Tampereen yliopisto

Tiia Uotila

TASASUUNTAUS KUMIPYÖRÄKONTTINOSTURIN LATAUSASEMASSA

Diplomityö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastajat: Tenure Track -Prof. Tomi Roinila
Tutkijatohtori Jussi Sihvo
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Tiia Uotila: Tasasuuntaus kumipyöräkonttinosturin latausasemassa
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2023

Kumipyöräkonttinosturia käytetään satama-alueilla merikonttien siirtelyyn. Kasvava huoli ympäristöstä ja tiukentuneet rajoitukset ovat johtaneet monilla aloilla ratkaisujen sähköistämiseen. Kumipyöräkonttinosturin voimantuotolle dieselgeneraattorilla on jo vaihtoehtona myös akustoa hyödyntävä hybridi, sekä kytkentä suoraan verkkoon kaapelikelan tai virtakiskon avulla. Tällä hetkellä kehityksessä on täysin litium-ioniakustolla toimiva tuote. Akuston lataamiseen tarvitaan latausasema ja suunnitteilla on sekä vaihto- että tasavirtaa hyödyntävät ratkaisut.

Tämän diplomityön tavoitteena on tuottaa dokumentaatiota kumipyöräkonttinosturin DC-latausasemasta ja siinä hyödynnetystä tasasuuntaavasta laitteesta. Tässä työssä tarkastellaan kirjallisuusselvityksen keinoin akkukäyttöistä nosturia ja sen latausasemaa sekä syvennytään tasasuuntaavaan laitteeseen. Työssä myös esitetään teoriaa akkuteknologian ja tasasuuntauksen taustalla. Lisäksi testataan kehityksessä käytettyä latausasemaa ja nosturia sekä esitellään mittaustulokset aseman jännitteistä, virroista ja tehosta. Diplomityö on toteutettu yritykselle Konecranes Finland.

Työssä onnistuttiin tuottamaan kuvausta nosturin mekaanisesta ja sähköisestä rakenteesta, latausaseman komponenteista ja niiden sijoittelusta, lataussyklistä sekä tasasuuntaajan toiminnasta ja ohjauksesta. Mittaustuloksista voitiin päätellä aseman lataussekvenssin toimivan lähes suunnitelman mukaisesti. Testauksessa paljastui myös kehityskohteita komponenttien mitoituksen sekä latausaseman ja nosturin välisen kommunikaation suhteen.

Avainsanat: kumipyöräkonttinosturi, latausasema, DC-lataus, tasasuuntaus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Tiia Uotila: Rectifying in Rubber-Tired Gantry Crane Charging Station
Master's Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Electrical Engineering
April 2023

Rubber-tired gantry cranes are used in ports to transport intermodal containers. Concern over environmental issues and tightening regulations have lead into development of electrical solutions in many industries. Rubber-tired gantry cranes already offer options for a diesel engine. The diesel engine can be paired with batteries in a hybrid crane or replaced with a cable reel or a busbar connecting the crane directly to an electrical network. Currently a completely battery operated product is being developed. A charging station is needed to charge the batteries, which can utilize either alternating or direct current.

The purpose of this master's thesis is to produce a documentation of the DC charging station of the rubber-tired gantry crane and the rectifying device used in it. This thesis uses literature research to analyse a battery operated crane, its charging station and focuses on the controlled rectifying used in the station. Theory relating to battery technology and rectifying is presented. Testing is executed on a charging station prototype and testing crane. The collected data of voltage, current and power measurements is presented in the thesis. This master's thesis is written for the company Konecranes Finland.

This thesis managed to describe the mechanical and electrical structures of the crane, the components and the lay-out of the charging station, the charging sequence and the operation and control the rectifier. The test results implied that the charging station is functioning nearly as it is was designed. The testing also revealed some issues to be developed considering the dimensioning of the electrical components and the communication between the charging station and the crane.

Keywords: rubber-tired gantry crane, charging station, DC charging, rectifying

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Aloitin opintoni vuonna 2016 TTY:llä sähkötekniikan opintolinjalla. Opintovuosiini sisältyi niin haasteita kuin onnistumisia. Olisi ne varmaan huonomminkin voinut käyttää. Tämä diplomityö on toteutettu Konecranes Finland yritykselle. Diplomityötä tehdessäni opin paljon uutta konttinostureista, sähköstä ja automaatiosta.

Haluaisin kiittää työni ohjaamisesta yliopiston puolelta Tomi Roinilaa ja yrityksen puolelta Kai Lüthjea. Lisäksi kiitän muita Konecranesin työntekijöitä, jotka neuvoivat työn kanssa ja jaksoivat vastailla tyhmiinkin kysymyksiini. Kiitokset myös ystävilleni tuesta, motivoinnista ja kissakuvien lähettämisestä.

Tampereella, 3. huhtikuuta 2023

Tiia Uotila

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto 1
2. Kumipyöräkonttinosturi 3
2.1 Rakenne 4
2.2 Moottorikäytöt 5
2.3 Täysakku-RTG. 6
2.4 Muut voimantuottotavat 10
3. RTG-nosturin latausasema. 13
4. DynAReg tasasuuntaajana. 18
4.1 Ohjattu tasasuuntaus 18
4.2 Rakenne ja toiminta. 21
4.3 Lataussekvenssin kuvaus 23
5. Latausaseman testaus 26
5.1 Testausympäristö ja testin kuvaus 26
5.2 Tulokset 27
6. Yhteenveto 35
Lähteet 37

KUVALUETTELO

2.1 RTG -nosturin rakenne, muokattu lähteestä [3]. 3
2.2 DynAHoist moottorikäyttö nostoliikkeelle [8] 5
2.3 Akku sen purkautuessa ja latautuessa 7
2.4 RTG -nosturin akkuhuone ja DC-latauspistoke [4]. 8
2.5 BE-RTG-nosturin sähkönsyöttö 9
2.6 BE-RTG -nosturin AC-latausliittimet [13] 10
2.7 RTG:n virtakisko [19]. 11

3.1 Latausaseman komponenttien sijoittelu, lähteen [26] pohjalta 15
3.2 DC-latauslaitteisto, muokattu lähteestä [27]. 15
3.3 Latausasema kytkettynä BE-RTG-nosturiin [4]. 16

