö korostuu erityisesti korkeilla virroilla ja matalilla lämpötiloilla. [21, 22]

Jos akussa on negatiivielektrodimateriaalina LTO, ei SEI-kerrosta muodostu. LTO-elektrodilla ei tapahdu herkästi litiumin metalloitumista korkeillakaan virroilla tai matalilla lämpötiloilla. [21] LTO:n hilarakenteen painoyksikköä kohden tarjoama pinta-ala on suhteessa hiileen ja grafiittiin niin suuri, että se mahdollistaa LTO-akulle sekä korkeat purkuvirratt että korkean käyttökertojen määrän [23]. LTO-akun ikääntyminen tapahtuukin yleensä positiivielektrodilla tapahtuvien reaktioiden johdosta

Positiivielektrodeilla tapahtuvien reaktioiden vaikutus ikääntymiseen ja turvallisuuteen riippuu elektrodimateriaalista. Erityisesti mangaanipohjaisilla elektrodeilla ikääntymiseen vaikuttaa aktiivimateriaalien menetyks, kun mangaani liukenee elektrolyyttiin. [21, 24] Aktiivimateriaalin menetyksen myötä elektrodin hilarakenne murenee, eikä se pysty enää vastaanottamaan samaa määrää litiumioneja hilarakenteensa väleihin.

LCO on vanhin kaupallistetuista positiivielektrodimateriaaleista litiumioniakuissa. Myrkyllisen ja ympäristölle haitallisen kobolttioksidin suurin turvallisuusriski liittyy liian korkeaksi nostettuun akkujännitteeseen. Kun akun jännite nostetaan ladattaessa korkeaksi, pakkautuvat litiumionit negatiivielektrodille, joka on LCO-akuilla grafiittia tai vanhemmissa malleissa hiiltä. Positiivielektrodin litiumionipitoisuus pienenee hyvin pieneksi, mikä voi johtaa akun sisäiseen tulipaloon, sillä puhdas kobolttioksidi on erittäin herkkä syttymään. [25]

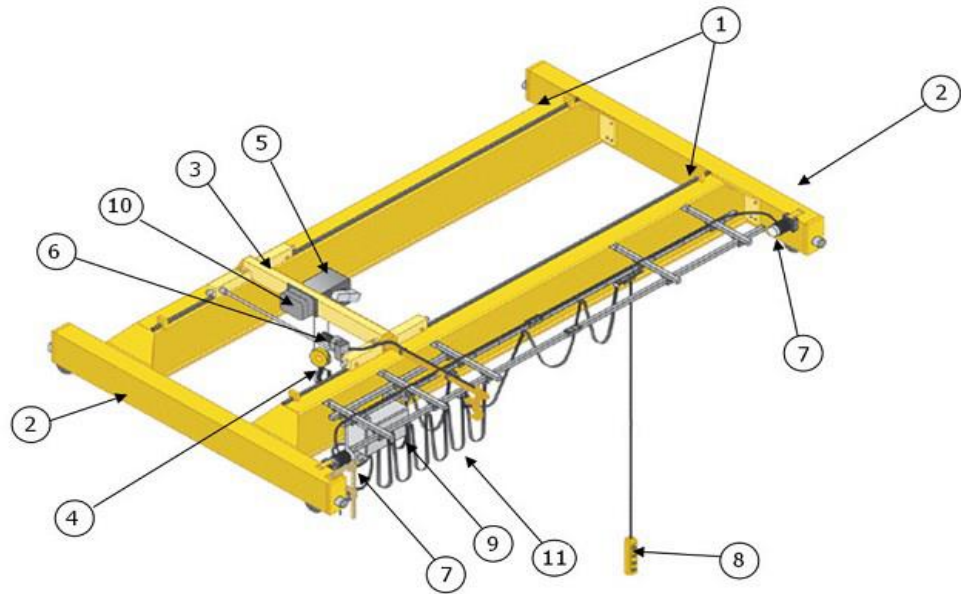
Akun kokemilla purku- ja latausvirroilla on merkitystä akun käyttöiän kannalta. Jos akkua kuormitetaan jatkuvasti yli sille sallitulla virralla, laskee sen elinikä nopeasti. Sama ilmiö esiintyy myös akkua ladattaessa. Järjestelmä pitää suunnitella niin, ettei ylä- tai alarajaa ylitetä. Mitä pienemmillä virroilla akkua rasitetaan, sitä pidempi akun käyttöikä lähtökohtaisesti on. Esimerkiksi nopeammin toteutettava lataus edellyttää korkeaa virtaa, joka toteutuu litiumionien nopeana irtoamisena elektrodin hilamateriaalista, mikä aiheuttaa mekaanista stressiä elektrodin rakenteelle. Liian pitkäkestoinen stressi voi pahimmassa tapauksessa johtaa rakenteen vaurioitumiseen, mistä seuraa akun kapasiteetin lasku. Kapasiteetti laskee muistakin syistä akussa ajan kuluessa, ja nopea lataus voi lyhentää akun käyttöikää entisestään. [9] Lisäksi nopeassa latauksessa on korkean sähkövirran vaikutuksesta vaarana litiumin metalloituminen negatiivielektrodin pinnalle, mikä on yksi haitallisimmista sivureaktioista. Metalloiduttuaan litium ei enää osallistu akun kemiallisiin reaktioihin, mikä merkitsee pysyvää kapasiteetin pienenemistä. Myös sisäisen oikosulun riski kasvaa litiumin metalloitumisen myötä. [9,13]

### 3. SILTANOSTURI

Nostureita käytetään apuvälineenä raskaiden kuormien nostamiseen ja siirtämiseen. Nostotarpeet vaihtelevat suuresti käyttötarpeesta riippuen, ja eri käyttöön suunnitellut nosturit poikkeavat rakenteeltaan huomattavasti toisistaan. Tutkimuksen kohteena olevia siltanostureita käytetään tyypillisesti sisätiloissa. Siltanosturi on yleinen näky monissa teollisuushalleissa, joissa on tarve nostaa erilaisia kuormia. Nostotarpeet vaihtelevat kohteesta riippuen konepajayritysten muutamasta tonnista metalliteollisuuden satoihin tonneihin.

Huolimatta vaihtelevasta nostotarpeesta on siltanosturien mekaaninen rakenne määriteltävissä pääkomponenteiltaan samankaltaiseksi. Siltanosturilla käsitetään yleisesti nostolaittekokonaisuutta, joka koostuu nosturiradalla kahden kiskon välissä kulkevasta siltapalkista, siltapalkkia pitkin liikkuvasta vaunusta ja vaunussa kiinni olevasta nostimesta. Pääkannatin on sijoitettu nosturiradan kiskoilla olevien päätykannattimien päälle, ja yhdessä nämä muodostavat nosturin siltapalkin. Yhdessä nosturissa voi olla yksi tai useampi siltapalkki. Myös vaunuja voi olla samalla sillalla useampi kuin yksi. Kuvassa 6 on esitelty kaksipalkkisen siltanosturin rakenne. Kevyempään käyttöön tarkoitettu nosturi voidaan toteuttaa myös yhdellä palkilla.

Nosturissa on kolme liikesuuntaa: sillan siirtoliike nosturiradan suuntaisesti, vaunun siirtoliike sillan suuntaisesti sekä nostoliike edellisiin nähden kohtisuoraan maata vasten. Seuraavaksi esitetään edellä kuvattuihin liikesuuntiin liittyen massan liikuttamiseen vaadittavan momentin yhtälöt, joiden avulla voidaan laskea moottoreilta tarvittavat mekaaniset tehot. Vaikka nosturiteollisuudessa käytetään yhä yleisesti myös napavaihtomoottoreita, joissa voidaan vaihtaa kahden eri käämityksen avulla nostonopeutta, ne jätetään tässä työssä tarkastelematta. Tutkimuksen kohteena oleva akkukäyttöinen konsepti vaatii taajuusmuuttajaohjatut moottorikäytöt, ja liikeyhtälöidenkin kohdalla paneudutaan vain niihin liittyviin seikkoihin. Nosto- ja siirtoliikkeen yhtälöt perustuvat lähteisiin [27,28,29].


**Kantava rakenne:**

- 1 Pääkannatin
- 2 Päätykannatin
- 3 Nostovaunu
- 4 Nostokoukku

**Koneistot:**

- 5 Nostokoneisto
- 6 Nostimen siirtokoneisto
- 7 Sillan siirtokoneisto

**Sähköjärjestelmä :**

- 8 Ohjain
- 9 Sillan sähkökaappi
- 10 Nostimen sähkökaappi
- 11 Kaapelointi ja varustelu

*Kuva 6 Siltanosturin rakennekuva [23]*

### 3.1 Nostoliike

Mekaaninen teho voidaan määrittellä yleisesti yhtälön (3.1) avulla, jolloin mekaaninen teho saadaan tehdyn työn aikaderivaattana. Nosturin kannalta mielekäs tehon esitysmuoto on esitetty yhtälössä (3.2), josta voidaan laskea esimerkiksi tasaisella nopeudella nostettavaan massaan tarvittava teho. Yhtälöstä (3.2) nähdään yhteys lineaarisen ja pyörivän liikkeen välillä, kun  $v$  on telan kehänopeus ja  $\omega$  telan kulmanopeus.

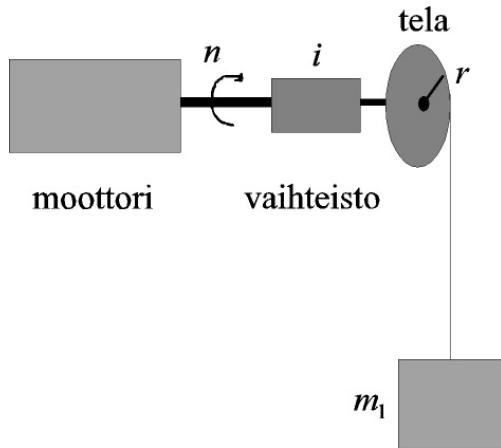
$$P_y = \frac{dW}{dt} \leftrightarrow W = \int_{t_1}^{t_2} P_y dt \quad (3.1)$$

$$P_y = T\omega = Fv \quad (3.2)$$

Yhtälöissä (3.1-3.2):

- $P_y$  teho
- $W$  työ
- $T$  momentti
- $\omega$  kulmanopeus
- $F$  voima
- $v$  nopeus

Tasaisessa nostoliikkeessä tarvittava momentti  $T_{n1}$  voidaan laskea yhtälöstä (3.3). Ratkaisemalla yhtälöstä (3.4) telasäteen ja vaihteiston välityksen suhde  $\frac{r}{i}$  voidaan yhtälö (3.3) edelleen ratkaista jäljempänä olevaan muotoon. Tämä on yksinkertaisempi muoto käsitellä momenttia nosturin tapauksessa. Telan kehänopeuden suuruus on usein haluttu ja saatavilla oleva tieto, sillä se kuvaa kuorman nostonopeutta. Kuvassa 7 on esitetty yksinkertainen kuva nostotilanteesta.



**Kuva 7 Nostoliikkeen yksinkertaistettu kuva [27]**

$$T_{n1} = \frac{m_n g r}{i \eta'} = \frac{m_n g v}{2 \pi n \eta'} \quad (3.3)$$

$$v = \frac{2 \pi n r}{i} \quad (3.4)$$

Yhtälöissä (3.3-3.4):

$T_{n1}$	vakionostonopeudella muodostuva momentti
$m_n$	nostettava massa
$g$	putoamiskiihtyvyyys
$r$	telan säde
$i$	vaihteiston välitys
$\eta'$	mekaaninen hyötysuhde
$n$	moottorin akselin pyörimisnopeus

Momenttia laskettaessa täytyy ottaa huomioon nosto- ja siirtokoneiston rakenteesta johtuvat häviöt, jotka otetaan huomioon mekaaniseen hyötysuhteen avulla. Nostotilanteessa mekaaniset häviöt sisältävät köysityksen apuna käytettävien väkipyörien, telan sekä vaihdeportaiden aiheuttamat häviöt. Jokaista objektia, esimerkiksi yksittäistä väkipyörää kohden käytetään yleisesti likiarvona 1 % häviötä [28]. Yhtälöissä oleva hyötykertoimen  $\eta'$  arvo ( $0 \leq \eta' \leq 1$ ) riippuu siitä, onko kyseessä nosto- vai laskutilanne. Nostettaessa kuormaa häviöt kasvattavat akselitehoa, joten  $\eta' = \eta$ . Vastaavasti laskettaessa kuormaa me-

kaaniset häviöt pienentävät akselimomenttia, joten hyötysuhde otetaan huomioon yhtälössä (3.3) käänteislukuna  $\eta' = 1/\eta$ . [27] Jos jokaista objektia kohden käytetään hyötysuhteena 99 %, saadaan mekaanisten häviöiden laskennassa käytettävä hyötysuhde laskettua yhtälöstä (3.5).

$$\eta = 0,99^z \quad (3.5)$$

Yhtälössä (3.5):

z nosto- ja siirtokoneiston mekaanisiin häviöihin vaikuttavien komponenttien lukumäärä

Yhtälöstä (3.3) saadaan laskettua tasaisesti liikkuvan nostotapahtuman vaatima momentti. Kun nostonopeus ei ole vakio, vaaditaan nopeuden muutokseen kiihdyttävää momenttia. Nosturikäytössä käytettävillä taajuusmuuttajaohjatuilla moottorikäyttöillä kiihdytykseen ja hidastukseen käytetään yleensä maksimissaan muutaman sekunnin pituisia ajanjaksoja. Nostoliikkeessä suurin tarvittava maksimimomentti on kiihdytystilanteen aikana tarvittava tasaisen nostoliikkeen momentin  $T_{n1}$  ja kiihdytysmomentin  $T_{n2}$  summa  $T_{ntot}$ . Nostokoneiston eri osilla kuten myös nostettavalla kuormalla on hitausmassa, jotka vaikuttavat kiihdyttävän momentin suuruuteen. Redusoimalla nostettavan kuorman hitausmassat moottorin akselin tasoon, voidaan niiden summa esittää yhteishitausmassana  $J_{tot}$ , jonka laskukaava on esitetty yhtälössä (3.6). Kolmessa viimeisessä termissä oleva heittomerkki tarkoittaa redusoitua arvoa. Redusoinnissa käytetään vaihteen välitysuhdetta ja hyötysuhdetta yhtälön (3.7) mukaan. Kokonaishitausmassan kiihdyttämiseen tarvittava kiihdytysmomentti saadaan laskettua yhtälöstä (3.8). Sama yhtälö pätee niin kiihdytys- kuin hidastustilanteessa sekä nosto- että laskutapahtumassa, kun nopeuden liikesuunnat ja mekaanisten häviöiden esitystapa otetaan suunnasta riippuen huomioon. [27, 29]

$$J_{tot} = J_B + J_M + J_{C1} + J_G + J'_{C2} + J'_D + J'_1 \quad (3.6)$$

$$J'_1 = J_1 \frac{i^2}{\eta'} \quad (3.7)$$

$$T_{n2} = J_{tot} \frac{d\omega}{dt} = J_{tot} 2\pi \frac{dn}{dt} \quad (3.8)$$

$$T_{ntot} = T_{n1} + T_{n2} = \frac{m_n g v}{\omega \eta'} + J_{tot} \frac{d\omega}{dt} \quad (3.9)$$

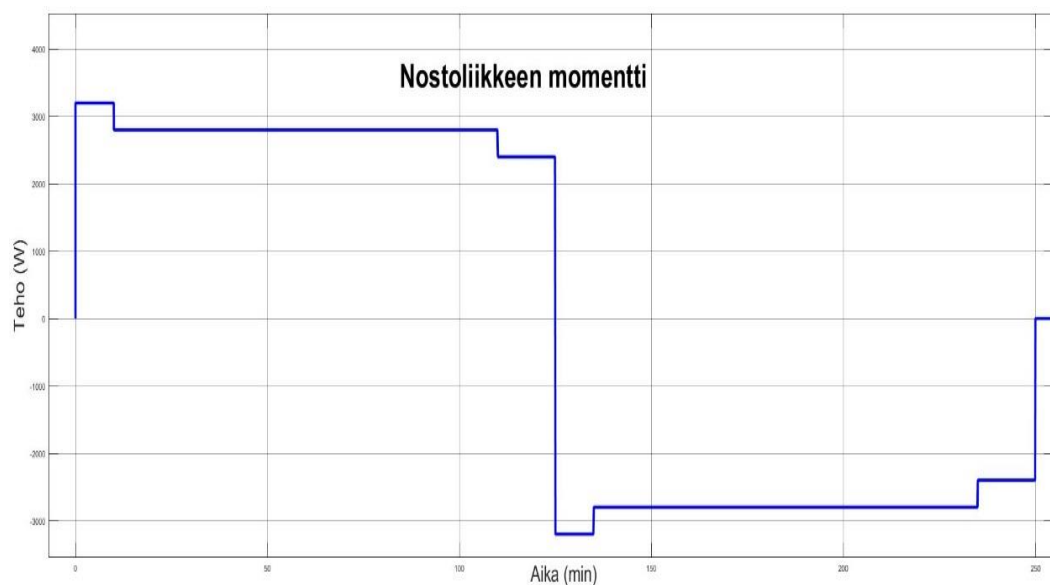
Yhtälöissä (3.6-3.9):

$J_{tot}$	Kokonaishitausmomentti
$J_B$	Jarrun hitausmomentti
$J_M$	moottorin hitausmomentti
$J_{C1}$	moottorin ja vaihteen välisen kytkimen hitausmomentti

- $J_G$  vaihteiston hitausmomentti
- $J_{C2'}$  vaihteen ja telan välisen kytkimen hitausmomentti moottorin akselille redusoituna
- $J_{D'}$  telan hitausmomentti moottorin akselille redusoituna
- $J_1'$  suoraviivaisesti liikkuvia massoja vastaava hitausmomentti moottorin akselille redusoituna
- $T_{n2}$  kiihdyttävän liikkeen vaatima lisämomentti
- $T_{ntot}$  kiihdyttävän liikkeen vaatima kokonaismomentti

Nosturilla toteutettava kuorman siirtotapahtuma voidaan kuvata seuraavasti: Nostokoneisto nostaa kuorman nostettavalta tasolta ilmaan haluttuun korkeuteen. Kun kuorma on saatu nostettua haluttuun korkeuteen, siirretään siltaa ja vaunua niin, että nostomassa on halutussa sijainnissa. Kun sijainti on saavutettu, lasketaan nostokoneistolla kuorma alas haluttuun paikkaan. Edellä esitettyjen yhtälöiden (3.3-3.9) avulla saadaan tarvittavat momentit selville, mitä kuorman nostamiseen ja laskemiseen vaaditaan.

Periaatekuva nosto- ja laskuliikkeen sisältävästä momentin funktiosta on esitetty kuvassa 8. Kuorman suunnanvaihdos toteutetaan ilman välivaiheita ajanhetkellä  $t = 140$ . Kuvasta 8 nähdään, että kiihdytyksen aikana tarvittava momentti on suurimmillaan. Kun haluttu nostonopeus on saavutettu, ei kiihdyttävää momenttia enää tarvita. Kun nostoliike halutaan lopettaa, on hidastuvuuden suunta liikesuunnalle vastainen, jolloin tarvittava momentti pienenee edelleen. Jälkimmäinen puolisko kuvaajassa kuvaa laskutapahtumaa, jolloin samat lainalaisuudet pätevät kuin nostotapahtumassakin, nyt vain momentin etumerkki on päinvastainen. Lisäksi amplitudit ovat erisuuria nosto- ja laskutapahtumalla, sillä nostokoneiston mekaaninen hyötysuhde on molemmissa tapauksissa otettu huomioon. Esimerkkikuva on skaalattu leveyssuunnassa, jotta eri momentin arvot tulisivat selväksi.