4.1 Tasasuuntaava diodisilta, muokattu lähteestä [28]. 18
4.2 AC-pääjännitteet sekä syntyvä tasajännite, muokattu lähteestä [29]. 19
4.3 Ohjatun tasasuuntaajan piirikaavio, muokattu lähteestä [29]. 20
4.4 PWM-signaali ja sen perustaajuinen aalto [29]. 20
4.5 D2R ohjausyksikkö [32] 21
4.6 Latausaseman D2R tehoyksikkö ja LCL-suodin, muokattu lähteestä [32] . . 22
4.7 Kaavio nosturin lataustapahtumasta 24
4.8 Latausaseman käyttöliittymä 25

5.1 Latausjännite, sen asetusarvo sekä run-bitti latauksen alussa 27
5.2 Latausjännite, sen asetusarvo sekä run-bitti latauksen lopussa 28
5.3 Latausjännite sekä sen asetusarvo latauksen aikana 28
5.4 Latausteho, sen asetusarvo sekä run-bitti latauksen alussa 29
5.5 Latausteho, sen asetusarvo sekä run-bitti latauksen lopussa 29
5.6 Latausteho sekä sen asetusarvo latauksen aikana 30
5.7 D2R-yksikön lämpötila 30
5.8 AC-pääjännitteiden tehollisarvot 31
5.9 AC-virtojen tehollisarvot 32
5.10 AC-puolen pätöteho sekä loisteho 33
5.11 Vaihtovirran tehokerroin 33
5.12 RTG-nosturin DC-väylän jännite 34
5.13 Akkuketjujen varaustasot 34

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ACM	ohjauksen apukoneisto (engl. Auxiliary Control Machinery)
BE-RTG	akkusähköinen kumipyöräkonttinosturi (engl. Battery Electric Rubber-Tyred Gantry Crane)
BMS	akustonvalvontajärjestelmä (engl. Battery Management System)
C_D	kapasitanssi, tasasuuntaajan DC-puoli
D2C	DynAC, siirtoliikkeen moottorikäyttö
D2H	DynAHoist, nostoliikkeen moottorikäyttö
D2R	DynAReg, verkkoonjarrutuslaite
E_r	akun kapasiteetti
FE-RTG	täyssähköinen kumipyöräkonttinosturi (engl. Full Electrical Rubber-Tyred Gantry Crane)
I_1, I_2, I_3	kolmivaihejärjestelmän virrat, tehollisarvot
LFP	litium-rautafosfaatti
Li-ioni	litium-ioni
LTO	litium-titanaatti
NCM	litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidi
PLC	ohjelmoitava logiikka (engl. Programmable Logic Controller)
P_{ref}	latausteho, asetusarvo
PWM	pulssinleveysmodulaatio (engl. Pulse-Width Modulation)
RTG	kumipyöräkonttinosturi (engl. Rubber-Tired Gantry Crane)
SoC	akun varaustaso (engl. State of Charge)
U_{12}, U_{23}, U_{31}	kolmivaihejärjestelmän pääjännitteet, tehollisarvot
V_D	tasajännite, ohjattu tasasuuntaus
v_L	vaihtojännite, kolmivaihejärjestelmän pääjännite
V_m	vaihejännite, tehollisarvo
v_{MOD}	vaihtojännite, modulointisignaali
V_{ref}	tasajännite, asetusarvo

1. JOHDANTO

Viime vuosina on kehitetty paljon akkukäyttöisiä liikkuvia koneita. Motivaationa tähän on toiminut kasvava huoli polttoaineiden hiilidioksidipäästöjen vaikutuksesta ympäristöön ja mahdollistajana akkuteknologian kehittyminen. Selkeimmin kehityksen näkee sähköautojen yleistymisessä, mutta lisäksi esimerkiksi kaivosteollisuudessa, maatalouden työkoneissa ja raskaissa ajoneuvoissa ollaan siirtymässä sähköisiin ratkaisuihin.

Kiristyvien ympäristösäädösten ja lisääntyvän yhteisön paineen vuoksi myös satama-alueilla on aloitettu toimenpiteitä sähköistämisessä. Tavoitteena on ympäristön hyvinvointi, luonnonvarojen suojeleminen, optimoitu energiaresurssien käyttö ja energian kulutuksen vähentäminen. [1] Tutkimuksen mukaan satamien hiilidioksidipäästöjen lähteitä ovat konttienkäsittelylaitteet (76 %), toimistorakennukset (21 %), valaistus (2 %) ja muut (1 %) [2]. Konttinostureiden ja muiden käsittelylaitteiden sähköistäminen on siis tärkeä osa tavoitteen saavuttamista.

Dieselkäyttöiset koneet aiheuttavat pakokaasun lisäksi melua, joka rajoittaa satamien sijoittamista asutettujen alueiden läheisyyteen. Lisäksi tällä hetkellä yleisimpien dieselkäyttöisten laitteiden haittapuolena on niiden korkeat huoltokustannukset. Huoltotoimenpiteiden tarve on myös kasvanut säädösten tiukentuessa ja siksi laitteistojen monimutkaisuuden lisääntyessä. Valmistajille on taloudellisesti kannattavaa pysyä kehityksessä mukana ja tavoitella teknologiajohtajuutta, eli markkinoiden kehittyneimpiä teknologisia ratkaisuja.

Kumipyöräkonttinosturi (engl. Rubber-Tired Gantry Crane, RTG) on kumipyörillä liikkuva nosturi, jota käytetään merikonttien siirtämiseen satama-alueilla. Kumipyörät mahdollistavat nosturin liikuttamisen laajemmin verrattuna kiskoilla kulkeviin konttinostureihin. RTG:n voi esimerkiksi ajaa konttirivistöstä toiseen. Tällä hetkellä markkinoilla on diesel- ja hybridikäyttöisiä RTG-nostureita sekä täysin sähköisiä RTG-nostureita (engl. Full Electrical RTG, FE-RTG), jotka on kytketty suoraan satama-alueen sähköverkkoon kaapelin tai virtakiskon avulla. [3]

Akkukäyttöinen RTG (engl. Battery Electric RTG, BE-RTG) yhdistää sähköisyyden hyödyt diesel- ja hybridinostureiden laajempaan liikkuvuuteen ja sen toiminta on FE-RTG-nosturia vähemmän riippuvainen ulkoisesta sähköverkosta. Valmiiksi rakennetuille kontinkäsittelyalueille voi myös olla kannattamatonta tai jopa mahdotonta toteuttaa virtakisko- tai kaapelikelajärjestelmää niiden vaatiman ylimääräisen tilan vuoksi. Akkuja voidaan la-

data vaihtovirralla (AC) suoraan verkosta, jolloin tasasuuntaus on toteutettu laitteen sisäisesti tai tasavirralla (DC), jolloin tarvitaan latausasema tasasuuntaukseen. [4] Koska tarvittavan DC-jännitteen taso vaihtelee, tasasuuntausta on myös pystyttävä ohjaamaan.

Yksi tapa toteuttaa säädettävä tasasuuntaus on laitteella, jossa tasasuuntaavien diodien kanssa on kytketty rinnan kytkimiä. Tällainen laite toimii siis myös vaihtosuuntaajana. DynAReg (D2R) on verkkoonjarrutuslaite (engl. network braking unit), jota voidaan hyödyntää myös säädettävänä tasasuuntaajana.

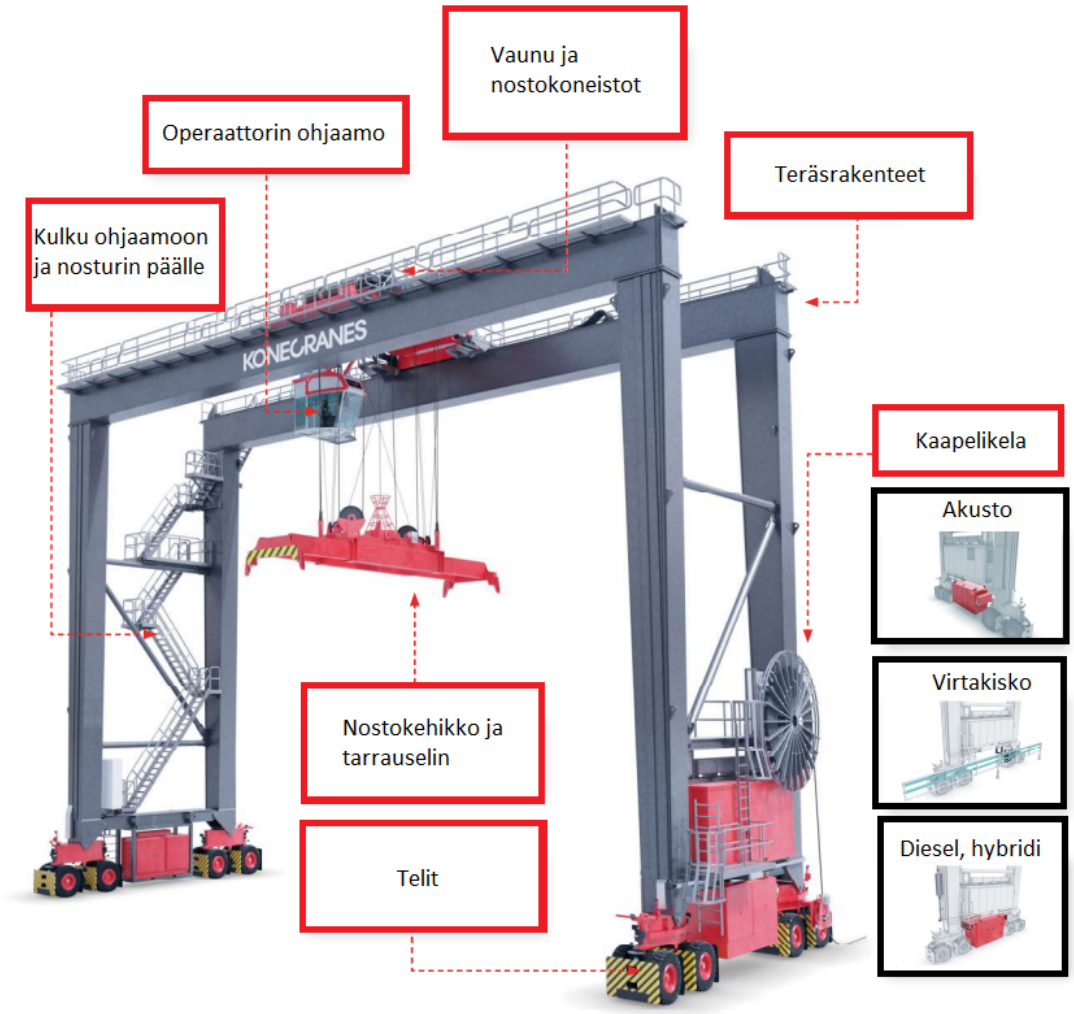
Tässä diplomityössä kuvataan BE-RTG-nosturin latausasemaa ja lataussekvenssiä sekä tarkastellaan D2R verkkoonjarrutuslaitteen toimintaa tasasuuntaajana latausasemassa. Kuvausta tuotetaan sanallisesti sekä kaavioita piirtämällä. Työn loppupuolella pohditaan tulevaisuuden kehitysmahdollisuuksia. Diplomityö toteutetaan pääosin kirjallisuusselvityksenä ja lisäksi siinä tarkastellaan testinosturin ja -latausaseman testaamisen tuloksia. Lähteinä hyödynnetään oppikirjoja, artikkeleita ja konferenssijulkaisuja, sekä yrityksen tuottamia dokumentteja. Mittausdataa kerätään latausasemalta sekä nosturin akkujen tilasta.

Diplomityön toimeksiantajana toimii Konecranes Finland. Konecranes valmistaa nostolaitteita muun muassa satamien ja teollisuuden tarpeisiin. Yrityksen Port Solutions -segmentti tarjoaa merikonttien käsittelyyn konttinostureita, sekä niiden ohjelmistoja ja huoltopalveluita. Vuonna 2020 Konecranesin liikevaihto oli 3,2 miljardia euroa ja se työllisti noin 16 500 työntekijää 50 eri maassa. [5]

Tämän työn luvussa 2 kuvataan yleisesti RTG-nosturin rakennetta ja sähköisiä komponentteja, esitellään lyhyesti eri voimantuottotapoja ja vertaillaan niitä sekä syvennytään tarkemmin akkukäyttöiseen nosturiin. Luvussa 3 kuvataan latausasemaa ja esitellään sen sisältämät komponentit, sekä vertaillaan AC- ja DC-latausta. Luvussa 4 käydään läpi ohjatun tasasuuntauksen teoriaa sekä kuvataan DynARegin toimintaa ja ohjausta. Testauksen tuloksia esitellään ja analysoidaan luvussa 5. Työstä rajataan pois nosturien latausta laajemmin koskevia kysymyksiä kuten latausstrategian määrittäminen, asemien sijainti satama-alueella sekä latauksen verkkovaatimukset.