**Kuva 8 Nosto- ja laskutapahtuman periaatekuva**

Siukola tutki diplomityössään [27] erilaisten nosturien energiankulutusta. Osana diplomityötä mitattiin teho- ja energiamääriä 10 tonnin nostimella eri nostokuormilla ja -nopeuksilla. Tutkittaessa nostotilannetta, jossa nimelliskuorma 10 000 kg nostettiin maksiminostonopeudella ylöspäin, ei taajuusmuuttajakäyttöisen nostotapahtuman päätötehon tarpeessa ollut nähtävissä kiihdytysmomentin vaikutusta, vaan tehon arvo oli koko nostotapahtuman ajan samalla tasolla. Tutkittaessa samalla nostokoneistolla ilman hyötykuormaa vaadittavaa tehoa, osoittivat mittaukset, että kiihdytysmomentilla oli vaikutus, mikä näkyi tehon hetkellisesti korkeampana arvona. Tällöin huipputehon arvo oli kuitenkin alle 15 % 10 000 kg nimelliskuormalla mitatusta tasaisesta päätötehonkulutuksesta. Kiihdyttävän momentin merkitys riippuu paljon nostettavan massan suuruudesta. Kun nostimeen ei ole kytketty kuormaa ja halutaan nostaa vain nostimen koukku ylös, on yhtälön (3.9) molemmilla termeillä merkittävä vaikutus vaaditun momentin suuruuteen. Vaadittavan yhteismomentin osuus on kuitenkin verrattain pieni verrattuna tilanteeseen, joka vaaditaan, jos halutaan nostaa raskas kuorma ylös. Tämä näkyi myös Siukolan työssä tehdyissä tehomittauksissa.

Nostotapahtumaan liittyvien hitausmomenttien yhteissummasta suurin osa, noin 70–90 % määräytyy nostomoottorin ja vaihteiston hitausmomentista [27]. Kun nostettavan massa kasvaa hyvin pienestä (koukku) kohtuullisen suureen (nimelliskuorma), kasvaa yhtälön (3.9) ensimmäisen termin arvo merkittävästi massan kasvun myötä. Samanaikaisesti toisessa termissä esiintyvään hitausmassan yhteissummaan lisättävä nostomassan hitausmomentti ei kasvata kyseistä termiä kovinkaan paljon, sillä sen moottorin akselille redusoitu arvo on pieni verrattuna muihin hitausmomenteihin korkean vaihteiston välityssuhteen johdosta. Tämä selittää myös sen, miksi edellä esitetystä tapauksesta 10 000 kg kuormaa nostettaessa ei kiihdyttävän momentin vaikutus ollut nähtävissä.

Nostotapahtuman kuluttama huippupätöteho saadaan laskettua yhtälöstä (3.10). Kiihdytyksen lopussa sekä telan kehänopeus  $v$  että kulmanopeus  $\omega$  ovat saavuttaneet tavoitearvonsa. Toisen termin viimeinen tekijä  $\frac{d\omega}{dt}$  eli kulmakiikkyvyys on myös vakio, sillä taajuusmuuttajakäyttöisen nostoliikkeen kiihdytys ja hidastus toteutetaan yleensä vakiokiihdytyvyyden arvolla. Täten maksimiteho saadaan laskettua yhtälöstä (3.10), kun nopeuksien arvona käytetään vakionostonopeuden arvoa. Huipputehon arvo on kiinnostava, sillä muuttamalla se sähköiseksi tehoksi saadaan laskettua suurin tarvittava virta, kun jännitteen arvo on likimain vakio. Yhtälöstä (3.10) saadaan laskettua sekä kiihdytyksen että hidastuksen maksimiteho. Myös vakionopeudella tarvittava teho saadaan samasta yhtälöstä, sillä yhtälön toinen termi on tasaisella liikkeellä nolla.

$$P_{nmax} = T_{ntot} * \omega = \frac{m_n g v}{\eta'} + J_{tot} \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (3.10)$$

Yhtälössä (3.10):

$P_{nmax}$  Nostoliikkeen maksimiteho

### 3.2 Siirtoliike

Siirtoliike esiintyy nosturin liikesuuntien mukaisesti vaunun ja sillan liikkeen myötä. Siirtoliikkeen osalta yhtälöt ovat hyvin samankaltaiset kuin nostoliikkeenkin kohdalla. Sekä tasaisen ajonopeuteen vaadittava momentti että kiihdyttävä momentti tarvitaan siirtoliikkeen toteutukseen. Sisätiloissa olevan nosturin osalta ei tarvitse ilmanvastuksesta huolehtia, eikä sen vaatimaa momenttia tässä yhteydessä esitetä.

Tasaisessa liikkeessä siirtoliikkeen vaatiman momentin yhtälö on lähes identtinen yhtälön (3.3) kanssa. Kaavaan lisätään päätykannattimen tai vaunun kantopyöristä aiheutuva vierintävastus  $w$  (N/kg), jonka lausumisessa käytetään kantopyörän halkaisijasta riippuvaa kitkakerrointa  $\mu$  yhtälön (3.11) mukaisesti. Siirtoliikkeen vaatima momentti  $T_{s1}$  voidaan lausua yhtälön (3.12) avulla [27,29].

$$w = \mu * g \quad (3.11)$$

$$T_{s1} = \frac{m_s v * w}{2\pi n * \eta'} \quad (3.12)$$

Yhtälöissä (3.11-3.12):

- $w$  vierintävastus
- $\mu$  vierintävastuskerroin
- $T_{s1}$  vakiosiirtonopeudella muodostuva momentti
- $m_s$  siirrettävä massa

Vastaavasti kuin nostoliikkeessä, saadaan kiihdytyksessä tarvittava kokonaismomentti  $T_{tot}$  lausuttua kiihdytysmomentin  $T_{s2}$  ja vakiosiirtomomentin  $T_{s1}$  avulla. Kokonaishitausmassa  $J_{tot2}$  on saman periaatteen mukainen kuin nostoliikkeen tapauksessakin: siirtokoneiston hitausmomentin sekä liikutettavan vaunun/sillan ja kantopyörän massojen redusoitujen hitausmomenttien summa.

$$T_{s2} = J_{tot2} 2\pi \frac{dn}{dt} \quad (3.13)$$

$$T_{stot} = T_{s1} + T_{s2} = \frac{m_s v * w}{\omega \eta'} + J_{tot2} \frac{d\omega}{dt} \quad (3.14)$$

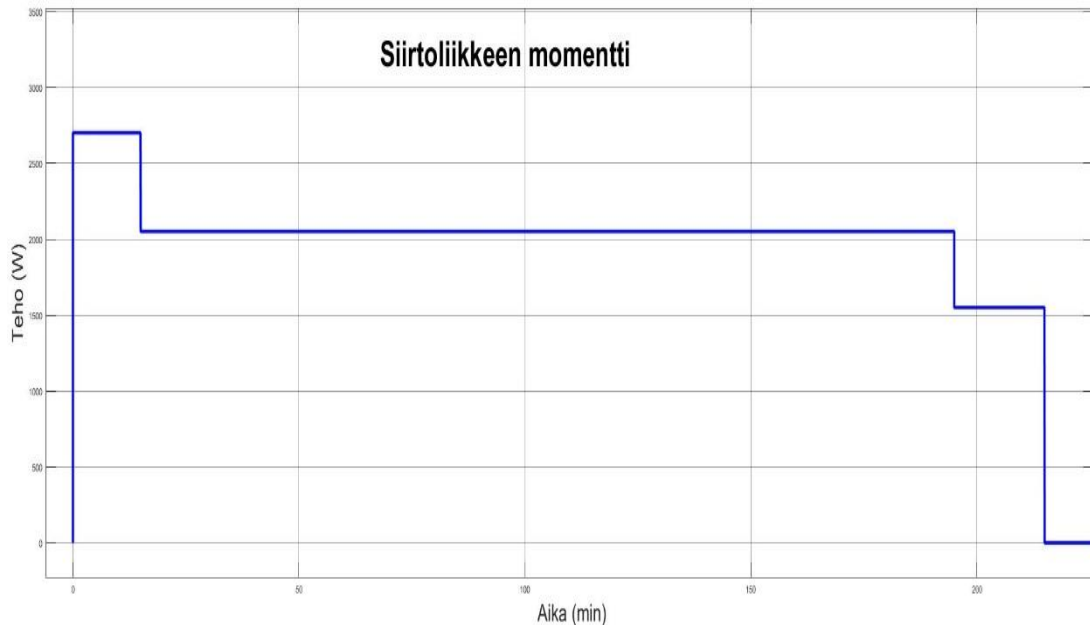
Yhtälöissä (3.13-3.14):

- $T_{s2}$  kiihdyttävän liikkeen vaatima lisämomentti
- $T_{stot}$  kiihdyttävän liikkeen vaatima kokonaismomentti

Siirtoliikkeen momentin kuvaaja eroaa nostoliikkeen kuvaajasta. Vakionopeudella liikuttaessa tarvittava momentti ja sitä kautta teho on huomattavasti pienempi kuin nostoliikkeessä, kun potentiaalienergia pysyy koko ajan samana, ja momentti tarvitaan ainoastaan vierintävastuksen kumoamiseksi. Siirtoliikkeen momenttien etumerkki vakionopeudella



on samansuuntainen riippumatta etenemissuunnasta. Riippuen liikutettavasta massasta, voi kuitenkin hidastusmomentti olla erityisesti sillan siirtoliikkeen kohdalla sillan massasta johtuen niin suuri, että se johtaa momentin hetkelliseen etumerkin vaihtumiseen hidastustilanteessa. Siirtoliikkeessä mekaaninen hyötysuhde esitetään  $\eta' = \eta$ . Poikkeuksen tekee hidastustilanteessa negatiiviseksi muuttuva momentti, jolloin hyötysuhde esitetään käänteislukuna  $\eta' = 1/\eta$  [27]. Siirtokoneiston mekaanisen hyötysuhteen laskennassa ei luonnollisesti ole mukana telaa tai väkipyöriä, vaan hyötysuhde määrytyy pääosin vaihdeportaiden lukumäärän perusteella [28]. Kuvassa 9 oleva siirtoliikkeen momentin käyttäytymisen esimerkki on jälleen skaalattu leveyssuunnassa eri momenttien esiintuomiseksi.



**Kuva 9 Siirtoliikkeen momentin periaatekuva**

Nostoliikkeelle määriteltiin yhtälössä (3.10) maksimiteho, ja siirtoliikkeelle voidaan määrittellä maksimiteho vastaavasti. Kertomalla kiihdytyksen vaatima huippumomentti roottorin kulmanopeudella, saadaan huipputeho laskettua yhtälöstä (3.15). Yhtälöä voidaan käyttää myös vakionopeudella liikuttaessa, jolloin yhtälön toinen termi on nolla.

$$P_{smax} = T_{stot} * \omega = \frac{m_s g v w}{\eta'} + J_{tot2} \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (3.15)$$

Yhtälössä (3.15):

$P_{smax}$  Siirtoliikkeen vaatima maksimiteho

### 3.3 Taajuusmuuttajaohjattu moottorikäyttö

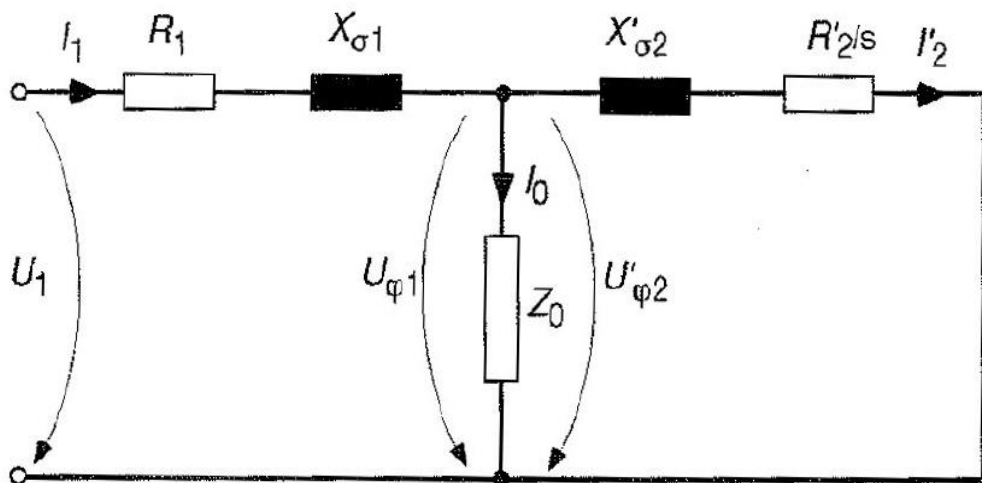
Työssä tutkittavassa konseptissa on edellytyksenä, että jokainen moottorikäyttö on taajuusmuuttajaohjattu. Napavaihtomoottorit jätetään työssä tarkastelematta. Työn kannalta

oleellista on ymmärtää taajuusmuuttajakäytössä syntyvät tehohäviöt. Seuraavaksi esitetään lyhyesti tavallisimman nosturissa käytettävän moottorin eli oikosulkumoottorin tehohäviöt. Lisäksi kerrotaan, mistä taajuusmuuttajan tehohäviöt muodostuvat.

### 3.3.1 Oikosulkumoottori

Taajuusmuuttajaohjattujen käyttöjen toimilaitteena toimii yleisimmin kolmivaiheinen oikosulkumoottori, joka on epätahtikoneen erityistapaus. Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin keksijänä pidetään serbialaista Nikola Teslaa. [30] Nosturissa sekä siirto- että nostomoottoreina käytetään oikosulkumoottoria, joka on yksinkertainen ja edullinen toimilaitte verrattuna moniin muihin moottoreihin. Vaikka toimilaitteen nimi on oikosulkumoottori, voi sama laite toimia sekä moottorina että generaattorina.

Moottorin tehtävänä on muuntaa sähköinen teho mekaaniseksi tehoksi. Generaattori toimii päinvastoin, eli se muuntaa mekaanista tehoa sähköiseksi tehoksi. Kolmivaiheisen epätahtikoneen yksivaiheinen sijaiskytkentä voidaan esittää kuvan 10 mukaisesti, jossa roottoripuolen suureet on redusoitu staattoripuolelle. Virran suunta on staattoripuolelta roottoripuolelle, kuten operoitaessa moottorina kuuluukin. Jos sama toimilaitte toimii generaattorina, on virtojen  $I_1$  ja  $I_2$  suunta vastakkaisuuntainen.



**Kuva 10** Epätahtikoneen yksivaiheinen sijaiskytkentä [30]

Kuvassa 10:

$I_1, I_2$	Staattoripuolen ja redusoidun roottoripuolen virrat
$U_1$	Staattorijännite
$R_1, R_2'$	Staattoripuolen ja redusoidun roottoripuolen resistanssit
$X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}'$	Staattoripuolen ja redusoidun roottoripuolen hajareaktanssit
$I_0$	Magnetointivirta

$Z_0$	Magnetointi-impedanssi
$U_{\sigma 1}, U_{\sigma 2}$	Staattoripuolen ja redusoidun roottoripuolen vuojännitteet
$s$	Suhteellinen jättämä

Moottorin kaksi tärkeintä komponenttia ovat paikallaan pysyvä staattori sekä pyörivä roottori. Moottorin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Kolmivaiheinen vaihtovirta synnyttää staattoriin pyörivän magneettikentän, joka pyörii tahtinopeudella  $n_s$ . Tahtinopeuden yhtälö (3.16) on esitetty alla. Pyörivä magneettikenttä indusoi roottoripuolelle jännitteen, jolloin roottori alkaa pyöriä jättämän  $s$  verran hitaammalla nopeudella  $n$ . Jättämä voidaan laskea yhtälöstä (3.17), jolloin roottorin pyörimisnopeus on yhtälön (3.18) mukainen. [30]

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \quad (3.15)$$

$$s = \frac{n_s \cdot n}{n_s} \quad (3.16)$$

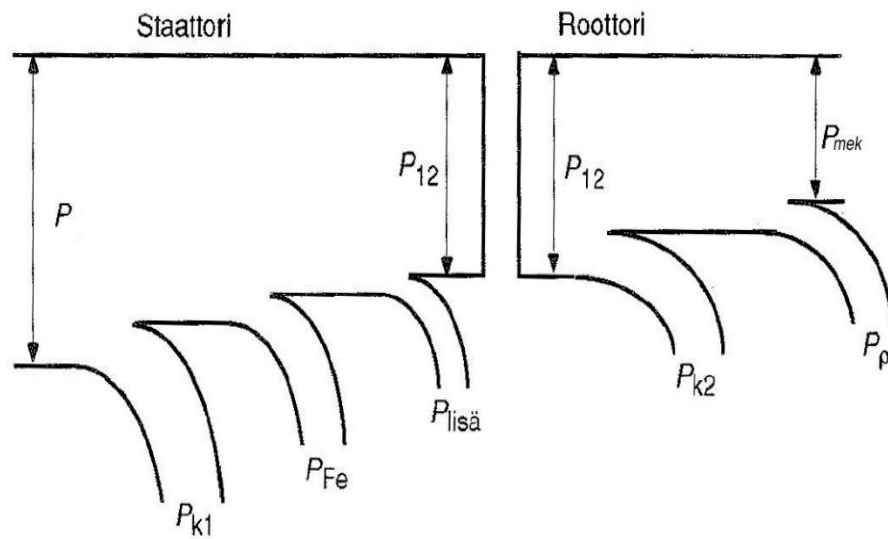
$$n = n_s(1 - s) \quad (3.17)$$

Yhtälöissä (3.16-3.18):

$n_s$	tahtinopeus
$f_s$	tahtinopeuden taajuus
$p$	napapariluku

Yhtälöistä (3.16-3.18) nähdään, että pyörimisnopeuteen voidaan vaikuttaa kolmella eri tavalla: jättämän säädöllä, syöttötaajuuden säädöllä sekä napapariluvun muuttamisella. Napapariluvun säätö on taajuusmuuttajaohjatuissa oikosulkumoottoreissa epäkäytännöllinen ratkaisu. Jättämän säätö vaatii joko roottorin resistanssin tai syöttöjännitteen tehollisarvon muuttamista, joista resistanssin muuttaminen on oikosulkumoottorilla hyvin vaikeaa. Vaihtoehtoisiksi jää syöttöjännitteen tai -taajuuden muuttaminen, tai vaihtoehtoisesti näiden yhdistelmä. Esimerkki yhdistelmästä on  $U/f$ -ohjaus, jossa pidetään syöttöjännitteen ja -taajuuden suhde vakiona. Tässä työssä ei tarkemmin perehdytä moottoreiden nopeuden ohjaukseen, joten ohjaustapoja ei tarkastella syvemmin.

Moottori on tutkimuksen kohdalta kiinnostava komponentti. Sen lisäksi, että sillä saadaan muunnettua sähköinen teho mekaaniseksi tehoksi tai päinvastoin, niin tehon muuntamisen yhteydessä aiheutuu myös häviöitä. Häviöt voidaan jakaa vakiohäviöiksi sekä kuormituksesta riippuviksi häviöiksi. Epätahtimoottoriin saapuvan sähköisen tehon ja lähtevän mekaanisen tehon välistä yhteyttä havainnollistetaan kuvan 11 avulla. Kuten kuvasta 11 huomataan, häviää osa saapuvasta tehosta erilaisiin häviötehoihin ennen muuntumistaan mekaaniseksi tehoksi.