2. KUMIPYÖRÄKONTTINOSTURI

Kumipyöräkonttinosturi operoi satama-alueella yleisimmin konttirivin päällä, niin että kontit jäävät sen jalkojen väliin. Suurimpien RTG-nostureiden teräsrakenteiden alle mahtuu vierekkäin 8 konttia ja rekkakaista sekä päällekkäin 6 konttia [3]. Kuvassa 2.1 on esiteltynä RTG-nosturin rakenteen tärkeimmät komponentit sekä eri voimantuottovaihtoehdot.



Kuva 2.1. *RTG -nosturin rakenne, muokattu lähteestä [3].*

Tässä luvussa kuvataan ensin RTG-nosturin mekaanista rakennetta ja sen tarvitsemia moottorikäyttöjä alaluvuissa 2.1 ja 2.2. Alaluvussa 2.3 käydään läpi teoriaa akkuihin liittyen ja esitellään akkukäyttöisen RTG:n rakennetta. Muita RTG:n voimantuottotapoja esi-

tellään ja niiden hyötyjä ja haittoja vertaillaan alaluvussa 2.4.

2.1 Rakenne

Nosturin teräsrakenteet koostuvat kahdesta vaakasuuntaisesta pääkannattajasta (engl. main girder), jotka on pultattu kiinni pystysuuntaisiin jalkakehiin (engl. leg frame). Kummassakin jalkakehässä on kaksi pystysuuntaista jalkaa ja niiden välillä palkkeja tukemassa rakennetta. Niihin kiinnitetään myös kulku nosturin päälle ja vaunuun, sekä voimantuottoon tarvittavat komponentit. Jalkakehien alla sijaitsevat koko teräsrakennetta kannattelevat telit. Telejä on neljä, yksi nosturin jokaisessa kulmassa. Kumirenkaat on kiinnitetty teleihin pareittain, toista parin renkaista pyöritetään moottorilla ja toisen tarkoituksena on vain jakaa nosturin painoa useamman renkaan välille. Suurimman osan ajasta nosturi ajaa pitkittäissuuntaisesti konttiriviä pitkin, mutta sitä voidaan ajaa myös poikittaissuuntaisesti tai kääntää koko rakenne. Teleillä on mekanismi, jolla ne voidaan lukita mahdollistamaan nosturin liike vain pitkittäis- tai poikittaissuunnassa. [6]

Nosturin vaunu on sijoitettu pääkannattimien päälle ja se liikkuu vetävillä pyörillä jalkakehien välissä. Vaunun päälle on sijoitettu nostokoneistot ja siihen on kiinnitetty ohjaamo, josta operaattori ohjaa nosturia. Kuorman nostoa varten on kaksi nostokoneistoa, joista kummallakin on oma moottorinsa ja joihin kiinnittyy neljä teräsköyttä. Lisäksi vaunussa on neljä ohjauksen apukoneistoa (engl. auxiliary control machinery, ACM), joilla on omat moottorinsa. ACM-koneistoilla voidaan toteuttaa mikroliikkeitä, eli siirtää kontin asentoa hieman, niin että vaunua tai koko nosturin rakennetta ei tarvitse liikuttaa. Lisäksi ACM-koneistot toteuttavat automaattista heijanvaimennusta, eli kontin liikkeen tasaamista. Sähkövirta ja tiedonsiirto tuodaan vaunuun kaapeliketjulla, jonka toinen pää on kiinnitetty vaunuun ja toinen nosturin runkoon. [6]

Vaunun alla sijaitsee nostokehikko (engl. head block) jonka kautta nostovaijerit kulkevat, sekä siihen kiinnitetty tarrauselin (engl. spreader). Nostokehikon kummassakin päässä on köysipyörät, joista teräsköydet kulkevat sekä lukitusmekanismit tarrauselimen kiinnitystä varten. Sen keskellä on kaapelikori, johon vaunun ja nostokehikon välinen kaapeli kerääntyy noston aikana. Tarrauselin on teräksinen komponentti, joka asetetaan merikontin päälle nosto-operaatiota varten. Sen päissä on ohjausvarret (engl. flipper), joilla tarraselin saadaan asettumaan oikeaan asentoon merikontin päälle, sekä kiertolukot, joilla kiinnitytään konttiin. Tarrauselimen pituutta voidaan säätää eri pituisiin merikontteihin tarttumiseen. [6]

RTG-nosturin sähköhuoneessa sijaitsevat tarvittavat moottorikäytöt, kytkimet, sekä ohjelmoitava logiikka (engl. programmable logic controller, PLC). Ohjaamoon on sijoitettu paneeli, josta operaattori voi nähdä PLC:n tuottamaa informaatiota, esimerkiksi nostetun kuorman korkeuden tai vikailmoituksia. [6] Nosturiin voidaan myös toteuttaa etäohjaus, jossa nosturiin on asennettu kameroita ja sitä ohjataan näytöillä varustetulta työpisteeltä

toimistosta käsin [3].

2.2 Moottorikäytöt

RTG-nostureissa käytetään DynA Vector II nimiseen tuoteperheeseen kuuluvia taajuusmuuttajia. Nostokoneistojen moottoreille käytetään DynAHoist (D2H) ja muille moottoreille DynAC (D2C) moottorikäyttöjä. Niiden avulla voidaan säätää moottorin nopeutta ja vääntömomenttia. [7]

Nosturin vaunun ja ACM-laitteistojen moottoreilla on erilliset moottorikäyttönsä ja lisäksi jos nosturissa on kaapelikela, sen moottorilla on omansa. Useimmiten myös nostolaitteistojen ja kummankin puolen telien moottoreilla on erilliset moottorikäytöt, mikä mahdollistaa koko nosturin, noston ja nosturin vaunun liikuttamisen samaan aikaan. Nostolle ja ajoliikkeelle voidaan myös käyttää samaa moottorikäyttöä, jolloin vain toinen liikkeistä on mahdollinen kerrallaan. [7]

Kuva 2.2. *DynAHoist moottorikäyttö nostoliikkeelle [8]*

Kuvassa 2.2 on esimerkkinä D2H-moottorikäyttö. Vasemmalla on sen tehoyksikkö, joka sisältää varsinaisen jännitemuuntimen ja oikealla ohjausyksikkö, joka toteuttaa muun muassa säätöalgoritmin ja vikavalvonnan. Teho- ja ohjausyksikön ei tarvitse nosturin sähkökaapissa sijaita vierekkäin, vaan usein kaikkien taajuusmuuttajien ohjainyksiköt asennetaan lähekkäin niiden käytön helpottamiseksi.