**Kuva 11 Epätahtimoottorin tehonjakokaavio [30]**

Kuvassa 11:

- P sähköinen teho
- $P_{k1}$  Staattorin resistiiviset häviöt
- $P_{Fe}$  Staattorin rautahäviöt
- $P_{lisä}$  Staattorin lisähäviöt
- $P_{12}$  Ilmaväliteho
- $P_{k2}$  Roottorin resistiiviset häviöt
- $P_p$  Mekaaniset häviöt, kuten hankaushäviöt
- $P_{mek}$  Moottorilta saatava mekaaninen teho

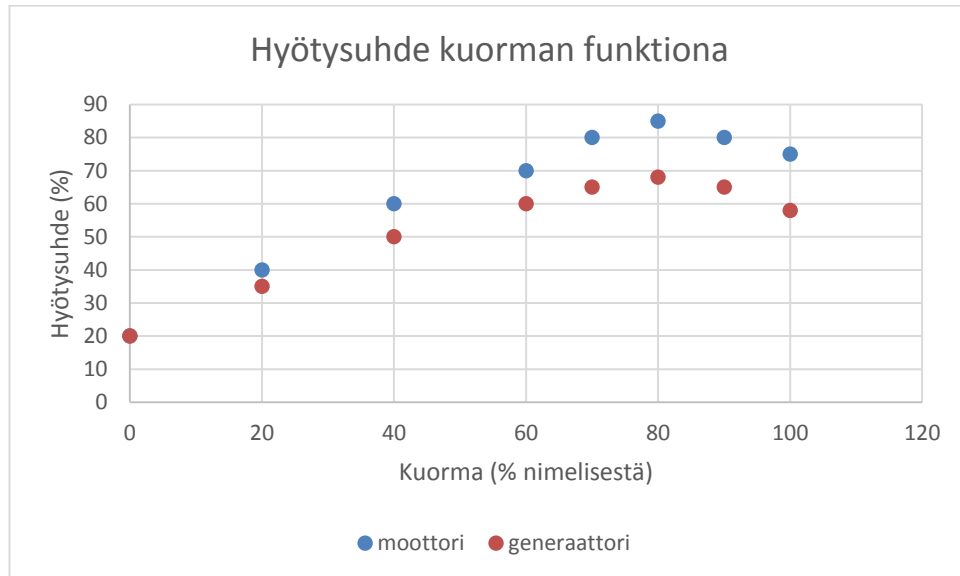
Epätahtikoneen yksivaiheinen sijaiskytkentä esitettiin kuvassa 10. Kuvan 11 ilmaväliteho  $P_{12}$  voidaan lausua esimerkiksi roottoripuolella kuvan 10 merkinnöillä yhtälön (3.18) mukaan. Mekaaninen teho saadaan, kun ilmavälitehosta vähennetään roottorin kuparihäviöt sekä lisähäviöt. Kuparihäviöiden suuruus määräytyy roottorin resistanssin ja roottorivirran perusteella. [30]

$$P_{12} = 3 * I_2' \frac{R_2'}{s} \quad (3.18)$$

Edellä kuvattu tehon virtaussuunta ja pieneneminen kuvaa oikosulkumoottorin toimimista moottorina. Kun nosturilla lasketaan kuormaa, kääntyy yhtälön (3.8) mukaisesti nopeuden suunnan muutoksen myötä momentin suunta negatiiviseksi, jolloin jättämäkin kääntyy negatiiviseksi. Tällöin kuorman laskun aiheuttama roottorin pyörimisnopeus pysyy kuitenkin samansuuntaisena ja kasvaa tahtinopeutta suuremmaksi. Tällöin tehon virtauksen suunta muuttuu ja epätahtikone alkaa toimia generaattorina. Huomionarvoista on,

että häviöt tapahtuvat nyt toiseen suuntaan kuin kuvassa 11, eli mekaaninen teho  $P_{mek}$  on suurempi kuin generaattorista ulos tuleva sähköinen pätöteho  $P$ .

Moottoreille voidaan määrittää hyötysuhde, joka ottaa huomioon tulotehon ja lähtötehon välisen yhteyden. Moottorissa kuluu kuormasta riippuen erilaisia häviöitä kuvan 11 mukaisesti. Joidenkin häviöiden suuruusluokka riippuu kuormitusvirrasta. Moottorin hyötysuhde on yleensä hieman parempi kuin saman laitteen toimiessa generaattorina vastaavalla kuormalla. Esimerkkikuvaaja oikosulkumoottorin hyötysuhteesta on esitetty kuvassa 12.



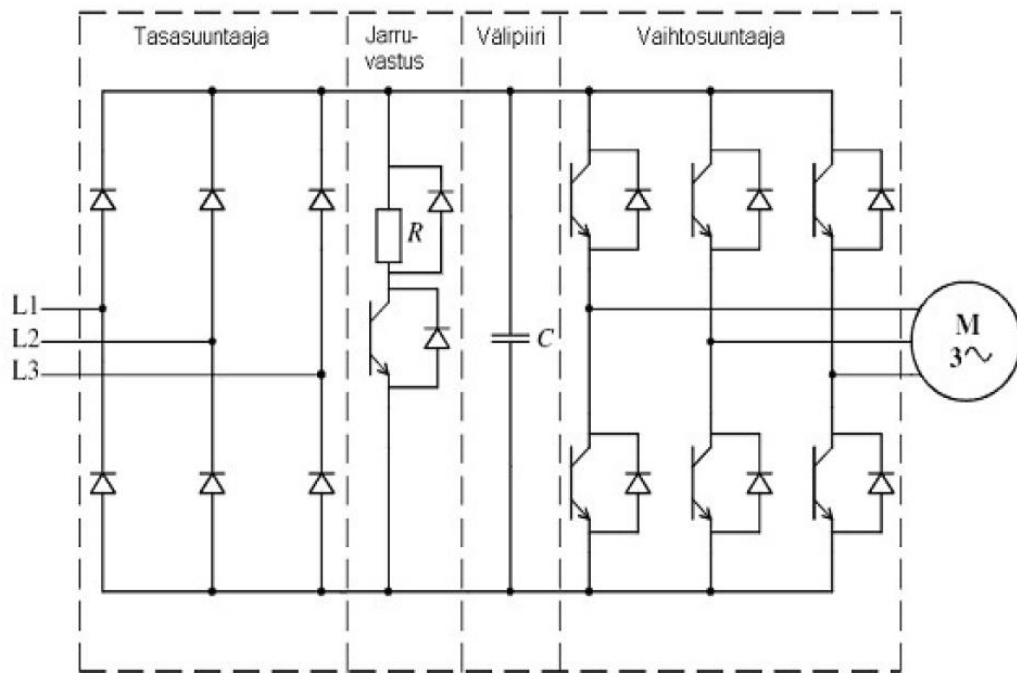
*Kuva 12 Epätahtikoneen hyötysuhde kuorman funktiona*

### 3.3.2 Taajuusmuuttajakäyttö

Taajuusmuuttajakäyttö on yleistynyt nosturikäytössä laajalti. Siirtoliikkeiden moottorit ovat käytännössä aina taajuusmuuttajaohjattuja, samoin prosessikäytössä olevien nosturien nostomoottorit. Harvemmin käytettävien, niin kutsuttujen asennusnosturien tapauksessa taajuusmuuttajaohjattujen osuus napavaihtomoottoreihin nähden vaihtelee nosturivalmistajasta riippuen, mutta suuntaus on viime vuosina ollut yhä enemmän taajuusmuuttajaohjattujen käyttöjen kasvamisen suuntaan. Taajuusmuuttaja mahdollistaa syöttötehon portaattoman säädön, jolloin haluttua nopeutta voidaan säädellä tilanteeseen sopivaksi. Taajuusmuuttajan avulla oikosulkumoottoria voidaan kuormittaa myös kentänheikennysalueella. Lisäksi taajuusmuuttajalla voidaan asettaa parametrien avulla kiihdytys- ja hidastusajat halutuksi, jolloin käynnistys- ja pysäytystilanteet eivät aiheuta äkillisiä liikkeitä.

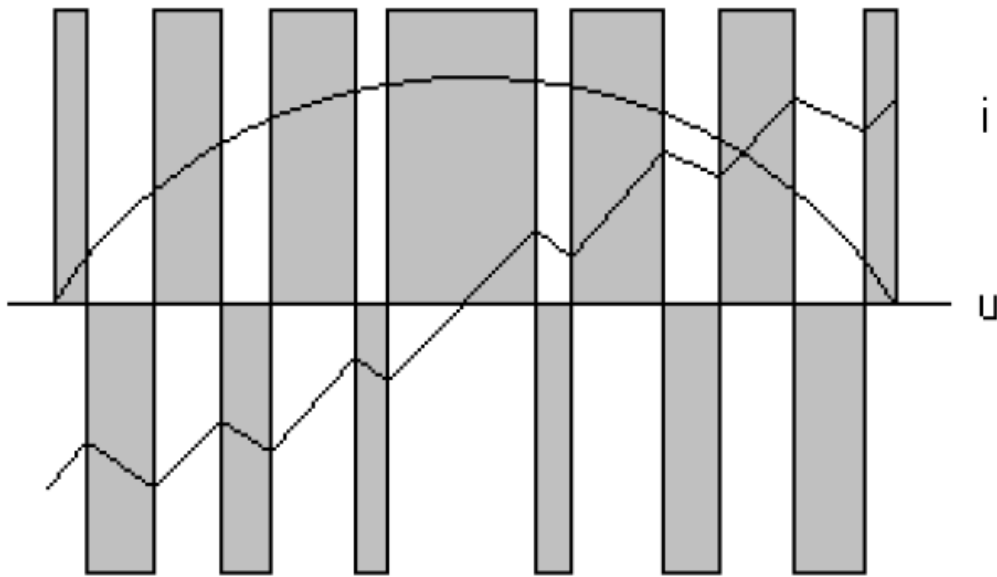
Taajuusmuuttaja voi olla jännite- tai virtavälipiirillinen, mutta jälkimmäinen on erittäin harvinainen nosturikäytössä, eikä sitä siksi käydä tarkemmin läpi. Esimerkki jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan päävirtakaaviosta on esitetty kuvassa 13. Taajuusmuuttajan

voidaan ajatella koostuvan neljästä osasta: tasasuuntaussilta, jarruvastus, välipiiri sekä vaihtosuuntaussilta. Vaihtosähköjärjestelmästä syötettävän taajuusmuuttajan tapauksessa taajuusmuuttajan sisääntulonapoihin tuleva jännite tasasuunnataan diodisillan avulla välipiiriin, josta se edelleen voidaan vaihtosuunnata moottorille sopivaksi vaihtojännitteeksi. Kun kuormaa lasketaan, palaa tehoa vaihtosuuntaussillan kautta välipiiriin. Koska toisella puolella on vain yhteen suuntaan johtava diodisilta, on palaava teho muunnettava lämmöksi jarruvastuksessa. Yleensä nostokäytöissä jarruvastuksen pitää pystyä kuluttamaan niin suuri energiamäärä, ettei sisäinen jarruvastus riitä. Vastuksen fyysisen koon kasvaessa tarvitaan ulkoinen jarruvastus, joka kytketään kuvassa 13 näkyvän jarruvastuksen tilalle. Jarruvastuksien välttämiseksi pitäisi nosturikäytössä olla taajuusmuuttajan diodisillan tilalla aktiivinen transistorien varustettu verkkosuuntaussilta, jonka avulla tehoa voidaan siirtää myös syöttävän verkon suuntaan. Tekniikka on nosturikäytössäkin olemassa. Menetelmää käytetään lähinnä suuremman kokoluokan prosessinostureissa, joissa jarrutustehot ovat melko suuria.



**Kuva 13 Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan pääpiirikaavio [31]**

Vaihtosuuntaussillassa on rinnankytketyt diodit mahdollistamassa moottorilta tulevan tehon generoitumisen välipiiriin. Varsinaiseen vaihtosuuntaukseen käytetään nykyään kytkiminä yleisimmin IGB-transistoreita, joiden kytkentätaajuus vaihtelee usein välillä 1-10 kHz [29]. Niiden ohjaus toteutetaan yleisimmin pulssinleveysmoduloinnilla (PWM), jolloin tarkoituksena on tuottaa tasajännitteestä mahdollisimman sinimuotoinen vaihtojännite. Kuvassa 14 on merkitty jännitteen ohjearvo  $u$ , jota ulostulojännitteen halutaan jäljittelevän. Pulssinleveysmoduloinnissa tuotetaan nimensä mukaisesti pulssimainen jännite. Kun kytkentätaajuus on riittävän suuri, on pulssinleveysmoduloinnin vaikutuksesta aikaansaatua virta  $i$  hyvin lähellä sinimäistä virtaa, joka on 90 astetta jännitettä jäljessä. [29]



**Kuva 14 PWM:n ulostulo. Vaihtosuunnattu jännite harmaalla [29]**

Taajuusmuuttaja aiheuttaa monenlaisia häviöitä riippuen sen käytöstä. Kuten kuvasta 14 nähdään, on vaihtosuuntauspiirin tuottama jännite pulssimaista, joka aiheuttaa moottorille harmonisia jännite- ja virtayliaaltoja. Niiden vaikutus moottoriin riippuu oikosulkumoottorin rakenteesta. Nosturikäyttöön suunnitellut oikosulkumoottorit voidaan suunnitella niin, että vaihtosuuntaussillasta aiheutuvat häviöt ovat mahdollisimman pienet [27]. Nämä taajuusmuuttajakäytön aiheuttamat häviöt on otettu huomioon jo luvussa 3.3.1 esitellyissä moottorin lisähäviöissä.

Jos pulssimuotoisesta jännitteestä halutaan tehdä mahdollisimman sinimäistä, on kytkentätaajuutta nostettava. Samalla kun pulssimuotoisen jännitteen muoto lähestyy sinimuotoista käyrää ja siten yliaaltojen aiheuttamat häviöt pienenevät, kasvavat kytkentähäviöt vaihtosuuntaussillassa. Lisäksi häviöitä tulee erilaisista sisäisistä johtavuushäviöistä ja välipiirin kondensaattorin häviöistä.

Taajuusmuuttaja on usein kytketty kolmivaiheiseen sähköjärjestelmään, jolloin se tasa-suunnataan diodisillan avulla. Diodisilta tekee tulevasta virrasta pulssimaista ja siten aiheuttaa syöttävään verkkoon jännitteen heikkenemistä säröytyneen virran johdosta. Lisäksi diodisillassa aiheutuu kytkinkomponenteissa eli diodeissa resistiivisiä johtavuushäviöitä.

Edellä on esitetty taajuusmuuttajan päävirtakaavio ja siinä aiheutuvia häviöitä. Edellä lueteltua voidaan kutsua taajuusmuuttajan teho-osaksi, sillä moottorin tarvitsema teho virtaa sen läpi. Kaupallinen versio taajuusmuuttajasta tarvitsee toimiakseen teho-osasta erillisen ohjausosan, jolle syötetään oma ohjausjännitteensä. Ohjausosalla voidaan ohjata taajuusmuuttajan teho-osan ulostulon määritteleviä transistoreja halutulla tavalla. Ohjausosaan

on myös mahdollista kytkeä erillisiin liitäntöihin sekä analogisia että digitaalisia signaaleja kiinni, joiden avulla voidaan mahdollistaa muun muassa turvaominaisuuksien kuten nopeusvalvonnan suoritus taajuusmuuttajan yhteydessä.

### 3.4 Siltanosturin sähköjärjestelmä

Siltanosturi tarvitsee toimiakseen sähköenergiaa. Moottorikäyttö on yhdistetty nosturin varsinaiseen pääjännitepiiriin. Tarvittaessa jännite muunnetaan nosturin sisäisessä sähköjärjestelmässä eri toimilaitteille sopivaksi. Esimerkiksi edellä esitellyn taajuusmuuttajan ohjausosa tarvitsee moottoreiden syöttöjännitepiiristä erillisen ohjausjännitteen, joka luodaan erillisen ohjausjännitemuuntajan avulla pääjännitepiiristä. Toisin kuin pääjännitepiiriin kytketyt toimilaitteet eli käytännössä kuormitukseen sidoksissa olevat moottorikäytöt, ohjausjännitteeseen kytketyt laitteet ja komponentit voivat kuluttaa jatkuvasti tehoa itsellensä ominaisen määrän. Tämä verrattain pientä tehoa kutsutaan yleisesti tyhjäkäyntitehoksi.

Nosturin sähköjärjestelmä pitää taajuusmuuttajien ja ohjausjännitemuuntajan lisäksi sisällään muitakin komponentteja ja niiden välistä kaapelointia. Esimerkkejä komponenteista ovat johdonsuojakatkaisijat, moottorinsuojakytkimet sekä erilaiset releet. Nosturin sähköpiirustusten ja kokonaisvaltaisen sähköjärjestelmän tarkastelu jätetään tässä työssä tekemättä. Työn kannalta kiinnostavaa tietoa on moottorikäyttöjen kautta kulkeutuva teho sekä jatkuvasti tehoa kuluttavien laitteiden yhteinen tyhjäkäyntiteho.

Kun nosturille syötetään sähköä sen toiminnan mahdollistamiseksi, puhutaan yleisesti virransyötöstä. Siltanosturin sähkösyöttö koostuu kahdesta osasta: koko nosturin virransyötöstä sekä vaunun ja nostimen virransyötöstä. Sekä sillan että vaunun liikuttamiseen kuin myös nostimen nostoliikkeeseen vaadittava mekaaninen energia tuotetaan moottoreilla. Siltanosturin pitää pystyä liikkumaan nosturirataa pitkin jouhevasti, ja liikkumismatka voi vaihdella muutamasta metrillä useisiin kymmeneen metriin. Tästä syystä siltanosturin virransyötön rakenne ei saa rajoittaa siltapalkin liikkumista. Sama pätee myös vaunun ja nostimen virransyötölle, joka kulkee siltapalkkia pitkin.

Nosturin ohjaus toteutetaan sähköisillä ohjaussignaaleilla, joita kuljetetaan vaunun virransyötössä käyttöjännitteen kanssa vierekkäisissä kaapeleissa. Ohjaimena käytetään kuvassa 6 esitettyä kaapelin päässä roikkuvaa painikeohjainta. Vaihtoehtoinen ohjausväline on radio-ohjain, jonka vastaanotin sijaitsee sillan sähkökaapissa.

Siltanosturin rakenteen esimerkkikuvassa 6 on vaunun virransyötössä käytetty riippukaapelimenetelmää, joka on kaapelivaunujen avulla kiinnitetty liukukiskoon. Kaapeli oikeine sitä suuremmaksi, mitä kauempana vaunu on riippukaapelin lähtöpisteestä. Mitä suurempi vaunu ja nostokoneisto, sitä useampi kaapeli kiinnitetään samaan kaapelivaunuun päällekkäin latoen. Toinen vaihtoehto vaunun virransyötölle on energiaketju, jossa kulje-



tettavat kaapelit on asetettu muovisen ketjun sisään. Kun vaunu on energiaketjun kiinnityspisteeseen nähden kauimmassa asemassa, on ketju lähes suora. Kun vaunu lähtee liikkumaan kohti kiinnityspistettä, taipuu ketju kaksin kerroin ohjainkourussaan. Molemmissa vaunun virransyöttöjärjestelmissä on etunsa: riippukaapelimenetelmällä voidaan toteuttaa käytännössä kuinka ison nosturin virransyöttö tahansa, eikä se rajaa erilaisia käyttäjän vaatimia optioita pois. Energiaketjussa ketjun koko asettaa rajoitetta sen sisälle mahtuvien kaapelien määrään, ja sitä myöten sillä voi olla hankalaa toteuttaa suurempia tai sähköjärjestelmän puolesta vaativampia nostureita. Toisaalta energiaketjulla ei ole vaaraa takertua liikkuaan mihinkään, sillä se on sijoitettuna siltapalkin kylkeen. Riippukaapelijärjestelmä voi aiheuttaa haasteita joissakin ympäristöissä, kun riippuvat kaapelit voivat takertua kiinni erilaisiin ulokkeisiin.

Kuvassa 15 on esitelty kaksi yleisintä koko siltanosturin virransyöttöön käytettyä tekniikkaa. Molemmissa perusidea on sama: toinen pää kiinnitetään kuvassa 6 esitettyyn sillan sähkökaappiin ja toinen pää rakennuksen sähköverkon liitäntäpisteeseen. Vasemman puoleisessa kuvassa on esitelty vaunun virransyötön kaltainen riippukaapelijärjestelmä. Oikean puoleisessa kuvassa on puolestaan virtakiskojärjestelmä, jossa kuparijohtimilla varustettu kisko pysyy paikallaan ja kiskon sisässä liikkuvan harjainvaunun avulla saadaan siirrettyä vaadittava teho siltanosturille. Oikeanpuoleisessa kuvassa näkyvät virtakiskojärjestelmän kupariliuskat sekä musta keräysvainu. Keräysvaunussa on hiilikontaktit, jotka keräysvaunun liikkuaessa pysyvät kontaktissa kupariliuskojen kanssa mahdollistaen energian siirtymisen. Virtakiskojärjestelmä on parempi vaihtoehto erityisesti ratkaisussa, jossa samalle nosturiradalle on siirretty useampi nosturi, sillä jokaiseen nosturiin voidaan kiinnittyä omalla harjainvaunullaan.

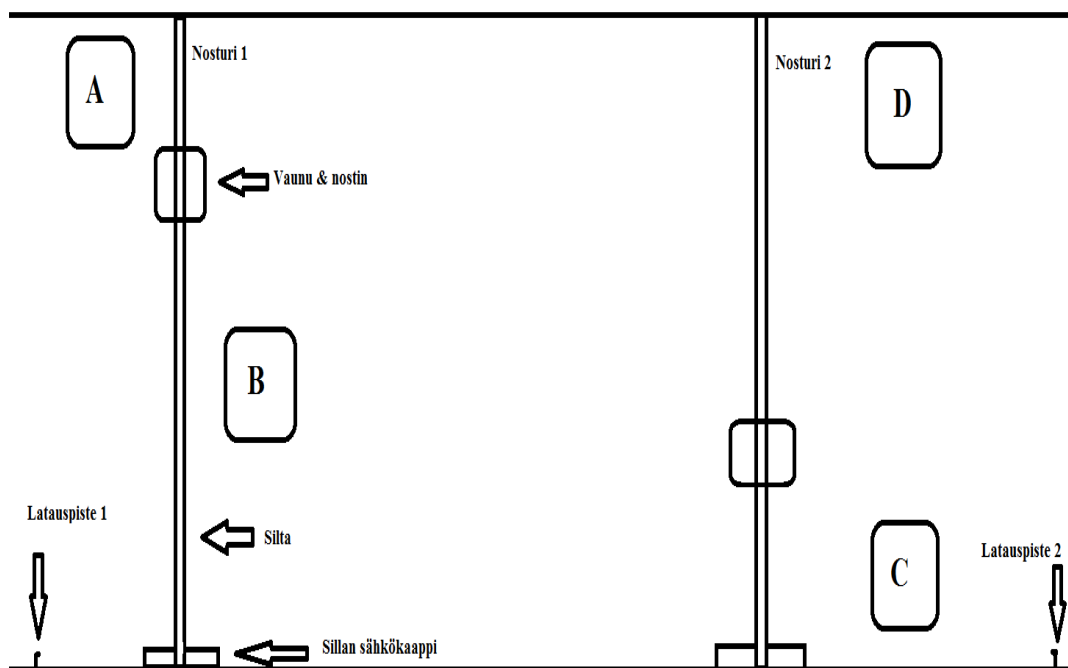


**Kuva 15 Riippukaapeli ja virtakisko [32,33]**

Molemmat tekniikat ovat luotettavia tekniikoita sähkön kuljettamiseen, mutta sisältävät mekaanisesti liikkuvia osia, jotka kuluvat käytössä. Kustannukset ovat molemmilla tekniikoilla samaa suuruusluokkaa, edullisempi vaihtoehto riippuu sekä käyttökohteesta että nosturiradan pituudesta. Varsinkin pitkien nosturiratojen kohdalla virransyöttöjärjestelmän kustannukset voivat nousta yllättävän korkeaksi suhteessa varsinaisen siltanosturin kustannuksiin, mikä antaa motivaation etsiä vaihtoehtoisia toteutustapoja nosturin sähköenergian toimittamiselle.

## 4. AKKUKÄYTTÖISEN SILTANOSTURIN MALLIN- NUS

Työn tarkoituksena on tutkia litiumioniakkujen hyödynnettävyyttä siltanosturin energia-  
varastona. Luvussa 2 perehdyttiin akkutekniikkaan ja luvussa 3 siltanosturin rakentee-  
seen. Korvaamalla luvussa 3.4.1 esitetty siltanosturin virransyöttö akustolla, voitaisiin  
siltanosturista tehdä liikkuva työkone, jonka tarvitsee vain käydä lataamassa energia-  
varastonsa tarpeellisin väliajoin. Muulloin siltanosturi liikkuisi akuston tarjoaman energian  
turvin nosturiradalla ilman kiinteää johdotusta rakennuksen sähköverkkoon. Yksinker-  
taistettu kuva tällaisesta järjestelmästä on esitetty kuvassa 16, jossa samalla nosturiradalla  
on sijoitettuna kaksi akkukäyttöistä siltanosturia. Kuvaan 16 on myös merkitty neljä työs-  
kentelyaluetta tunnuksin A-D.



***Kuva 16 Kaksi akkukäyttöistä siltanosturia samalla nosturiradalla***

Siltanosturit 1 ja 2 liikkuvat nosturiradalla. Nosturien akustot ovat sijoitettu sillan sähkö-  
kaappiin, ja ne tuottavat siltanosturin liikkeisiin vaaditun tehon ja energian. Esimerkki-  
kuvassa molemmille nostureille on omat latauspisteensä, joihin nosturi voidaan siirtää  
latautumaan, kun sitä ei tarvita. Latauspiste voi olla myös yhteinen, kunhan molemmat  
nosturit pystyvät siihen kiinnittymään. Kuormaa ajatellaan siirrettävän työpisteiden A-D

välillä. Tämän työn suorittaa esimerkin mukaisesti kaksi nosturia. Jos toinen nostureista on latauksessa, voi myös yksi nosturi suorittaa koko toimintaketjun siirtämällä kuorman haluttuun sijaintiin. Kiinteästi nosturiradalle asennettavan latauskontaktin asennukseen ja toteutukseen on teknisessä mielessä monia vaihtoehtoja, mutta niitä ei tässä työssä käsitellä.

Sillan sähkökaapissa on vastakappale latauspisteen kontakteille, joiden kautta rakennuksen sähköverkosta saadaan syötettyä nosturille sähköenergiaa. Sillan sähkökaapissa olevat vastakappaleet on kytketty akuston laturina toimivaan hakkuriteholähteeseen. Tuleva energia siirtyy hakkuriteholähteestä akustoon nostaen sen varaustasoa. Kun akuston akkukennojen varaustaso on yltänyt halutulle tasolle, lataus keskeytetään.

## 4.1 Mallin rakentaminen

Akuston koon mitoittamiseksi luodaan simulointimalli, jonka avulla voidaan arvioida erilaisten akustojen käytettävyyttä erilaisiin nosturitarpeisiin. Tässä luvussa esitellään, miten simulointimalli on luotu ja miten eri lohkojen käyttöön on päädytty. Simulointi tehdään Matlab Simulink-ohjelmistolla. Ideana on luoda nosturin toimintaa kuvaava malli, jossa voidaan tehdä järkeviä yksinkertaistuksia, jos niiden vaikutus lopputulokseen on vähäinen.

Simuloinnissa on tarkoituksena tutkia tehon virtausta akulta liikutettavalle massalle. Liikutettava massa voi olla silta, vaunu tai nostokuorma. Nosturin mallinnuksen ja sähköjärjestelmän kannalta oleellisia komponentteja käytiin läpi luvussa 3. Mallinnukseen otetaan omina komponentteinaan mukaan liikutettavat kuormat, moottorit jarruineen sekä taajuusmuuttajat. Lisäksi mallinnuksessa otetaan huomioon koko sähköjärjestelmää koskevat tyhjäkäyntitehot sekä taajuusmuuttajien sisäiset erilliset tyhjäkäyntitehot.

Teho virtaa akkukäyttöisessä toimilaitteessa akulta toimilaitteelle, kun laitetta käytetään. Mallinnuksen kannalta on järkevämpää mallintaa toimilaitteen vaatima teho ja syöttää se akulle tehotarpeena. Tehonvirtausketjun päättyessä akkuun saadaan siltä ulostulosuureina yksittäisen kennon virran, jännitteen ja varaustilanteen tilat. Päälohkokaavio simuloitavasta järjestelmästä löytyy liitteestä 1.

Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi mallinnuksen eri osiot ja miten ne on toteutettu. Simulointiajaksi on mallinnuksessa valittu 8 tunnin ajanjakso eli yhden tehtaan työvuoron mittainen aika. Järjestelmän syöttöparametreissa valitaan, kuinka usein työvuoron aikana nostosuorite tehdään. Nostosuuriteeseen liittyy käytännössä aina myös sillan ja vaunun siirtosuoritteet.

### 4.1.1 Kuorman mallinnus

Kuorman vaatima huipputeho on laskettu simulointimallissa kappaleessa 3 esitettyjen yhtälöiden (3.10) ja (3.15) avulla sillä erotuksella, että mekaaninen hyötysuhde lasketaan erikseen kuormafunktiolohkon jälkeisessä lohossa, jossa sen vaikutus huomioidaan. Todellisuudessa tehon funktio ei ole kuvien 8 ja 9 kaltainen askelmainen funktio, joka kuvaa momentin suuruutta ajan suhteen. Kiihdytyksen aikana teho nousee kohti huipputehon arvoaan, kunnes haluttu nopeus saavutetaan. Tällä ajanhetkellä tehontarve tippuu hieman alemmas, kun kiihdyttävää momenttia ei enää tarvita. Vakionopeusalueella toimitaan samalla teholla, kunnes liike halutaan pysäyttää. Tällöin todellisessa tilanteessa teho laskee hidastusajan aikana, kunnes vauhti on nolla, ja jarru sulkeutuu hävittäen myös kuorman aiheuttaman vakiomomentin.

Akkukäyttöisen nosturin kannalta kiinnostavia suureita kuormafunktiolta ovat huipputehon arvo sekä kokonaisenergian määrä. Huipputeho saadaan kiihdytyksen lopussa eli silloin, kun tavoitenopeus saavutetaan. Huipputehon arvo on kiintoisa, sillä akulta vaadittava huipputeho määrittää akun huippuvirran arvon. Kuten luvussa 2 esitettiin, liian korkeat virrat vaurioittavat akun rakennetta ja siksi niitä halutaan välttää.

Toinen kiinnostava suure on kuorman liikuttamiseen vaadittava energia, mikä saadaan integroimalla kulutettua tehoa ajan suhteen yhtälön (4.1) mukaisesti. Kun kuormaa nostetaan, on vakionopeudella nostettava aika usein yhdestä kolmeen minuuttia nostokorkeudesta ja nostomassasta riippuen. Kiihdytykseen ja hidastukseen aikaa kuluu usein yhteensä vain muutamia sekunteja. Valtaosa ajasta operoidaan siis vakionopeusalueella. Jos momenttien amplitudit eivät kiihtyvän liikkeen ja vakionopeudella tehtävän liikkeen aikana eroa liikaa toisistaan, on vakionopeudella kulutettava energia huomattavasti suurempi kuin kiihtyvän liikkeen aikana kulutettu energia. Siksi suurta energiavirhettä ei tapahdu, jos teho mallinnetaan vakiotehona koko kiihtyvän liikkeen aikana. Tämä yksinkertaistus huomioon ottaen yhden nostoliikkeen aikana kulutettava energia voidaan jakaa kolmeen osaan: kiihdytysosa, vakionopeusosa ja hidastusosa. Integroimalla näitä tehoja niiden kestoajalla, saadaan kokonaisenergia laskettua.

$$E_{ntot} = \int_{t_1}^{t_2} P_1(t) dt + \int_{t_2}^{t_3} P_2(t) dt + \int_{t_3}^{t_4} P_3(t) dt \quad (4.1)$$

Yhtälössä (4.1):

$E_{ntot}$	Kokonaisenergia
$P_1$	Kiihdyttävä teho
$P_2$	Vakionopeudella kuluva teho
$P_3$	Hidastava teho

Kuorman funktiona käytetään edellä esitetyn yksinkertaistuksen mukaisesti kuormatyy-  
pistä riippuen kuvien 4 ja 5 mukaista funktiota, jonka amplitudit kuvaavat tehon suu-  
ruutta. Tehon suuruudet eri tilanteissa määritetään yhtälöiden (3.10) ja (3.15) avulla.  
Amplitudien kesto saadaan taajuusmuuttajakäytölle määritettyjen kiihdytysaikojen pe-  
rusteella sekä nostokorkeuden avulla yleisesti tunnetuista yhtälöistä (4.2-4.6), kun nopeus  
muuttuu muutostilanteessa vakiokiihtyvyydellä nollan ja tavoitenopeuden välillä. Alain-  
deksi  $0$  tarkoittaa lähtöarvoa,  $k$  tarkoittaa kiihtyvyyttä,  $h$  hidastuvuutta ja  $v$  vakionopeutta.

$$y = y_0 + v_0 * t + \frac{1}{2}at^2 \quad (4.2)$$

$$y_k = \frac{1}{2}a_k t_k^2 \quad (4.3)$$

$$y_h = v_v * t_h + \frac{1}{2}a_h t_h^2 \quad (4.4)$$

$$y_v = y_{tot} - y_h - y_k \quad (4.5)$$

$$t_v = \frac{y_v}{v_v} \quad (4.6)$$

Yhtälöissä (4.2-4.6):

$y$  etäisyys  
 $a$  kiihtyvyyys

Kuormafunktion määrittelyssä käytetään apuna parametreja. Tarvittavat parametrit ovat  
nostokyky, haluttu nostokorkeus sekä haluttu nostonopeus. Edellä mainitut vaikuttavat  
myös valittavan moottorin valintaan, mutta puhdas kuormafunktio pystytään määrittä-  
mään näiden avulla. Kiihdytys- ja hidastusajat ovat taajuusmuuttajan ohjelmiston sisään  
ohjelmoituja aikoja, joita hyväksikäyttämällä myös vakionopeudella suoritettavaan liik-  
keeseen käytettävä aika voidaan laskea.

Mekaaninen hyötysuhde otetaan huomioon erillisessä lohossa, mikä täydentää kuorma-  
funktion vastaamaan yhtälöitä, jotka esitettiin luvuissa 3.1 ja 3.2. Siirtoliikkeen kohdalla  
vaiheportaiden lukumäärä vaikuttaa hyötysuhteeseen, nostoliikkeen kohdalla myös tela  
ja väkipyörien lukumäärä, joka on suoraan sidoksissa köysityksen rakenteeseen. Jokaista  
mekaanisen hyötysuhteen tekijää kohden käytetään hyötysuhteena 0,99. Jos nostokoneis-  
tossa on telan lisäksi neljä väkipyörää ja vaiheportaita kolme, niin hyötysuhteeseen vai-  
kuttavia tekijöitä on kahdeksan kappaletta. Näillä parametreilla kokonaishyötysuhde las-  
ketaan yhtälön (3.5) mukaisesti:

$$\eta = 0,99^8 = 0.9227$$

### 4.1.2 Moottorin ja jarrun mallinnus

Kun moottori muuntaa sähköisen tehon mekaaniseksi tehoksi tai päinvastoin, niin siinä tapahtuu myös häviöitä, kuten luvussa 3.3 esitettiin. Samaten luvussa 3.3 todettiin, että moottorin häviöt riippuvat kuormituksen suuruudesta. Häviöt ovat oleellinen osa tarvittavaa tehoa, joten ne on syytä mallintaa mukaan.

Moottoreista on usein saatavilla valmistajan toimittama hyötysuhdekartta, miten sen läpi virtaavan tehon hyötysuhde riippuu kuormituksesta. Hyötysuhteet mitataan erikseen moottori- ja generaattoritoiminnalle, sillä ne ovat erisuuria. Hyödyntämällä olemassa olevaa hyötysuhdekarttaa ei moottorin eri komponenttien aiheuttamia häviöitä tarvitse eritellä, vaan kokonaishyötysuhde voidaan syöttää simulointimalliin hakutaulukkona. Taulukkoon syötetään sisäänmenotietona kuormitus prosentuaalisena osuutena nimelliskuormasta, ja tämän tiedon perusteella taulukosta valikoituu ulostulosuureeksi kyseisen kuormitustason mukainen hyötysuhde riippuen siitä, toimiiko laite moottorina vai generaattorina. Tätä moottorin hyötysuhdetta käyttämällä saadaan määritettyä moottorissa kuluva häviöteho, joka lisätään kuormafunktion määrittämään tehoon.

Kun kuormaa ei liikuteta, ei myöskään tehoa kulu. Paikallaan ollessaan on kuormassa oleva jarru kiinni. Kiinni oleva jarru ei kuluta energiaa. Kun kuormaa halutaan liikutettavan, on kuormaa paikoillaan pitävä jarru avattava. Jarrun auki pitäminen vaatii virtaa, joten se kuluttaa luonnollisesti myös tehoa. Jarrunkin tapauksessa tiedetään valmistajan ilmoittama jarrun tehonkulutus, joten olemassa olevaa tietoa voidaan käyttää hyväksi. Jarrun auki pitämiseen vaadittava teho ei riipu kuormituksen suuruudesta. Pienemmän kokoluokan eli nostokyvyltään korkeintaan muutaman tonnin nosturissa on siirtoliikkeiden jarrut yhdistetty roottoriin, jolloin ne ottavat tarvitsemansa virran suoraan moottorin magnetointivirrasta. Simuloitavassa mallissa siirtomoottoreiden jarrut ovat edellä kuvattun kaltaisia. Näissä tapauksissa jarrun ottamaa tehoa ei tarvitse erikseen mallintaa, vaan se on jo otettu huomioon moottorin hyötysuhteessa.

### 4.1.3 Taajuusmuuttajan mallinnus

Luvussa 3.4 esiteltiin taajuusmuuttajan perustoiminta. Kuten moottorinkin tapauksessa, on taajuusmuuttajan kiinnostavin ominaisuus mallinnuksen kannalta siinä kuluva häviöteho. Taajuusmuuttajan sisäistä elektroniikkaa ja sen johdosta eri osille jakautuvaa häviötehoa ei tässä työssä syvällisesti tarkastella.

Taajuusmuuttajat kytkeytyvät normaalisti toimiessaan kolmivaiheverkkoon diodisillan kautta, jolla tasasuunnataan taajuusmuuttajalle tuleva jännite välipiiriin. Tutkittavassa konseptissa tätä ei kuitenkaan tapahdu, kun diodisiltoja ei käytetä hyväksi. Taajuusmuuttajan vaihtosuuntaussilta tarvitsee toimiakseen välipiiriin jännitteen. Tutkittavassa konseptissa kaikkien taajuusmuuttajien välipiirit kytketään yhteen. Tämä yhteinen välipiiri

kytketään tasavirtahakkuriin, joka nostaa akun jännitetason välipiirin vaatimalle jännitetasolle. Täten diodisillan aiheuttamia häviöitä ei tarvitse mallissa ottaa huomioon.

Kuten luvussa 3.4 todettiin, kuluu taajuusmuuttajassa kuormituksesta riippuvaa häviötehoa sekä jatkuvasti päällä olevaa vakioarvoista taajuusmuuttajan tyhjäkäyntitehoa. Käytettäessä kohdeyrityksen käyttämiä kaupallisia komponentteja, elektroniikan tehonkulutus saadaan komponenttitoimittajalta. Kuormituksesta riippuvalle teholle on määritettävissä hyötysuhde, kuinka paljon taajuusmuuttajan läpi kuormituksen aikana virtaavasta tehosta kuluu sisäisiin häviöihin. Häviöt ovat taajuusmuuttajalla kytkentätaajuudesta, -komponenteista sekä muusta sisäisestä rakenteesta riippuen usein 1-10 % luokkaa. [27] Käytettävien taajuusmuuttajien hyötysuhteen suuruus on tiedossa, ja keskimääräisenä häviöarvona käytetään 3 % kuormitustehosta. Myös tyhjäkäyntitehon arvo tiedetään, jolloin se voidaan syöttää simulointimalliin vakioarvona.