Moottorikäytöt on kytketty yleensä yhteiseen DC-väylään, mutta joskus D2C voidaan myös kytkeä suoraan voimantuotolta tulevaan vaihtojännitteeseen. DynARegia käytetään RTG-nostureissa tasasuuntaamaan voimantuoton vaihtojännite DC-väylälle. Sen toimintaan syvennytään tarkemmin luvussa 4. DynaCon taajuusmuuttajaa käytetään tuottamaan nosturin tarvitsema laitteiston käyttöjännite, kuten valaistus. [7]

Kaikki DynA Vector II -tuotteet voivat toimia sekä vaihto- että tasasuuntaajina. Nosturin laskiessa kuormaa tai jarruttaessa moottorit toimivat generaattoreina ja tuottavat energiaa. D2H ja D2C tasasuuntaavat jännitteen, jota voidaan hyödyntää muissa moottorikäytöissä. Ylimenevä jännite voidaan RTG:n tyypistä riippuen johtaa jarruvastuksiin, joissa se käytetään lämpöenergiana, käyttää akkujen lataukseen tai syöttää D2R:n kautta vaihtosuunnattuna takaisin verkkoon. [7]

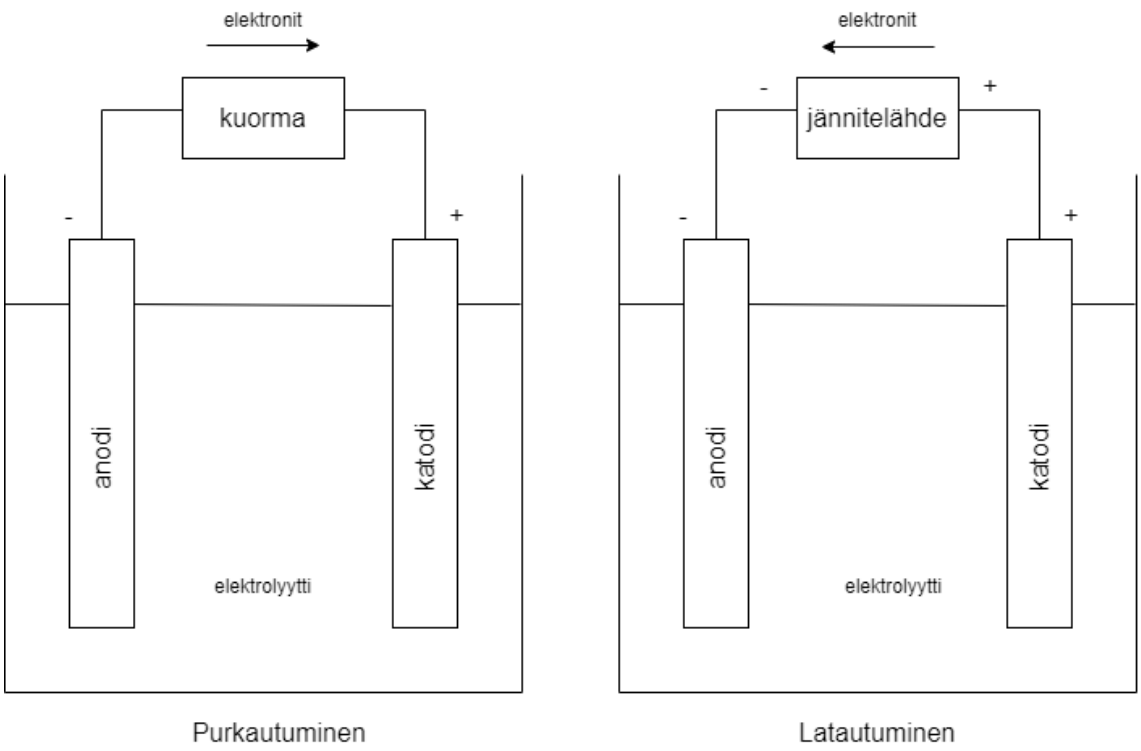
2.3 Täysakku-RTG

Akku on laite, joka muuntaa sen sisältämän materiaalin kemiallista energiaa sähköiseksi energiaksi hyödyntämällä sähkökemiallista hapetus-pelkistysreaktiota. Reaktiossa elektronit siirtyvät materiaalista toiseen virtapiirin kautta. Akku voidaan ladata, eli muuntaa sähköenergiaa takaisin kemialliseksi energiaksi, käänteistä reaktiota hyödyntäen. [9] Kuvassa 2.3 on esitettynä yksittäisen akkusolun rakenne ja elektronien kulkusuunta akun purkautumisen ja latautumisen aikana.

Akun kolme tärkeintä osaa ovat anodi, katodi sekä elektrolyytti. Anodi koostuu materiaalista, joka hapettuu sähkökemiallisen reaktion aikana, eli se luovuttaa elektroneja. Katodi taas pelkistyy eli vastaanottaa elektroneja. Elektrolyyttiä pitkin elektronit johtuvat anodilta katodille. Se on tyypillisesti liuos, joka sisältää esimerkiksi suoloja, happoja tai alkalimetalleja, mutta voi olla myös kiinteä tai geelin muodossa. [9]

Anodiin ja katodiin on kannattavaa hyödyntää materiaaleja, joilla saadaan akun jännite ja energiatiheys mahdollisimman korkeaksi. Energiatiheys tarkoittaa akun sisältämää sähköenergiaa suhteessa sen painoon (Wh/kg) tai tilavuuteen (Wh/l). Litiumia katodissa sisältäviä akkuja kutsutaan litiumioni (Li-ioni) akuiksi. Li-ioni akkuja hyödynnetään paljon sähköisissä liikkuvissa koneissa, kuten sähköautoissa ja myös tarkasteltavassa akku-RTG-nosturissa. Muita käytettyjä akkujen katodimateriaaleja ovat esimerkiksi polttomoottoriautojen akuissa käytettävä lyijy, nikkelikadmium ja nikkelimetallihydridi. [10]