Akku on järjestelmässä kytketty hakkuriteholähteeseen, jolla akuston tuottama tasajännite saadaan nostettua haluttuun jännitetasoon. Konseptissa käytettävä hakkuri on saman tuotesarjan taajuusmuuttaja kuin moottorikäyttöjenkin taajuusmuuttajat, ainoastaan sisäinen ohjelmisto on eri. Potentiaaliltaan pienempi jännite kytkeytyy taajuusmuuttajan vaihtosuuntaussillan napoihin, joista se IGBT-sillan avulla nostetaan haluttuun tasasuunnattuun jännitteeseen. Vaihtosuuntaussillan häviöiden voidaan olettaa olevan samaa suuruusluokkaa normaalin taajuusmuuttajakäytön kanssa. Sama hakkuriteholähde toimii akkuja ladattaessa laturina, kun teho virtaa vaihtosuuntaussillan napoihin kytkettyjen käämien läpi akustoon.

#### 4.1.4 Sähköjärjestelmän muut häviöt

Sähköjärjestelmän häviöt käsittävät kahdenlaisia häviöitä: määrättyjen komponenttien tyhjäkäyntitehot sekä sähkön laadusta ja -siirrosta aiheutuvat johtavuushäviöt. Komponenttien tyhjäkäyntitehot on määritettävissä laskemalla kaikkien komponenttien erilliset tyhjäkäyntihäviöt yhteen. Nosturin sähköjärjestelmässä käytetään sähkömekaanisia kytkimiä eli releitä ja kontaktoreja. Ne ovat toiminnaltaan samanlaisia, mutta kontaktorien läpi kulkee suurempia virtoja. Releiden ja kontaktorien avulla järjestelmä voidaan kytkeä tilapäisesti virrattomaksi. Niiden lukumäärä vaihtelee muutamasta kappaleesta kymmeneen nosturista riippuen. Kontaktorit ovat jatkuvasti kytkettynä päälle, joten ne kuluttavat nosturissa tyhjäkäyntitehoa. Asennuskäyttöön tarkoitettussa pienemmän kokoluokan siltanostureissa kontaktoreita on usein vain muutama kappale.

Painikeohjainkäytöisessä, sähköjärjestelmältään yksinkertaisessa siltanosturissa on kontaktorien lisäksi tyhjäkäyntitehoa kuluttavana laitteena päällä ohjausjännitemuuntaja, jonka avulla luodaan taajuusmuuttajien ja muiden laitteiden tarvitsema ohjausjännite. Ohjausjännitemuuntajan läpi ei virtaa suurta määrää tehoa, ja siinä tapahtuvat rautahäviöt ovat pääsääntöisesti hyvin pieniä. Jos nosturin ohjaus on toteutettu painikeohjaimen sijasta radio-ohjaimella, on sillan sähkökaapissa sijaitseva radion vastaanotin pidettävä



koko ajan päällä. Radio kuluttaa siten jatkuvasti tehoa. Muita tyhjäkäyntitehon aiheuttajia voivat olla erilaiset etävalvontaan tai muihin älytoimintoihin sidoksissa olevat laitteet, kuten nosturin sisäiset teollisuustietokoneet, jotka kuluttavat jatkuvasti verrattain suurikin tehoja. Nämä älykkäät laitteet ovat kuitenkin toistaiseksi harvinaisempia pienemmän kokoluokan nostureissa.

Sähkön siirto tapahtuu virransyötössä kuparia pitkin, jolloin kuparissa syntyy resistiivisiä häviöitä. Häviöitä syntyy käytännössä vain silloin, kun kuormitus on päällä, jolloin kuparia pitkin siirtyy sähkövirtaa. Virransyötössä aiheutuvat häviöt tapahtuvat siis käytännössä vain kuormituksen aikana ja ne ovat kuormituksen vaatimaan tehoon verrattuna merkityksettömiä, joten niitä ei erikseen mallinneta. Akun syöttämä energia on hyvin tasalaatuista. Rakennuksen sähköverkosta erillisenä yksikkönä se ei aiheuta nosturin sähköjärjestelmään sisäisiä tehohäviöitä sähkön laadun heilahtelun takia. Tämä voi olla ongelma normaalissa virransyöttöratkaisussa, jos nosturi on kytkeytynyt laadultaan heikkoon sähköverkkoon.

Simulointimallin kannalta järjestelmän muut tyhjäkäyntihäviöt syötetään parametrina, jonka arvo voidaan määrittää vastaamaan haluttua nosturia. Tyhjäkäyntihäviöt saadaan laskemalla yhteen ohjauksen jännitemuuntajan, kontaktorien, mahdollisen radiovastaanottimen sekä muiden mahdollisten laitteiden kuluttamat tyhjäkäyntitehot. Kuormituksesta riippuvia tehohäviöitä ei simulointimallissa mallinneta.

#### 4.1.5 Akun mallinnus

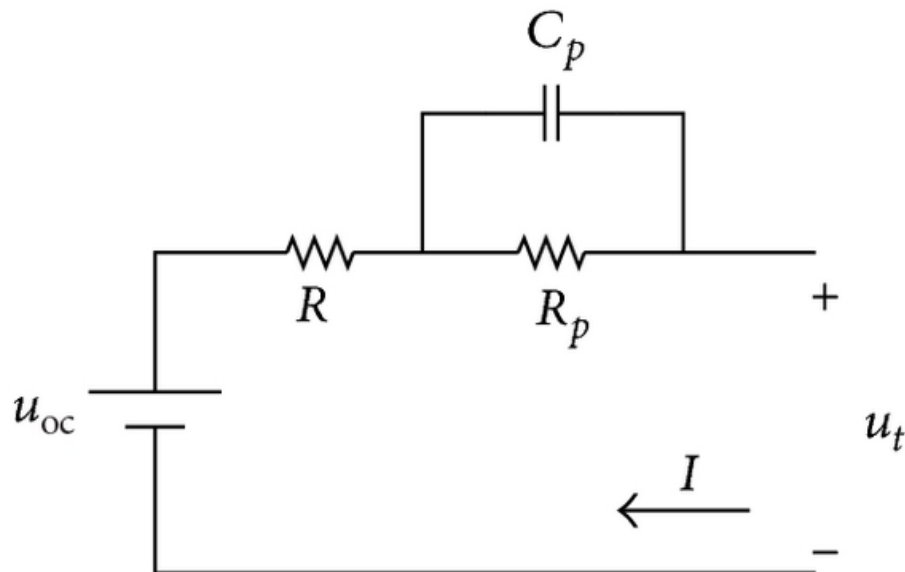
Акun mallinnukseen liittyviin tekijöihin perehdyttiin luvussa 2. Akku pitää suunnitella osaksi järjestelmää siten, että siitä saadaan suurin mahdollinen hyöty käyttöön. Akun ei haluta kokevan sellaista kuormitusta, jolla olisi sen toimintakykyä haittaavaa vaikutusta. Kuten todettua luvussa 2, liian korkeat virrat ovat akulle haitallisia, sillä ne voivat aiheuttaa sekä kapasiteetin menetystä että eliniän laskua. Siksi akku pitää mitoittaa siten, ettei akusta otettava purkuvirta ylitä haluttuja raja-arvoja. Toisekseen akku pitää pyrkiä pitämään sopivalla varaustasoalueella, joka on verrannollinen akun jännitteeseen. Liian lähellä akun teoreettista maksimijännitettä alkaa luvun 2 mukaisesti sivureaktioiden vaara, jolloin akun kapasiteetti voi laskea, mikä lyhentää sen käyttöikä. Myös liian alhaisella jännitetasolla voi tapahtua sama ilmiö. Ladattaessa akkua pitää huolehtia siitä, että akkua ei ladata liian täyteen. Purettaessa akkua täytyy huolehtia, että akku on mitoitettu niin, ettei sitä jouduta purkamaan liian usein liian tyhjäksi. Lisäksi toimintakykyyn vaikuttaa operointilämpötila. Siltanosturi on yleisesti suunniteltu toimivaksi sisätiloissa 10–40 asteen lämpötiloissa, mikä on sama kuin akulle suositeltu lämpötila-alue. Lämpötilavaihteluita ei erikseen tässä työssä mallinneta eikä niitä myöskään arvojen asettamisessa oteta huomioon.

Mallinnuksen kannalta latausta ei erikseen mallinneta, mutta varaustaso latauksen jälkeen otetaan huomioon määrittämällä varaustaso latauksen jälkeen halutuksi. Ikääntymistä ei

tehtävällä mallilla voida mallintaa, mutta sen vaikutusta voidaan ottaa huomioon asettamalla akun varaustason ylä- ja alarajat sellaisiksi, ettei akku joudu toimimaan varaustason ääripäissä.

Suurinta yksittäisestä akkukennosta otettavaa virtaa halutaan tarkkailla. Lisäksi koko akuston tuottama virta on kiinnostava suure hakkuriteholähteen mitoituksen kannalta. Huippuvirta määrittää hakkurilta vaaditun virtakestoisuuden ja sen myötä vaadittavan fyysisen koon. Virta on suurimmillaan jännitteen ollessa minimiarvossaan, jos teho on vakio. Suurin mahdollinen virta tarkastellaan mitoituksen kannalta erityisesti silloin, kun jännite on sallitulla alarajallaan.

Akun mallinnuksessa pitää valita malli, jonka pohjalta akkua mallinnetaan. Kuten luvussa 2 esitettiin, voidaan akku mallintaa sähkökemialliselta, piiriteorialliselta tai matemaattiselta pohjalta. Mallinnettavan akun valinta riippuu sekä käytettävissä olevista tiedoista että valitusta akkumateriaalista. Tässä työssä akun mallintamiseen lähtökohtana käytetään niin sanottua Theveninin mallia. Theveninin malli on yksinkertainen akun mallinnuksen menetelmä, jossa akkukennoa mallinnetaan kuvan 17 mukaan. Malli on kuitenkin yllättävän tarkka verrattuna monimutkaisempien mallien antamiin tuloksiin, kuten Hu et al. tutkimuksessaan [12] osoittivat.



**Kuva 17 Theveninin malli akusta**

Kuvassa 17:

$u_{oc}$	Akun avoimen piirin jännite
$R$	Sarjaresistanssi
$R_p$	Polarisaatioresistanssi
$C_p$	Polarisaatiokapasitanssi

$u_t$  Akun napajännite  
 $I$  Akun virta

Malli koostuu yllä esitetyistä komponenteista. Sarjavastus  $R$  kuvaa akun sisäistä resistanssia ja rinnankytkennässä esiintyvät  $C_p$  ja  $R_p$  kuvaavat akun muutostilanteiden kannalta merkityksellisiä polarisaatioresistanssia ja -kapasitanssia. Hieman tarkemmassa mallissa otetaan huomioon termit  $C_p$  ja  $R_p$  erikseen lataus- ja purkutapahtumalle, sillä niiden arvo on erilainen lataus- ja purkutilanteissa. Kuvasta 17 voidaan johtaa akun mallintamiseen liittyen yhtälöt (4.8-4.9):

$$u_t = u_{oc} - R * I - u_p \quad (4.8)$$

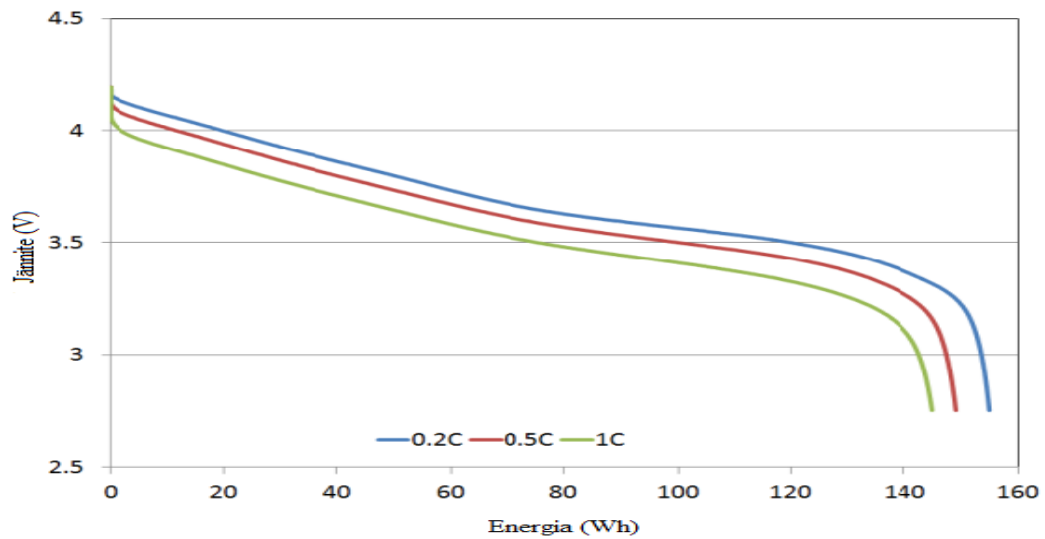
$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{C_p} * I - \frac{1}{C_p R_p} * u_p \quad (4.9)$$

Yhtälöissä (4.8-4.9):

$u_p$  polarisaatiojännite

Valmistustoleranssien ollessa hyvin pienet, ovat erot yksittäisten kennojen välillä mallinnuksen kannalta merkityksettömiä. Tällöin akun yhteisvirta on yksittäisen kennon virta kerrottuna rinnankytkettyjen kennojen määrällä. Akun kokonaisjännite puolestaan on yksittäisen kennon jännite kerrottuna sarjaankytkettyjen kennojen määrällä.

Edellä esitetyn mallin käyttö edellyttää akun ominaisuuksien ja suureiden tuntemista. Eri-tyisesti Theveninin mallissa esitetyt resistanssien ja kapasitanssin arvot määrittävät paljon akun toiminnasta. Akkujen datalehdiltä näitä arvoja ei kuitenkaan yleensä löydy, eikä niitä myöskään tässä työssä mallinnettaviin akkuihin löydetty. Sen sijaan eri akkukemioihin on usein käytettävissä tyypillinen kuormituskäyrästä. Ottamalla huomioon datalehdiltä saatavat nimellisjännitteen ja kapasiteetin arvot voidaan kuormituskäyrästä sovittaa kyseisiin arvoihin. Esimerkki sovitetusta kuormituskäyrästä on kuvassa 18. Käyrien avulla voidaan tarkastella, kuinka akku käyttäytyy eri tilanteissa. Käyrissä on otettu huomioon Theveninin mallissa esiintyvät resistanssit ja kapasitanssi, ja käyrän jännite vastaa Theveninin mallin ulostulojännitettä  $u_t$ . Kuormituskäyrästä sijoitetaan simulointimalliin hakutaulukkona. Kuvaus kuormituskäyrästölölkön toiminnasta löytyy liitteestä 1.



*Kuva 18 Akun jännitteen ja luovutetun energian kuvaaja. Muokattu lähteestä [34].*

## 4.2 Simulointimallin käyttö

Simulointimalli on rakennettu Matlab Simulink -ohjelmistolla. Mallin eri osioiden sisältöjä on esitetty liitteessä 1. Mallissa on käytetty simulointiaikamääränä minuutteja ja oletussimulointiaika on 480 aikayksikköä eli tässä tapauksessa 480 minuuttia, joka vastaa 8 tuntia.

Ennen kuin simulointimalli voidaan käynnistää, täytyy mallin toimintaa varten syöttää mallinnusparametrit. Malliin liittyen on luotu kaksi parametritiedostoa. Ensimmäinen on syvemmällä tasolla hierarkiassa, jonka arvojen oletetaan pysyvän pääsääntöisesti vakiona. Tiedosto sisältää esimerkiksi akun, moottorien ja taajuusmuuttajien parametreja sekä laskukaavoja eri suureille, jotka mallissa tarvitaan. Vaihdettaessa käytettävät taajuusmuuttajat, nosto- tai siirtokoneistot, pitää nämä tiedot päivittää.

Toinen tiedosto sisältää ennen simulointia käsin syötettävät parametrit. Kun parametrit on syötetty, voidaan tiedosto ajaa Matlabin komentoikkunassa, jolloin ensimmäisen parametritiedoston sisällä olevat laskukaavat suoritetaan ja tarvittavat suureet tallentuvat Matlabin työkirjastoon. Syötettävät parametrit liittyvät akkupaketin kokoon sekä nosturilla toteutettaviin kuorma nosto- ja siirtoliikkeisiin.

Kun parametrit on syötetty, voidaan malli käynnistää. Mikäli mallinnuksen aikana akun virta ylittää sallitun purku- tai latausvirran raja-arvon, tai akun varaustaso tippuu liian matalaksi, keskeytyy simulointi. Järjestelmä ilmoittaa, kumpi rike on tapahtunut. Jos järjestelmä toimii koko mallinnusajan sallituissa toimintarajoissa, suoritetaan mallinnus loppuun asti ilman häiriötä. Mallinnuksen jälkeen voidaan kulunut energiamäärä sekä varaustason lopputilanne tarkistaa.

## 5. MALLIN JA TULOSTEN ANALYSOINTI

Simulointimallia testataan kolmella eri akulla kolmessa eri kuormitustilanteessa. Tässä luvussa esitellään mallinnettava järjestelmä sekä mallinnuksen tulokset.

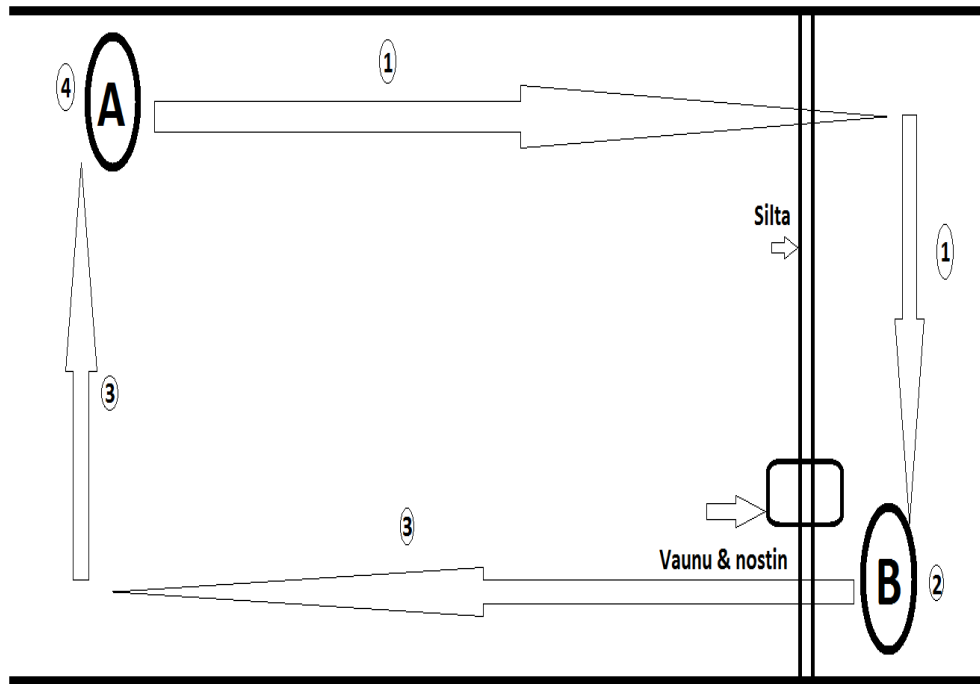
### 5.1 Mallinnettavan nosturin mitoitus

Ennen kuin simulointimallia voidaan käyttää, pitää sille määrittää parametrit. Tässä työssä käytettyjen parametrien arvojen valinta pohjautuu alaluvuissa 5.1.1 ja 5.1.2 esiteltyihin perusteluihin ja valittuihin kriteereihin.