Li-ioni akut ovat energiatiheydeltään jopa kaksinkertaisia muihin markkinoilla saatavissa



Kuva 2.3. *Akku sen purkautuessa ja lataututessa*

oleviin vaihtoehtoihin verrattuna. Lisäksi niillä saadaan aikaan korkeampi jännite, tyypillisen NiMH tai NiCd akun jännite on välillä 1,2–1,5 V, kun taas tyypillisen Li-ioni akun 3,2–3,8 V. Li-ioni akkujen kapasiteetti myös laskee ajan kuluessa vähemmän ja niillä on korkeampi elinikäodotus (engl. cycle life), eli lataussyklien määrä, esimerkiksi lyijyakkua voidaan purkaa ja ladata noin 300–500 kertaa, kun taas Li-ioni akulla määrä voi olla tuhansia. [10]

Li-ioni akkujen haittapuolena on, etteivät ne kestä hyvin ylilatausta ja liiallista tyhjentymistä. Anodille voi muodostua metallista litiumia, mikä johtaa purkautumisjännitteen alenemiseen ja lisää resistanssia. Myös akkukennon lämpötila vaikuttaa sen toimintaan. Akkua ladatessa paine sen sisällä nousee. Lämpötilan nousu johtaa paineen nousuun ja paineen nousu liian korkealla voi johtaa akun rikkoutumiseen. Yleisesti rajoina Li-ioni akun latauslämpötilalle pidetään 0–45 °C, mutta se vaihtelee erityyppisten akkujen välillä. Lämpötilan tarkkailussa voidaan hyödyntää termistoreja, eli vastuksia, joiden resistanssi on riippuvainen lämpötilasta. [11]

Li-ioni akkujen katodeissa käytetään monia erilaisia kemiallisia yhdistelmiä. Niistä yleisimmät liikkuvissa sovelluksissa ovat litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidi (NCM) sekä litium-rautafosfaatti (LFP). Anodeissa käytetään yleisimmin grafiittia, mutta myös litium-titanaattia (LTO) käytetään. [1][10] Taulukossa 2.1 on vertailtu yleisimpiä akkukemiatyyppejä.

Taulukosta nähdään, että NCM-akuilla on korkein energia- ja tehotiheys, sekä jännite.

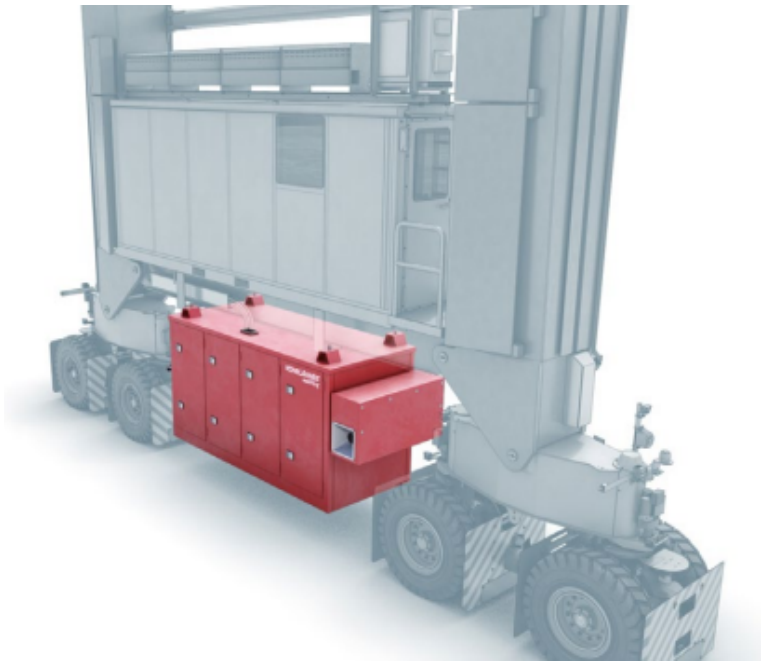
Taulukko 2.1. *Li-ioni akkukemioiden vertailua, muokattu lähteestä [10].*

akkutyyppi	NCM	LFP	LTO
energiatiheys (Wh/kg)	140–180	80–130	70
energiatiheys (Wh/l)	325	220–250	130
tehotiheys (W/kg)	500–3000	1400–2400	750
tehotiheys (W/l)	6500	4500	1400
jännite (V)	3,6–3,7	3,2–3,3	2,2–2,3
elinikäodotus	1000–4000	1000–2000	>4000
lämpötila-alue (℃)	-20 – +50	-20 – +60	-40 – +55

LFP-akkujen etuna on kuitenkin niiden halvempi hinta ja parempi kestävyys. Ne sietävät paremmin akun ylilatausta sekä toimivat korkeammissa lämpötiloissa. [10] Akkuja käsitellessä käytetään usein termiä varaustaso (engl. State of Charge, SoC), jolla tarkoitetaan akun jäljellä olevaa kapasiteettia. SoC ilmoitetaan muodossa [12]

$$\text{SoC} = \frac{\text{jäljellä oleva kapasiteetti}}{\text{maksimikapasiteetti}} \times 100\ \%. \tag{2.1}$$

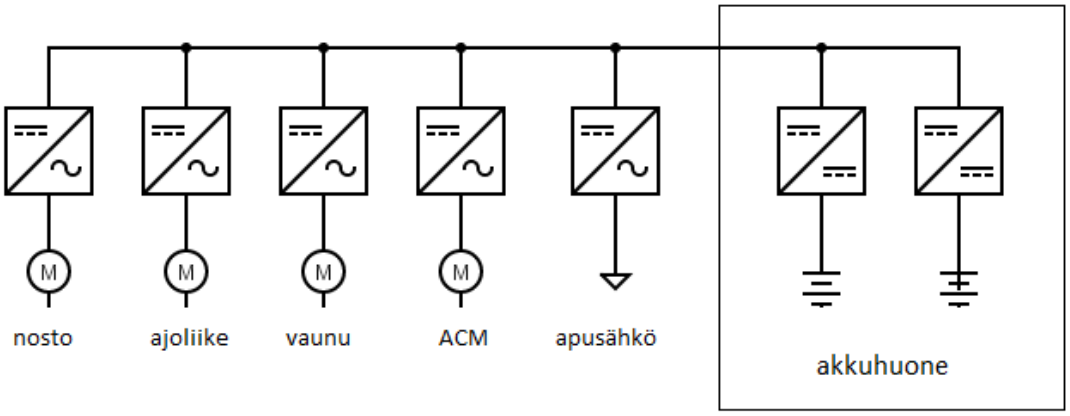
BE-RTG-nosturin akusto sijaitsee nosturin jalkakehikkoon kiinnitetyssä akkuhuoneessa. Sinne on sijoitettu myös akustonvalvontajärjestelmä (engl. Battery Management System, BMS), tasasuuntaajia sekä DC/DC jännitemuuntimia. Akkuhuone on varustettu ilmastointijärjestelmällä, joka viilentää tai lämmittää huonetta, jotta akkujen lämpötila pysyisi optimaalisena ulkoilman lämpötilasta huolimatta. [4] Akkuhuone esitetään kuvassa 2.4.