#### 5.1.1 Nosturin teho- ja energiavaatimukset

Nosturin vaatima teho ja kuluttama energia määräytyvät syötettävien parametrien mukaan. Kuorman liikuttamiseen vaadittava teho lasketaan yhtälöiden (3.10) ja (3.15) perusteella ottaen huomioon luvussa 4.1.1 mallinnukseen tehdyt yksinkertaistukset. Parametreissa valitaan erikseen sillalle, vaunulle ja nostettavalle kuormalle niiden massa sekä haluttu liikenopeus. Yksittäisen nostotapahtuman toimintajärjestys, eli kuorman liikuttaminen pisteestä B pisteeseen A on esitetty kuvassa 19.

- 1) Nostin siirretään sillan ja vaunun avulla pisteestä A pisteeseen B
- 2) Kuorma nostetaan nostimella haluttuun korkeuteen
- 3) Kuorma ja nostin siirretään sillan ja vaunun avulla pisteestä B pisteeseen A
- 4) Kuorma lasketaan nostimella alas halutulle tasolle



**Kuva 19 Kuorman liikuttaminen pisteestä B pisteeseen A**

Simuloinnissa tutkitaan kolmen eri nosturikuormituksen vaikutusta vaadittavaan akustoon. Kulutettu kokonaisenergia saadaan integroimalla järjestämän yhdistettyä tehofunktiota simulointiajan suhteen. Simulointiaika asetetaan vastaamaan yhden työvuoron pituista ajanjaksoa eli 8 tuntia, jonka aikana kuormaa liikutetaan 30 kertaa. Nostimen massan ajatellaan sisältyvän vaunun massaan, joten sitä ei erikseen tarvitse parametriksi syöttää. Kaikki nosturit ovat mekaaniselta rakenteeltaan yhteneviä ja niiden nimellisnostokyky on 5000 kg. Myös nosto- ja siirtomatkat sekä nopeudet määritellään yhtä suuriksi jokaisessa kolmessa tapauksessa.

Järjestelmän tyhjäkäyntitehot vaihtelevat nosturin sähköjärjestelmän rakenteesta riippuen. Nosturit 1 ja 2 ovat sähköjärjestelmältään identtisiä. Nosturilla 1 nostetaan 3000 kg kuormaa ja nosturilla 2 nostetaan 5000 kg kuormaa. Nosturilla 3 nostetaan nosturin 1 tavoin 3000 kg kuormaa, mutta sähköjärjestelmältään nosturi 3 on erilainen. Nosturilla on määritetty tyhjäkäyntitehoksi 100 W, mikä on selvästi nostureiden 1 ja 2 tyhjäkäyntitehoa (15 W) suurempi. Syötettävät parametrit on esitetty taulukossa 2, jossa toisistaan eroavat parametrit on korostettu.

**Taulukko 2 Nosturin määrittämissparametrit**

Parametri	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3
Nostokorkeus (m)	6	6	6
Nostonopeus (m/min)	5	5	5
Nostettava kuorma (kg)	<b>3000</b>	<b>5000</b>	<b>3000</b>
Vaunun siirtomatka (m)	10	10	10
Vaunun siirtonopeus (m/s)	42	42	42
Vaunun massa (kg)	300	300	300
Sillan siirtomatka (m)	25	25	25
Sillan siirtonopeus (m/min)	42	42	42
Sillan massa (kg)	2200	2200	2200
Nostotapahtumien lukumäärä	30	30	30
Tyhjäkäyntiteho (W)	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>100</b>

### 5.1.2 Akuston mitoituskriteerit

Tutkittaviksi akkukemioiksi valittiin LTO, LFP ja LNMC. Järjestelmän syöttöparametreissa valitaan, mikä akkukemia valitaan simuloinnin kohteeksi. Samalla syötetään tutkittavan akkukemian yksittäisen kennon kapasiteetti. Simulointia varten jokaisesta akkukemiasta on valittu fyysiseltään kooltaan samanlainen, luvussa 2 esitelty 18650-akkukemio. Akkukemiojen tarkemmat ominaisuudet on esitetty taulukossa 3 ja lähteissä [35,36,37]. Määrittämällä sarjaan- ja rinnankytkettyjen akkukemiojen lukumäärä halutuksi, voidaan simulointimallilla todentaa kyseisen akuston käyttäytyminen käytettävällä kuormituksella. Mitoitusperusteena käytetään akun purku- ja latausvirtarajojen lisäksi akun varaustason ylä- ja alarajoja, sekä hakkuriteholähteen virtarajaa.

**Taulukko 3 Akkujen ominaisuudet**

Suure	LNMC	LFP	LTO
Nimellisjännite (V)	3,65	3,2	2,4
Kapasiteetti (Ah)	2,0	1,55	1,1
Suurin jatkuva purkuvirta (A)	4,0	5,5	11
Suurin jatkuva purkuvirta (C-arvo)	2C	3,5C	10C
Suurin jatkuva latausvirta (A)	2,0	1,55	5,5
Suurin jatkuva latausvirta (C-arvo)	1C	2C	5C

Akun varaustasolle määritetään toiminta-alue, jolla akun halutaan toimivan. Luvussa 2.2.3 esitettiin lähteisiin [19,20,21] nojaten, että akun ikääntyminen nopeutuu, jos akkua

kuormitetaan varaustason ääripäissä. Käyttöään maksimoimiseksi on järkevää rajoittaa varaustason aluetta molemmista päistä. Sopivat arvot vaihtelevat hieman akkukemiasta riippuen, mutta tässä työssä kaikille kolmelle simuloitavalle akkukemialle käytetään samoja raja-arvoja. Akun jännite romahtaa hyvin nopeasti matalilla arvoilla, mikä voi johtaa haitallisten sivureaktioiden toteutumiseen. Alarajaksi valitaan sellainen arvo, että akun SOC-jännite -käyrien arvot eri kuormitusvirroilla ovat liitteen 2 mukaisesti vielä lineaarisesti käyttäytyvällä osuudella. Valitut raja-arvot on esitetty alla.

$$\text{SOC}_{\min} = 15 \%$$

$$\text{SOC}_{\max} = 90 \%$$

Hakkuriteholähde on samaa tuotesarjaa moottorikäyttöjen taajuusmuuttajien kanssa, vain toiminnan määrittävä ohjelmisto on erilainen. Hakkuriteholähteen mitoituksessa tärkein perusta on sen virtakestoisuus. Mitä suurempaa virtaa pitää pystyä käsittelemään, sitä suuremman teho-osan se vaatii. Teho-osan kasvusta seuraa sekä laitteen fyysisen kokoluokan kasvu että kustannusten selvä nousu. Mitoitusperusteeksi valitaan etukäteen haluttu hakkuriteholähde, jolle on määritetty kaksi tiedossa olevaa virtarajaa: jatkuvan käytön raja sekä lyhyen pulssimaisen virran raja. Valitut virtarajat on esitetty alla.

$$I_{\text{käyttö}} = 24 \text{ A}$$

$$I_{\text{pulssi}} = 36 \text{ A}$$

Akuston kennojen lukumäärää ei suoraan pysty laskemaan. Ottamalla virtarajat huomioon saadaan kuitenkin käsitys jännitteestä, joka akuston pitää pystyä tuottamaan. Jos nosto toteutetaan luvussa 5.1.1 määritetyn kierron mukaisesti, on suurin kuormituksen kuluttama teho nostoliikkeen ylöspäin suuntautuva kiihdytysteho. Kun tähän lisätään järjestelmän eri komponenteista aiheutuvat tehohäviöt, saadaan akustolta vaadittava maksimiteho laskettua. Maksimitehon ja suurimman taajuusmuuttajalle sallitun virran perusteella voidaan pienin vaadittava akuston jännite määrittää yhtälön (5.1) perusteella.

$$P_{MAX} = U_{MIN} * I_{MAX} \quad (5.1)$$

Pienimmän jännitteen arvoa voidaan käyttää alkuarvauksena akuston sarjaankytkettyjen kennojen määrän määrittämisessä. Pienin jännite esiintyy mallinnettavan toimintajakson loppuhetkellä, kun varaustaso on laskenut alimmilleen. Simuloinnissa on tarkoitus löytää pienin mahdollinen akkukennojen määrä, mitä rinnan- ja sarjaankytkentäyhdistelmillä voidaan muodostaa annetut mitoitus ehdot huomioon ottaen. Pienin määrä riippuu sekä nosturin teho- että energiatarpeesta määritellyllä ajanjaksolla.



## 5.2 Mallinnuksen tulokset

Mallia simuloitiin kolmella eri kuormituksella ja kolmella eri akkukemialla. Taulukoissa 4-6 on esitetty eri materiaaleille simuloidut akustojen minimikoot kaikilla kolmella luvussa 5.1.1 määritellyillä nostureilla. Nosturin 2 tiedettiin eroavan nostureista 1 ja 3 nostettavan kuorman suuruuden osalta, joka tarkoittaa korkeampaa huipputehoa. Lisäksi tiedettiin, että nosturi 1 ja 2 eroavat energiatarpeiltaan, vaikka huipputehon suuruus on suunnilleen sama. Simuloinnin jälkeen huomattiin, että nosturin 2 vaatima energiamäärä on hyvin lähellä nosturin 3 energiamäärää. Nosturilla 3 oli nosturiin 2 verrattuna selvästi pienempi huipputehon arvo, mutta nostosuoritusten välissä oleva tyhjäkäyntiteho puolestaan huomattavasti korkeampi. Simuloinnissa huomattiin, että hakkuriteholähteen maksimivirtaraja (36 A) ja latausvirran akkukemiakohtainen virtaraja eivät olleet rajoittavia tekijöitä. Rajoittaviksi tekijöiksi nousivat tilanteesta riippuen akkukennon virta, hakkuriteholähteen jatkuvan käytön virta (24 A) sekä varaustaso.

Taulukossa 4 on esitetty simulointitulokset, kun käytetty akkukemia on LNMC. Simuloidujen nosturien 1 ja 3 vaatimat akkupaketin kennomäärät ovat hyvin lähellä toisiaan, vaikka niiden energiamäärä eroaakin toisistaan. Nosturissa 3 saadaan akun kapasiteetti paremmin hyödynnettyä, kun nosturissa 1 kapasiteettia jää noin 15 % enemmän käyttämättä. Nosturin 2 vaatima akkukennon määrä on kahta muuta nosturia huomattavasti suurempi. Myös nosturissa 2 jää akun kapasiteetista huomattava osuus käyttämättä. Hakkuriteholähteen virta ei millään arvolla noussut lähelle sallittua ylärajaa. Rajoittava tekijä kaikissa kolmessa nosturissa oli yksittäisen kennon sallima virta, jonka yläraja on valittu LNMC-kennolla 4 A. Jos kennokohtaista virtaa olisi haluttu pienentää, olisi se vaatinut yhden rinnankytkennän lisäämistä. Kun sarjaankytkennän määrää ei voi hakkuriteholähteen virtakestoisuuden vuoksi liikaa pudottaa, ei yhden rinnankytkennän lisäämisellä saataisi kennojen kokonaismäärää pudotettua.

**Taulukko 4 LNMC:n simuloidut arvot**

LNMC	Nosturi 1	Nosturi 2	Nosturi 3
Huipputeho (W)	3776	6100	3861
Energia (Wh)	1891	2532	2577
Sarjaankytkentä (kpl)	58	78	52
Rinnankytkentä (kpl)	5	6	6
Kennomäärä (kpl)	290	468	312
Maksimivirta/kenno (A)	4,00	3,96	3,89
Minimivirta/kenno (A)	-1,65	-1,80	-1,51
DCDC virta (A)	18,60	22,61	22,54
DCDC max virta (A)	20,00	23,74	23,32
SOC lopussa (%)	32,36	41,69	17,51
Jännite lopussa/kenno (V)	3,51	3,54	3,41
Jännite lopussa/akusto (V)	203,58	276,12	177,32

Taulukossa 5 on esitetty simulointitulokset, kun käytetty akkukemia on LFP. Nosturilla 1 on selvästi pienin määrä kennoja. Nosturien 2 ja 3 kennomäärä on melko lähellä toisiinsa, mutta niiden kytkentäyhdistelmät eroavat toisistaan. Nosturissa 3 on 31 kennoa vähemmän sarjaankytkettynä vaaditun huipputehon takia. Yksittäisen kennon virtaraja ei ole millään nosturilla määrittävä tekijä, sallittuun virtarajaan on selvä marginaali kaikissa kolmessa nosturissa. Määrittävä tekijä on akun kapasiteetti, joka saadaan jokaisella kolmella nosturilla käytettyä melkein asetettuun alarajaan (15 %) asti. Lisäksi nostureissa 2 täytyi ottaa hakkuriteholähteen virtaraja huomioon. Jotta hakkuriteholähteen virta pidetään sallitun raja-arvon alapuolella, on sarjaankytkettynä oltava riittävä määrä kennoja riittävän suuren jännitteen luomiseksi.

**Taulukko 5 LFP:n simuloitut arvot**

LFP	Nosturi 1	Nosturi 2	Nosturi 3
Huipputeho (W)	3776	6100	3861
Energia (Wh)	1891	2532	2577
Sarjaankytkentä (kpl)	54	92	61
Rinnankytkentä (kpl)	6	5	7
Kennomäärä (kpl)	324	460	427
Maksimivirta/kenno (A)	4,13	4,77	3,10
Minimivirta/kenno (A)	-1,66	-2,06	-1,21
DCDC virta (A)	23,44	23,17	20,46
DCDC max virta (A)	24,80	23,88	21,71
SOC lopussa (%)	15,15	16,41	15,02
Jännite lopussa/kenno (V)	3,17	3,17	3,17
Jännite lopussa/akusto (V)	171,18	291,64	193,37

Taulukossa 6 on esitetty simulointitulokset, kun käytetty akkukemia on LTO. Nosturien 2 ja 3 akustojen kennojen lukumäärä on hyvin lähellä toisiaan, nosturilla 1 akuston koko on huomattavasti pienempi. Toisaalta nosturissa 1 ja 3 on sarjaankytkettyjen kennojen lukumäärä lähes identtinen, ainoastaan kytkentäyhdistelmät ovat erilaiset. Määrittävä tekijä akuston mitoituksessa on kapasiteetti, joka saadaan kaikilla kolmella akustolla hyödynnettyä lähes kokonaan sallittuun alarajaan asti. Myös hakkuriteholähteen virtaraja on otettava huomioon akuston koon määrittelyssä. Varsinkin nostureilla 1 ja 3 virtaraja on hyvin lähellä sallittua ylärajaa (24 A). Samoin kuin LFP:llä, myös LTO:lla energiamääriltään yhtä suuret nosturit 2 ja 3 vaativat kennomäärältään lähes yhtä suuren akuston. Erityisesti LTO:n kohdalla on huomioitava, että purku- ja latausvirrat jäävät hyvin kauaksi sallituista raja-arvoistaan 11 A ja 5,5 A, vastaavassa järjestyksessä.

**Taulukko 6 LTO:n simuloidut arvot**

LTO	Nosturi 1	Nosturi 2	Nosturi 3
Huipputeho (W)	3776	6100	3861
Energia (Wh)	1891	2532	2577
Sarjaankytkentä (kpl)	65	115	66
Rinnankytkentä (kpl)	9	7	12
Kennomäärä (kpl)	585	805	79
Maksimivirta/kenno (A)	2,85	3,36	2,10
Minimivirta/kenno (A)	-1,23	-1,58	-0,86
DCDC virta (A)	23,94	22,57	23,74
DCDC max virta (A)	25,54	23,56	25,24
SOC lopussa (%)	16,05	15,85	17,24
Jännite lopussa/kenno (V)	2,36	2,36	2,37
Jännite lopussa/akusto (V)	153,40	271,40	156,42

Taulukossa 7 on yhdistetty kaikkien kolmen nosturin akustojen koot ja jäljelle jäänyt kapasiteetti kaikilla kolmella akkukemialla. Tuloksista on nähtävissä, että LTO:lla toteutettu akusto vaatii selvästi eniten kennoja. Nostureilla 1 ja 3 pienin akusto saavutetaan käyttämällä LNMC:tä, mutta nosturilla 2 pienin kennojen lukumäärä saadaan LFP:llä.

**Taulukko 7 Akustojen koko ja kapasiteetti eri nosturityypeillä**

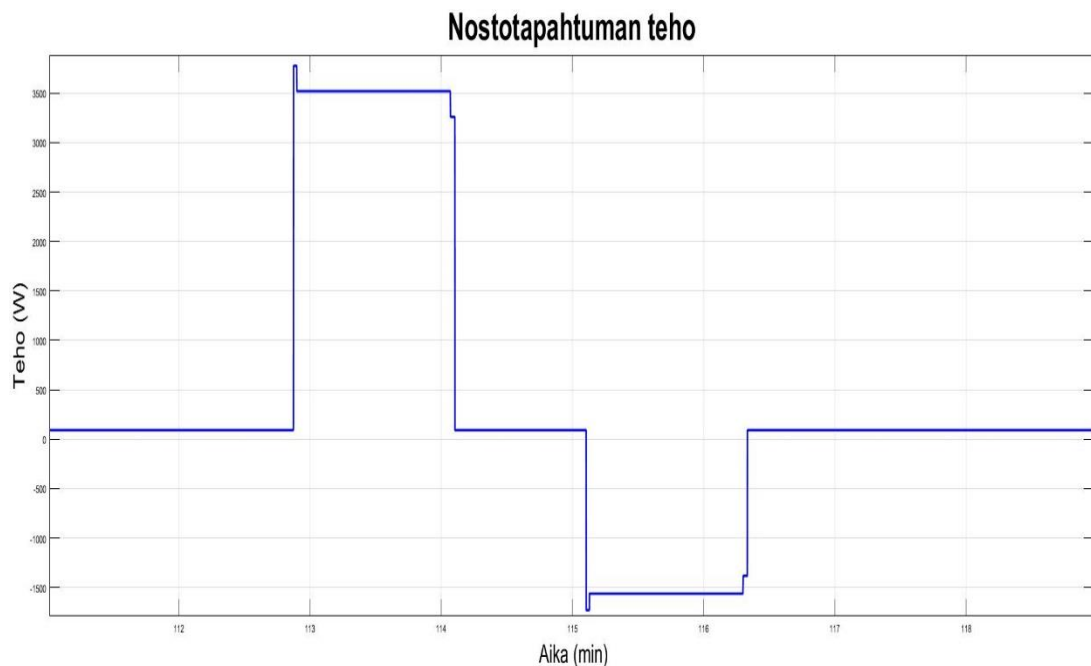
	Nosturi 1	Nosturi 2	Nosturi 3
Huipputeho (W)	3776	6100	3861
Energia (Wh)	1891	2532	2577
LNMC kennojen lukumäärä (kpl)	290	468	312
LNMC SOC lopussa (%)	32,36	41,69	17,51
LFP kennojen lukumäärä (kpl)	324	460	427
LFP SOC lopussa (%)	15,15	16,41	15,02
LTO kennojen lukumäärä(kpl)	585	805	792
LTO SOC lopussa (%)	16,05	15,85	17,24

LNMC:n ja LFP:n akustojen kokoerot eri nostureilla selittyvät pitkälti jäljelle jääneen varaustason arvoja vertailemalla. LFP:n kapasiteetti hyödynnetään kaikilla kolmella nosturilla lähes kokonaan. Nosturilla 3 on myös LNMC:n kapasiteetti saatu lähes täysin hyödynnettyä, ja akustojen kennomäärän ero on suurimmillaan eli 115 kappaletta. Nosturilla 1 teho vaatimus on nosturin 3 kaltainen, mutta energiamäärä selvästi nosturia 3 pienempi. LNMC:n kapasiteetista jää hyödyntämättä noin 15 %, kun LFP:llä kapasiteetti saadaan määriteltäyn alarajaan asti hyödynnettyä. Kennojen lukumäärien ero tasoittuu ollen kuitenkin vielä 34 kennoa LNMC:n eduksi. Nosturin 2 energiatarve vastaa lähes nosturia 3, mutta tehotarve on yli 1,5-kertainen. LNMC:llä jää akuston kapasiteettia hyödyntämättä

yli 25 %. Kun LFP:llä kapasiteetti saadaan hyödynnettyä, on nosturilla 2 LFP:n kennojen lukumäärä 8 kappaletta pienempi kuin LNMC:n kennoilla toteutettuna.

### 5.3 Mallinnustulosten analysointi

Luvussa 5.2 esitettiin tulokset, kun kolme eri testinosturia simuloitiin kolmella eri akkukemialla etsien pienintä mahdollista akkukennojen lukumäärää kullekin tapaukselle. Kuvassa 20 on esitetty esimerkki nosto- ja laskutapahtuman kuluttamasta tehosta nosturilla 1. Sininen kuvaaja kuvaa koko sähköjärjestelmän tehoa, joka akustolta vaaditaan kuorman nostamiseksi ja laskemiseksi.



**Kuva 20 Nosto- ja laskutapahtuma nosturilla 1**

Kuvasta 20 nähdään, että kuorman nostamisen vaatiman energian lisäksi kuorman laskeaminen tuottaa energiaa. Vakionostonopeudella tehonkulutus on noin 3500 W ja vakiolas- kunopeudella noin -1550 W. Amplitudien suuruuden ero johtuu järjestelmän muista häviöistä, joiden muodostuminen perusteltiin luvussa 3. Laskutapahtumassa järjestelmään syötettävän energian osuus on mallinnetulla nosturilla merkittävä, sillä se on noin 40 % nostotapahtumaan vaadittavasta energiasta. Perinteisissä taajuusmuuttajakäyttöisissä sil- tanostureissa laskutapahtuman generoima energia kulutetaan jarruvastuksessa, mutta nyt se voidaan syöttää taajuusmuuttajien yhteisestä välipiiristä akustolle, joka latautuu. Täl- löin nosturin käyttöaika ilman nosturiradan latauspisteeseen kytkeytymistä pitenee. Ta- kaisin palautuvan energian osuuden merkitys työvuoron aikana kuluneesta kokonaisener- giasta kasvaa sen mukaan, mitä useammin nostosuorituksia työvuoron aikana tehdään.

### 5.3.1 Akuston valinta

Akuston mitoituksessa täytyy ottaa huomioon monia tekijöitä. Tässä työssä keskityttiin akuston kennojen lukumäärän minimointiin. Mitoittaviksi tekijöiksi valittiin hakkuriteholähteen virtaraja, akkukennon virtarajat sekä kapasiteetin haluttu ylä- ja alaraja. Näiden määritysten avulla simuloitujen nosturimallien tulokset esitettiin luvussa 5.2.

Käytettäessä pelkästään akkukennojen lukumäärä valintakriteerinä valitaan LNMC akkukemiaksi nostureilla 1 ja 3, ja nosturille 2 akkukemiaksi valitaan LFP. LTO ei ole mallin perusteella kilpailukykyinen vaihtoehto testatuille nostureille, sillä sen akuston kennojen lukumäärä on kaikilla kolmella nosturilla selvästi suurempi kuin kahden muun akkukemian kennojen lukumäärä. LTO:sta saataisiin tarvittava teho huomattavasti pienemmälläkin kennomäärällä. Hakkuriteholähteen virtaraja kuitenkin määrittelee akuston jännitteelle minimiarvon, joka määrittelee minimimäärän sarjaankytkettäville kennoille.

Parhaan akuston valinnassa pelkästään kennojen lukumäärä ei ole määrävä tekijä. Käyttölämpötila mallinnuksessa oletettiin olevan normaali huonelämpötila eli 25 °C, eikä lämpötilan vaikutusta akun käyttäytymiseen tai ikääntymiseen tässä työssä mallinnettu. Myöskään muita ikääntymiseen liittyviä tekijöitä ei erikseen työssä mallinnettu. Varaustasolle asetettiin mallinnuksessa kuitenkin ylä- ja alarajat. Kuten luvussa 2 todettiin, vaikuttaa akun kapasiteetin ääriarajoilla toimiminen sekä ikääntymiseen että turvallisuuteen.

Eri akkukemioiden odotettu elinikä käyttökertojen lukumääränä laskettaessa vaihtelee. Akun kapasiteetti laskee käyttökertojen määrän kasvaessa, eli akku ikääntyy käytössä. Taulukossa 1 esitettiin keskiarvoisia lukuja eri akkukemioiden käyttökertojen määrälle. Datalehtiensä [35,36,37] perusteella kolmelle luvussa 5.2 mallinnetulle akulle on ilmoitettu käyttökertojen lukumäärä seuraavasti:

- LNMC: 600 kerran jälkeen alkuperäisestä kapasiteetista yli 80 % jäljellä
- LFP: 2000 kerran jälkeen alkuperäisestä kapasiteetista yli 80 % jäljellä
- LTO: 3000 kerran jälkeen alkuperäisestä kapasiteetista yli 70 % jäljellä.

Käyttökertojen lukumäärää ilmoitettaessa on kapasiteetin prosentiosuuksilla eroa. Taulukko 1 kuitenkin tukee oletusta, että LTO:n käyttöikä on käyttökertojen lukumäärän mukaisesti suurin. Käyttökertojen määrään vaikuttaa tapa, jolla akkuja kuormitetaan. Työssä akun varaustasolle määritettiin sallitut ylä- ja alarajat, jotta turvallisuus ja käyttöikä saataisiin maksimoitua. Datalehdillä ilmoitetut lukumäärät pohjautuvat määritelyihin testeihin, joissa akut puretaan kokonaisuudessaan ennen täyteen lataamista. Tällöin käytetty alajänniterajakin on selvästi mallinnuksessa saatujen kennojen loppujännitteitä matalampi. Tästä syystä akun käyttökertojen lukumäärä voi mallinnuksen nostureilla olla datalehdillä ilmoitettuja määriä suurempi. Erityisesti tämä pätee LNMC-akustoilla nostureissa 1 ja 2, joilla varaustaso jäi korkeaksi.

Kuormitusvirrat olivat kuorman liikuttamisten välillä hyvinkin maltilliset, kun virran suuruuden määräiti vain tyhjäkäyntiteho, jolloin akun tuottama virta on pieni. Tällainen virta on hyvin pieni suhteessa virtaan, jolla datalehtien käyttökätesti on suoritettu. Täten käyttöikä voi entisestään kasvaa. Ilmiö korostuu LFP:llä ja erityisesti LTO:lla, kun virtojen arvot eivät yllä lähelle testijärjestelyissä käytettyjä virran arvoja.

Kustannuksia ei tässä työssä erikseen tarkastella. On kuitenkin syytä huomata, että pelkästään kennojen lukumäärä ei koko akuston kustannuksia määritä. Litiumioniakustot täytyy aina varustaa erillisellä suojauspiirillä ja kunnonvalvontayksiköllä. Akuston koon kasvaessa pelkkien kennojen lisäksi myös edellä mainittujen kustannukset nousevat.

### 5.3.2 Mallinnustulosten virhetarkastelu

Mallinnuksessa tehtiin luvun 4.1.1 mukainen yksinkertaistus kiihdytys- ja hidastustehojen laskennassa, joka vaikuttaa kulutettuun energiaan. Huipputehoon yksinkertaistus ei vaikuta. Kiihdytys- ja hidastusajat on asetettu mallin moottorikäyttöille 1,5 s ja 2,0 s mittaisiksi, vastaavassa järjestyksessä. Lasketaan nosturilla 1 kiihdytystilanteissa 30 nosto- ja laskutapahtuman aikana kuluma yhteisenergia. Laskutehon kiihdytystehohuippu on saatu kuvasta 20.

$$\Sigma E_{nk} = 30 * 3776 W * \frac{1,5}{3600} h = 47,2 Wh \quad (5.2)$$

$$\Sigma E_{lk} = 30 * (-1729)W * \frac{2}{3600} h = -28,8 Wh \quad (5.3)$$

$$\Sigma E_{nk} + \Sigma E_{lk} = 18,4 Wh \quad (5.4)$$

Yhtälöissä (5.2-5.4):

$E_{nk}$	Nostotilanteen kiihdytysenergia koko simuloinnin aikana
$E_{lk}$	Laskutilanteen kiihdytysenergia koko simuloinnin aikana

Mallin mukaan laskettu energiakulutus on 18,4 Wh, joka on noin 1 prosentti nosturin 1 kokonaisenergiankulutuksesta. Myös hidastukselle nosto- ja laskutilanteissa voitaisiin laskea energia vastaavasti, jonka arvo olisi samaa suuruusluokkaa. Vaikka mallissa tehtiin yksinkertaistus energian laskemisen suhteen, ei se tuota akuston mitoittamisen kannalta merkittävää virhettä. Todellinen kiihdytystilanteessa kuluva energia olisi sekä nosto- että laskutilanteessa laskettuja arvoja jonkin verran pienempi.

Mallin muiden komponenttien tehot on valittu olemassa olevaan tietoon perustuen. Sekä moottoreista, jarruista että taajuusmuuttajista on saatavilla valmistajien toimittamat tehohäviötiedot, joten ne vastaavat todellisuutta hyvin.

Akustot on mallinnettu akkukemioille keskiarvoisesti määritettyjen, eri virtakuormitukset huomioon ottavien jännite-SOC -käyrien avulla. Akustossa olevat kennot on oletettu keskenään identtisiksi, ja niiden välisistä sarjan- ja rinnankytkennöistä aiheutuvia häviöitä ei ole otettu huomioon. Jokainen akku on yksilö, jonka toiminta voi erota keskiarvoisesta käyrästöstä. Paremmin akuston toimintaa voisi analysoida esimerkiksi luvussa 4.1.5 esitetyn Theveninin mallin avulla. Kehittyneemmälle Theveninin mallille voitaisiin syöttää erikseen lataus- ja purkutapahtumien parametrit. Käytetyt SOC-käyrät eivät ota huomioon akun erilaista käyttäytymistä lataus- ja purkutapahtumissa. Tästä seuraa hieman virhettä, sillä ladatessa akkua sen sisäinen resistanssi on usein suurempi. Litiumioniakun hyötysuhde lataus- ja purkutapahtumissa on usein jopa yli 95 % [6], joten virheen vähäisyyden takia hyötysuhdetta ei otettu tässä työssä huomioon.

## 6. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, millaisia turvallisuuteen ja käyttöikään liittyviä tekijöitä litiumioniakkuihin liittyy. Lisäksi tavoitteena oli rakentaa simulointimalli, jolla voidaan mitoittaa akustoja erilaisiin nosturitarpeisiin. Mitoittavana kriteerinä pidettiin vaadittavan akuston pienintä mahdollista kokoa.

Luvussa 2 käsiteltiin litiumioniakkujen teoriaa. Litiumioniakku on yleisnimitys erilaisille akkukemioille, joiden toiminta perustuu litiumionien hyödyntämiseen. Erilaisten akkukemioiden ominaisuudet riippuvat käytetyistä alkuaineista. Soveltuakseen siltanosturikäyttöön, on akkukemian oltava pitkäikäinen, luotettava ja turvallinen. Sekä ikääntymisen että turvallisuuden todettiin liittyvän alkuaineiden ominaisuuksien lisäksi olennaisesti siihen, kuinka akkua kuormitetaan. Akun virta ei saa ylittää sallittuja purku- tai latausvirran rajoja. Jotta akulle voidaan taata pitkä käyttöikä, on huolehdittava, että sitä ei juurikaan kuormiteta sallitun varaustason ylä- ja alarajojen ulkopuolella.

Akkukäyttöisestä siltanosturista rakennettiin simulointimalli, jonka muodostaminen käsiteltiin luvussa 4 ja toiminta luvussa 5. Mallin tarkoitus on toimia mitoitusvälineenä, kun erilaisille nostureille halutaan määritellä vaadittavan akuston koko. Akuston koon mitoituksessa tulee ottaa huomioon luvussa 2 esitetyt virta- ja varaustasorajat. Lisäksi mitoituskriteeriksi muodostuu nosturin sähköjärjestelmän komponenttien virtakestoisuudet, tutkitussa konseptissa hakkuriteholähteen virtakestoisuus.

Edellä luetellut kriteerit huomioon ottamalla simulointimallilla pystyttiin simuloimaan akkukäyttöistä siltanosturia kolmella eri kuormituksella. Simuloitavissa nostureissa tutkittiin, miten huipputehon tai kokonaisenergian muuttuminen vaikuttaa akustoon, jos toinen tekijä pysyy vakiona. Työssä simuloitiin eri nosturikuormituksia kolmella eri akkukemialla, jotka olivat LTO, LFP ja LNMC. Jokaista akkukemiaa kohden valittiin yksi kaupallinen tuote, ja näiden datalehdiltä saadut tiedot sovitettiin tyypilliseen akkukemian kuormituskäyrään.

Simulointien perusteella litiumioniakuista pystytään luomaan akusto, joka pystyy luovuttamaan nosturin tarvitseman tehon ja energian. Akuston koko riippuu sekä akkukemiasta että nosturikuormituksesta. Oikeanlaisen akuston valinta vaatii nosturikäytön tarkan määrittelyn, sillä tulokset osoittavat akustojen koon vaihtelevan paljon nosturikäytöstä riippuen. Tutkitulla konseptilla LTO:n vaatima akuston koko on huomattavasti suurempi kuin LFP:n ja LNMC:n akustojen koot. Jälkimmäisten keskinäinen paremmuus akkukemien lukumäärällä mitattuna riippui simulointien perusteella paljon nosturimäärittelystä.



Vaadittua akustoa ei pidä valita kuitenkaan pelkästään akuston kennojen lukumäärän perusteella. Nosturikäytössä turvallisuus on erittäin tärkeä osatekijä, joka kallistaisi valintaa LFP:n ja LTO:n suuntaan, jotka ovat elektrodimateriaaleiltaan LNMC:hen verrattuna enemmän stabiileja. Myös akuston käyttöikä on merkittävä tekijä valinnassa, joka nostaa LTO:n osakkeita tutkittujen akustojen välillä. Lisäksi valintaan vaikuttaa oleellisesti akuston muodostamat materiaalikustannukset.

Simuloinnit suoritettiin vain yhdellä akkukennolla jokaista akkukemiaa kohden. Akkukennojen vaihtaminen kapasiteetiltaan erikokoiseen akkukennoon vaikuttaisi myös saattaviin tuloksiin. Simulointimallin tehtävä on olla apuväline nosturiyritykselle oikean akuston valinnassa. Nosturiyritys määrittää haluamansa akuston suorituskyvyn ja tilaa sen jälkeen akuston akkuvalmistajalta, joka tarjoaa mielestään sopivaa akustoa. Nosturiyritys voi simulointimallin avulla tarkistaa, käyttäytyykö tarjottu akusto sillä tavalla, kuin yritys haluaa sen käyttäytyvän.

Rakennettu simulointimalli antaa nosturiyritykselle mahdollisuuden varmistaa, että sen käyttämä akusto vastaa nosturin käyttötarpeita. Simulointimallin voidaan todeta antavan riittävän tarkan kuvan vaaditun akuston koosta. Nosturissa kuluvat tehohäviöt on mallinnettu riittäväällä tarkkuudella. Nosturiyrityksen kannalta simulointimalli on helppokäyttöinen, sillä sen syöttöparametreina käytetään tyypillisiä nosturille määritettäviä arvoja.

## LÄHTEET

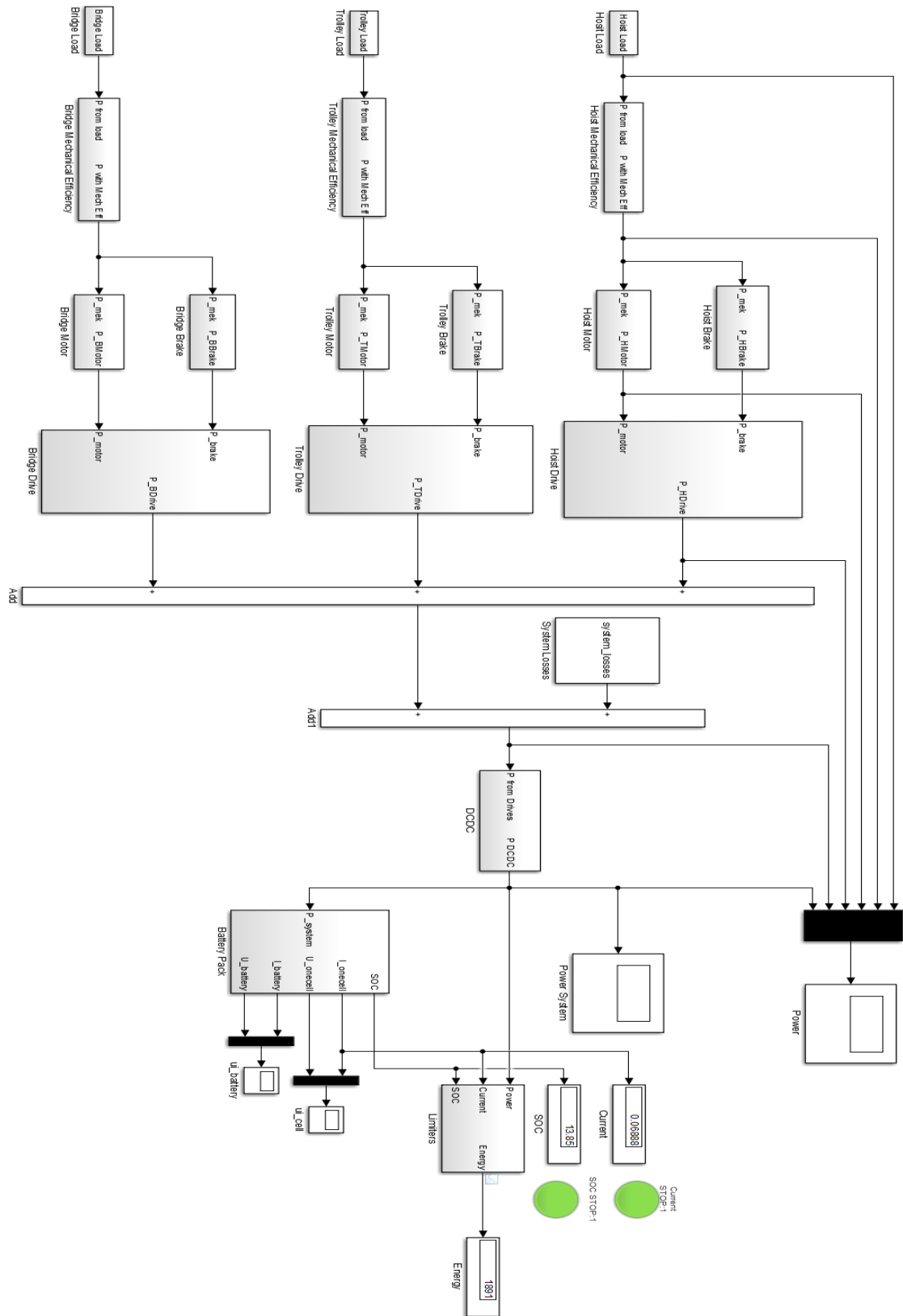
- [1] EU 2006: Direktiivi 2006/66/EY. Saatavissa: (viitattu 10.2.2016): <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0066&from=FI>
- [2] Whittingham, M.S., History, Evolution, and Future Status of Energy Storage, Proceedings of the IEEE, vol. 100, 2012, pp. 1518-1534.
- [3] Magnet Academy: Planté Battery -1859. Saatavissa (viitattu 29.1.2016): <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/plante-battery>
- [4] In search of the perfect battery, The Economist, 2008. Saatavilla (viitattu 10.2.2016): <http://www.economist.com/node/10789409>
- [5] Padbury, R. & Zhang, X., Lithium–oxygen batteries—Limiting factors that affect performance, Journal of Power Sources, vol. 196, no. 10, 2011, pp. 4436-4444.
- [6] Learn About Batteries, Battery University. Saatavilla (viitattu 20.4.2016): <http://www.batteryuniversity.com/learn/>
- [7] IT direction, image gallery. Saatavilla (viitattu 14.2.2016): <http://www.itdirection.net/images/lthcell-may-13.png>
- [8] Reddy, T. B. & Linden, D., Linden's handbook of batteries. New York, USA, 2011. Saatavissa (viitattu 3.3.2016): <http://accessengineering-library.com/browse/lindens-handbook-of-batteries-fourth-edition>
- [9] Chaturvedi, Nalin A.; Klein, Reinhardt; Christensen, Jake; Ahmed, Jassim; Kojic, Aleksandar, Algorithms for Advanced Battery-Management Systems, IEEE Control Systems, vol. 30, no. 3, 2010, pp. 49-68.
- [10] Nei Corporation, Lithium Titanate Based Batteries for High Rate and High Cycle Life Applications, Saatavilla (viitattu 13.3.2016): [http://neicorporation.com/white-papers/NEI\\_White\\_Paper\\_LTO.pdf](http://neicorporation.com/white-papers/NEI_White_Paper_LTO.pdf)
- [11] Zheng, Y., Ouyang, M., Lu, L. & Li, J., Understanding aging mechanisms in lithium-ion battery packs: From cell capacity loss to pack capacity evolution, Journal of Power Sources, vol. 278, 2015, pp. 287-295.
- [12] Hu, X., Li, S. & Peng, H., A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries, Journal of Power Sources, vol. 198, 2012, pp. 359-367.