Kuva 2.4. *RTG -nosturin akkuhuone ja DC-latauspistoke [4].*

DC/DC muuntimet on kytketty akuston ja nosturin DC-väylän välille pitämään väylän jännite tasaisena. Ne myös muuntavat latauksen aikana väylältä akuille sopivaa latausjännitettä. RTG:n ja akkuhuoneen PLC:t kommunikoivat langattomasti Profinet-verkon kautta. BMS:n tarkoitus on tuottaa akuston toiminnasta informaatiota ja säädellä sen toimintaa. Se muun muassa arvioi akkumoduulien SoC-tasoja ja pyrkii pitämään ne keskenään samalla tasolla nosturin operoinnin sekä latauksen aikana. [4]

Akkuja tarjotaan kahdessa eri kokoluokassa, jotka on mitoitettu niin, että toisella RTG voi operoida sen tyypillisellä työsyklillä 8 tuntia ja toisella 4 tuntia. Akustossa on kaksi akkuketjua (engl. battery string), jotka koostuvat sarjaan kytketyistä akuista. Näin nosturi voi operoida alennetulla nopeudella silloin, jos toinen ketjuista vioittuu. Kummallakin akkuketjulla on oma DC/DC muuntimensa. [4] Kuvassa 2.5 on havainnollistettu komponenttien kytkeytymistä nosturin DC-väylään. Yksinkertaistamisen vuoksi kuvassa esitetään jokaiselle nosturin liikkeelle vain yksi moottorikäyttö sekä moottori, vaikka todellisuudessa moottorikäyttöjä voi olla liikkeelle useampi ja moottorikäyttöön voi olla kytkettynä useita moottoreita.



Kuva 2.5. *BE-RTG-nosturin sähkönsyöttö*

BE-RTG-nosturissa on sekä DC- että AC-latausmahdollisuus ja lisäksi jarrutusenergia hyödynnetään akkujen lataukseen. AC-lataus on toteutettu niin, että operaattorin on manuaalisesti asetettava virtaa johtavan kaapelin pistokkeen urososa nosturin pistokkeen naarasosaan. Marechal Electricin latausliittimet on esitetty kuvassa 2.6. Latausjännite on 400-500 V. Latauksen aikana akkuhuoneen sisäänrakennettua tasasuuntaajaa käytetään tasavirran tuottamiseen. [4]

DC-latauksessa hyödynnetään latausasemaa, joka suorittaa lataustapahtuman automaattisesti. Kuten kuvasta 2.4 nähdään, latauspistokkeen naarasosa sijoitetaan akkuhuoneen kylkeen. Latausasemaa tarkastellaan luvussa 3.

Kuva 2.6. *BE-RTG -nosturin AC-latausliittimet [13]*

2.4 Muut voimantuottotavat

Akuston lisäksi RTG-nosturin käyttämä sähkö voidaan tuottaa dieselgeneraattorilla tai hybridinä eli yhdistetyllä dieselgeneraattorilla ja akustolla. Nosturi voidaan myös kytkeä ulkoiseen sähköverkkoon, jolloin siinä itsessään ei ole sähköenergiaa tuottavaa komponenttia. FE-RTG voidaan kytkeä verkkoon kaapelikelan tai virtakiskon avulla.

Yleisin RTG:n voimantuottotapa on dieselgeneraattori. Dieselgeneraattorin komponentit, joista tärkeimmät ovat polttomoottori, generaattori sekä polttoainesäiliö, on sijoitettu koteloon, joka kiinnitetään nosturin jalkakehään. Dieselin palamisreaktiossa vapautuu energiaa, joka tuottaa polttomoottorissa mekaanista liikettä. Generaattori muuntaa liike-energian sähköenergiaksi. Generaattoreita on tasanopeuksisia (engl. fixed speed generator), joiden kierrosluku pysyy samana, ja muuttuvanopeuksisia (engl. variable speed generator, VSG), joiden kierrosluku muuttuu nosturin tarvitseman tehon mukaan. Jos nosturilla ei ole tehontarvetta, dieselgeneraattori toimii tyhjäkäynnillä. [14]

Dieselin hyötynä on sen korkea energiatiheys, 11,6 kWh/kg tai 9,7 kWh/l [15]. Jos verrataan taulukon 2.1 arvoihin, dieselin energiatiheys on massan tapauksessa yli satakertainen ja tilavuuden monin kymmenkertainen akkuihin verrattuna. Dieselnosturin polttoainesäiliö on mitoitettu niin, että sen täyttämiseen kuluu noin 5–8 minuuttia ja täydellä säiliöllisellä nosturia voidaan operoida tyypillisellä työsyklillä jopa 5 vuorokautta. [14] Dieselin palamisreaktiossa syntyy kuitenkin hiilidioksidia noin 2,689 g yhtä polttoainelitraa kohti [16].