- [13] Guo, Z., Liaw, B.Y., Qiu, X., Gao, L. & Zhang, C., Optimal charging method for lithium ion batteries using a universal voltage protocol accommodating aging, *Journal of Power Sources*, vol. 274, 2015, pp. 957-964.
- [14] Khamar, M. & Askari, J., A charging method for Lithium-ion battery using Min-max optimal control, 2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, 2014, pp. 1239-1243.
- [15] Charging Lithium Ion Batteries, Battery University, Saatavilla (viitattu 13.4.2016): [http://www.batteryuniversity.com/\\_img/content/new.jpg](http://www.batteryuniversity.com/_img/content/new.jpg)
- [16] Klein, R., Chaturvedi, N.A., Christensen, J., Ahmed, J., Findeisen, R. & Kojic, A., Optimal Charging Strategies in Lithium-Ion Battery, 2011 American Control Conference, San Francisco, California, USA, 2011, pp. 382-387.
- [17] Lee, Y. & Cheng, M., Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol 52, no. 5, 2005. pp. 1297-1307.
- [18] Xia, B., Chen, C., Tian, Y., Sun, W., Xu, Z. & Zheng, W., A novel method for state of charge estimation of lithium-ion batteries using a nonlinear observer, *Journal of Power Sources*, vol. 270, 2014, pp. 359-366.
- [19] Ma, Z., Jiang, J., Shi, W., Zhang, W. & Mi, C.C., Investigation of path dependence in commercial lithium-ion cells for pure electric bus applications: Aging mechanism identification, *Journal of Power Sources*, vol. 274, 2015, pp. 29-40.
- [20] Ouyang, M., Chu, Z., Lu, L., Li, J., Han, X., Feng, X. & Liu, G., Low temperature aging mechanism identification and lithium deposition in a large format lithium iron phosphate battery for different charge profiles, *Journal of Power Sources*, vol. 286, 2015, pp. 309-320.
- [21] Han, X., Ouyang, M., Lu, L., Li, J., Zheng, Y. & Li, Z., A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electrical vehicle: Aging mechanism identification, *Journal of Power Sources*, vol. 251, 2014, pp. 38-54.
- [22] Tanim, T.R. & Rahn, C.D., Aging formula for lithium ion batteries with solid electrolyte interphase layer growth, *Journal of Power Sources*, vol. 294, 2015, pp. 239-247.

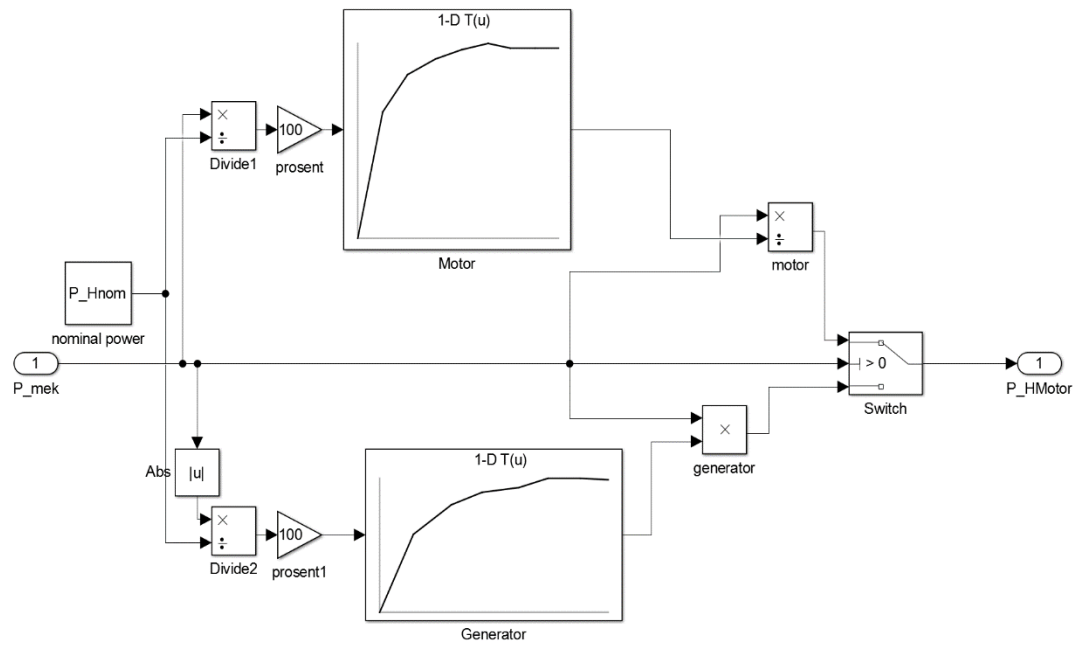
- [23] New Scientist. Charge battery in just six minutes. Saatavilla (viitattu 23.4.2016): <https://www.newscientist.com/article/dn7081-charge-a-battery-in-just-six-minutes/>
- [24] Wohlfahrt-Mehrens, M., Vogler, C. & Garche, J., Aging mechanisms of lithium cathode materials, *Journal of Power Sources*, vol. 127, no. 1–2, 2004, pp. 58-64.
- [25] McDowall, P. Biensan & M. Broussely, Industrial lithium ion battery safety - What are the tradeoffs?, INTELEC 07 - 29th International Telecommunications Energy Conference, Rome, Italy, 2007, pp. 701-707.
- [26] Halminen, A., Johdatus nosturitekniikkaan, *Konecranes Koulutusmateriaali*, 2007.
- [27] Siukola, L., Siltanosturin energiankulutus, *Diplomityö*, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto, 2008, 88 s.
- [28] Haastattelu, Teppo Lindberg, Pääsuunnitteluinsinööri, *Konecranes*.
- [29] Tuusa, H. Sähkömoottorikäytöt, opintomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto, 2011, 198 s.
- [30] Bastman, J. Sähkömoottorit, opintomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto, 2011, 189 s.
- [31] Kauppi, V., Nosturin sähkökomponenttien eliniän arviointi, *Diplomityö*, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto, 2008, 94 s.
- [32] Festoon system. Saatavilla (viitattu 12.1.2016): <http://imgarcade.com/1/crane-festoon/>
- [33] Conductor Bar. Saatavilla (viitattu 12.1.2016): [http://www.vahleinc.com/assets/images/sys\\_co\\_en\\_kbh.gif](http://www.vahleinc.com/assets/images/sys_co_en_kbh.gif)
- [34] Boston-Power Ensemble Module System, Boston Power, 2014, 2 p. Saatavissa: <http://www.boston-power.com/sites/default/files/datasheets/940-0020-001%20REV%2000%20Ensemble%20Module%20System%20Product%20Datasheet-English.pdf>
- [35] LTO Battery Specification, Model 1865, AA Portable Power Corp., 2013, 6 p. Saatavissa: <http://www.batteryspace.com/prod-specs/7471.pdf>

- [36] LFP Battery Specification, Model IFR18650EC-1.5Ah, AA Portable Power Corp., 2012, 11 p. Saatavissa: <http://www.batteryspace.com/prod-specs/919-LFP-18650-1500.pdf>
- [37] LMNC Battery Specification, Model LMN-18650-2000, AA Portable Power Corp., 2010, 11 p. Saatavissa: <http://www.batteryspace.com/prod-specs/5671.pdf>
- [38] Lithium Titanate Oxide Cells and Batteries from GWL, EV-Power. Saatavilla (viitattu 2.5.2016): <http://www.ev-power.eu/docs/web/2015/LTO-DisCharge-Rates.gif>
- [39] Understanding Advanced Batteries and Energy Storage – Part 2, Investor Intel. Saatavilla (viitattu 2.5.2016): <http://investorintel.com/technology-metals-intel/understanding-advanced-batteries-and-energy-storage-part-2/>
- [40] Alibaba.com, Image gallery, Saatavilla (viitattu 2.5.2016): [http://i01.i.aliimg.com/img/pb/169/255/901/901255169\\_089.jpg](http://i01.i.aliimg.com/img/pb/169/255/901/901255169_089.jpg)

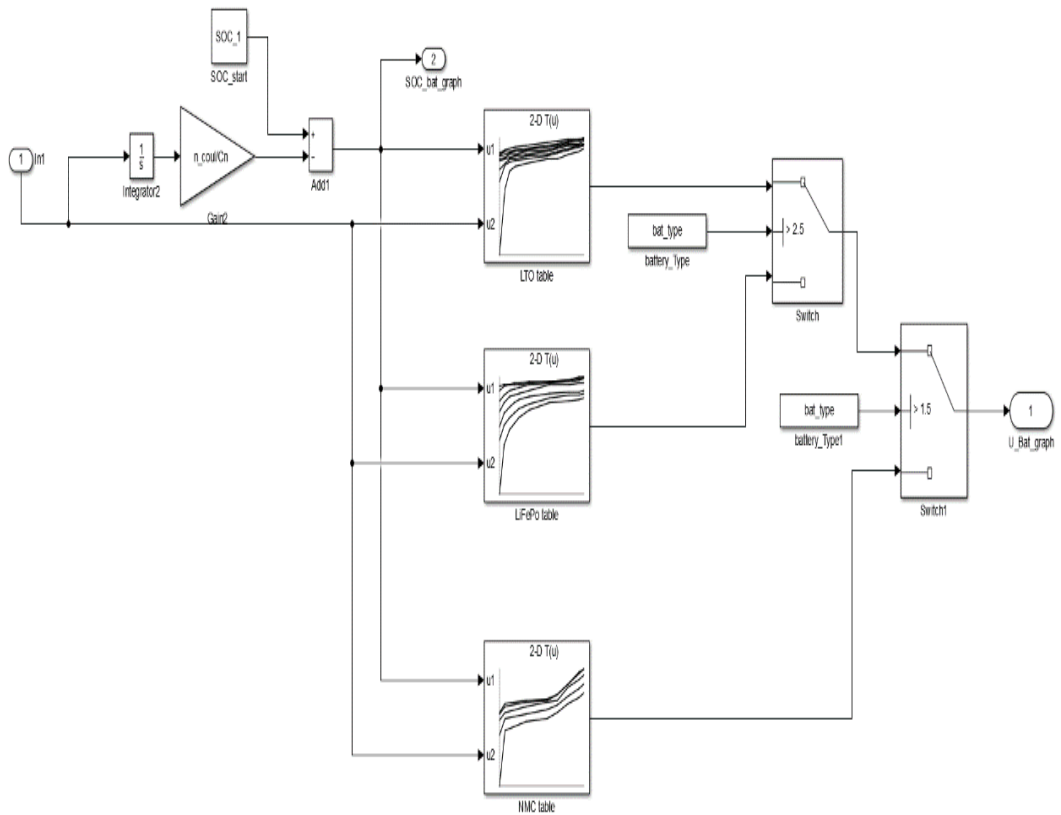
# LIITE A: SIMULOINTIMALLIN KUVAT



Kuva i Päälohkokaavio

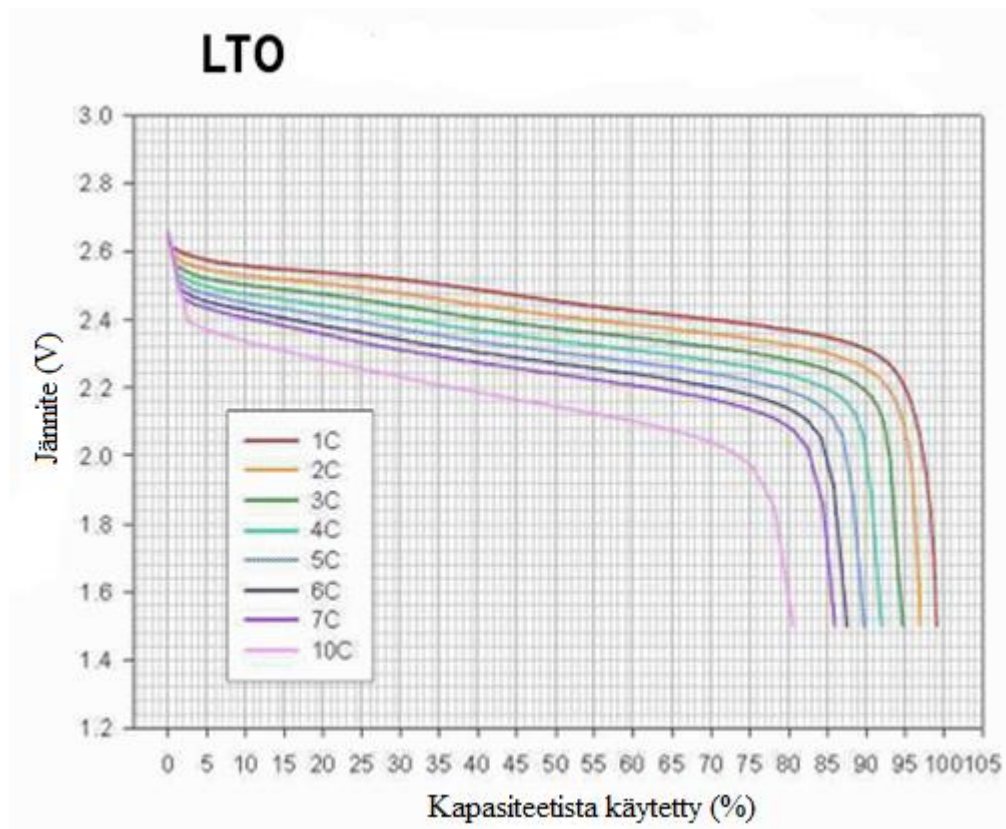


***Kuva ii Moottorimalli***

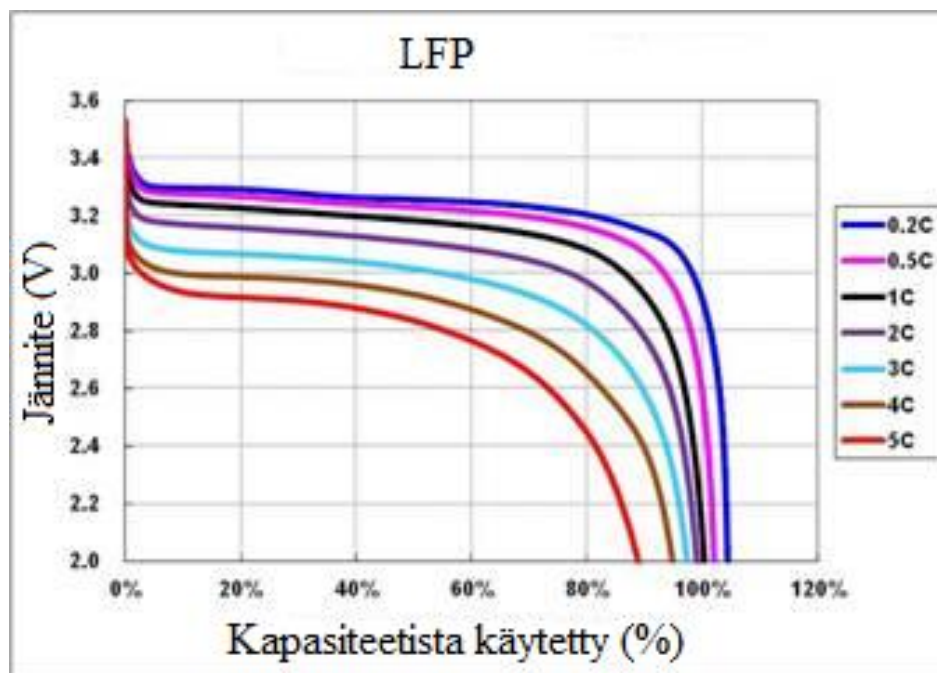


***Kuva iii Akkukemian valinta***

## LIITE B: AKUSTOJEN KUORMITUSKÄYRÄSTÖT

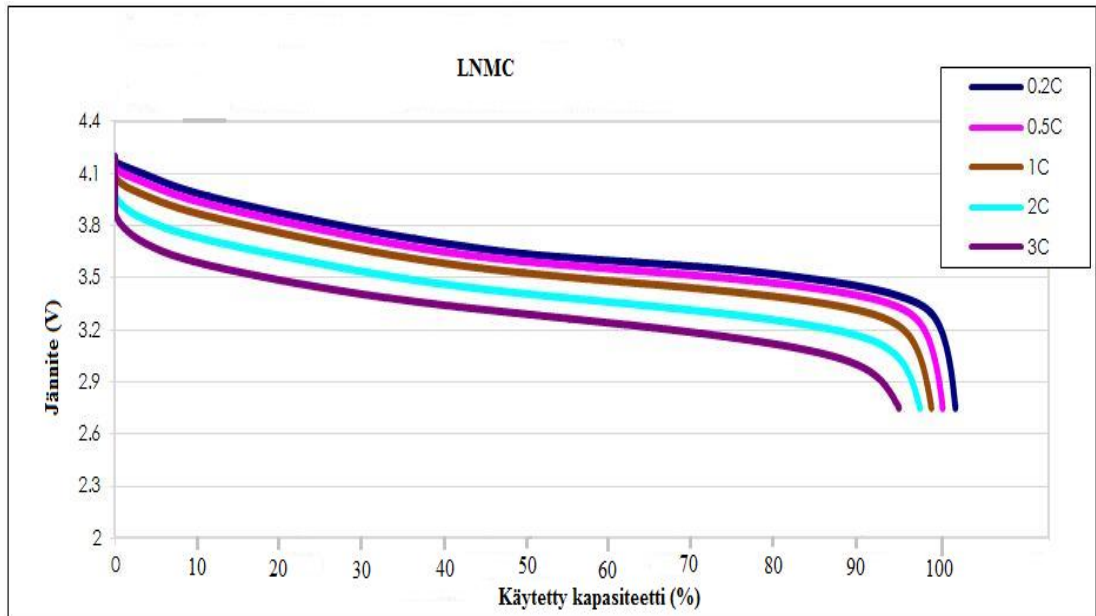


Kuva iv LTO:n kuormituskäyrästä, muokattu lähteestä [38].



Kuva v LFP:n kuormituskäyrästä, muokattu lähteestä [39].





*Kuva vi LNC:n kuormituskäyrästä, muokattu lähteestä [40].*