Hybridi-RTG-nosturi hyödyntää sekä dieselgeneraattoria että Li-ioniakustoa. Kuten täysakkunosturissa, akusto ja muut tarvittavat komponentit sijaitsevat akkuhuoneessa. Akkuhuone on sijoitettu sähköhuoneen alle jalkakehään ja dieselgeneraattori sijaitsee nosturin

toisessa jalassa. Akut ovat hybridinosturin pääasiallinen tehonlähde ja dieselgeneraattoria käytetään niiden lataukseen. Dieselgeneraattori käynnistyy ja aloittaa latauksen, kun akkujen SoC on 35 % ja lopettaa kun SoC saavuttaa 65 %. Myös nosturin jarrutusenergia hyödynnetään akkujen latauksessa, joten dieselgeneraattorin ei ole tarpeellista ladata akkuja täyteen. [14]

Tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin Felixstowen sataman RTG-nostureita, arvioitiin että nostoliikkeen energiasta noin 70–80 % voidaan saada laskuliikkeessä takaisin. Ajoliikkeen energiasta taas vain 3–5 % oli hyödynnettävissä jarrutuksesta. Yhteensä noin 50–57 % nosturin tyypillisellä operaatiolla päivän aikana käyttämästä energiasta oli saatavissa takaisin. Tutkimuksessa arvioitiin, että nosturia kohden voisi säästää vuodessa yhteensä 78,25 MWh energiaa, joka vastaisi 32,600 l polttoainetta ja 81 tonnia hiilidioksidia. [17]

Kaapelikela-RTG on esitetty kuvassa 2.1. Siinä teho tuodaan nosturiin kaapelilla, joka kelataan kaapelikelaan ja siitä pois, joko maahan tai kaapelille tarkoitettuun uraan, nosturin liikkuessa. Kaapelin syöttöpiste voidaan sijoittaa joko ajoradan loppuun tai keskelle sitä. Kaapeli voi mahdollistaa nosturille jopa 450 m liikkeen syöttöpisteestä. Nosturin päässä on liukurenkaat, jotka siirtävät tehoa kaapelilta. Kaapelikelan pyörittämiseen on oma moottori ja kelan alapuolella on ohjain, joka varmistaa, ettei kaapeli kiristy liikaa tai liian vähän ja mahdollistaa suunnan vaihtamisen, kun syöttöpiste on sijoitettu keskelle ajoratata. [18]

Kuva 2.7. *RTG:n virtakisko [19].*

Virtakiskojärjestelmä esitetään kuvassa 2.7. Se koostuu virranottimesta (engl. conductor rail) ja työntösylinteristä (engl. telescopic arm). Virranotin on alumiininen johdin, jota kannattelevat maahan kiinnitetyt teräsrakenteet. Se on tietystä syöttöpisteestä kytketty kaapelilla ulkoiseen sähköverkkoon. Työntösylinteri on RTG:n jalkakehikossa kiinni oleva

laite, jonka pidentyvä varsi voi ulottua jopa 1700 mm pituuteen. Sen päässä on hiiliharjat, jotka siirtävät tehoa virranottimelta nosturiin. RTG ajetaan virtakiskon viereen, jolloin työntösylinteri pitenee ja kiinnittyy kiskoon. Nosturi tarvitsee kiskon ulkopuolella operoimiseen apudieselgeneraattorin tai -akuston, joka voi olla joko sisäänrakennettu tai ulkoinen. [19]

Tutkimuksessa muunnettiin nimeämättömän satama-alueen 25 dieselkäyttöistä nosturia virtakiskolla syötetyiksi. Nostureiden vuoden hiilidioksidipäästöjä laskettiin ja verrattiin aikaisempiin vuosiin. Dieselillä CO2 päästöiksi laskettiin 7 157 673 kg/vuosi ja sähköllä 2 622 619 kg/vuosi, eli niitä saatiin sähköistämällä vähennettyä jopa 68 %. [20]

Sähköisissä ratkaisuissa on myös hyötynä se, että niissä tarvitaan vähemmän komponentteja ja järjestelmä on kokonaisuudessaan yksinkertaisempi. Myös vaiheita, joissa energia muuttaa muotoaan on vähemmän, eli tehohäviöitäkin syntyy vähemmän. Kun merikonttien siirtämiseen käytettäviä automaattisesti ohjautuvia ajoneuvoja (engl. Automated Guided Vehicle) tutkittiin, huomattiin että akkukäyttöisen ajoneuvon kokonaishyötysuhde on 71 %, kun taas dieselkäyttöisen vain 26 %. [21]

3. RTG-NOSTURIN LATAUSASEMA

Tässä luvussa käsitellään BE-RTG-nosturin latausasemaa. Luvussa tarkastellaan hieman latausasemia yleisellä tasolla ja esitellään nosturin latausaseman rakennetta ja komponentteja. Lataustapahtumaa kuvataan lyhyesti, mutta siihen syvennytään enemmän luvussa 4.

Liikkuvien koneiden akkujen lataamiseen on eri tapoja. Niistä yleisin, jota tässäkin työssä tarkastellaan, on konduktiivinen lataus, jossa virta johdetaan koneeseen esimerkiksi kiinnitettävää kaapelia pitkin. On myös mahdollista käyttää induktiivista latausta, jossa energia siirretään induktion avulla latauspisteen sisältämästä kelasta koneen sisältämään kelaan. Lisäksi yksi vaihtoehto on vaihtaa akut niiden tyhjentyessä uusiin ja ladata akut koneen ulkopuolella. Konduktiivinen lataus voidaan toteuttaa sekä tasa- että vaihtovirralla. DC-lataus mahdollistaa AC-latausta korkeamman lataustehon ja nopeamman latauksen. Siinä kuitenkin on toteutettava tasasuuntaus latausasemaan, mikä tekee järjestelmästä monimutkaisemman ja kalliimman. [22]

Sähköautojen DC-latausasemiin liittyen on kehitetty standardeja, joista osa on hyödynnettävissä myös nosturien latausasemien suunnittelussa. Latausaseman olisi kyettävä havaitsemaan oikosulku, maavika, vuotovirta ja ylijännite, sekä lopettamaan lataus automaattisesti vikatilanteessa. Latausaseman ja laitteen välinen kytkentä pitäisi olla varustettu mekanismilla, joka varmistaa, että asema ja laite pysyvät fyysisesti ja sähköisesti yhdistettyinä lataustapahtuman aikana. Sähköisessä liittimessä ei myöskään saisi olla ihmiselle haitallisen korkeaa jännitettä, silloin kun liitin ei ole kytkettynä laitteeseen. Latausaseman ja laitteen välillä olisi oltava tietoliikenneyhteys, jota käytetään latauksen ohjauksessa tarvittavien parametrien jakamisessa. Jos yhteys katkeaa, latausaseman pitäisi pystyä pysäyttämään lataus. Latausaseman olisi myös kyettävä ilmoittamaan latausprosessin status käyttäjälle. [23]

Akkujen lataustavat voidaan karkeasti jakaa hitaaseen ja nopeaan lataukseen. Hitaana latauksena pidetään yleensä lataustapaa, jossa akkujen lataukseen täyteen kuluu 8 tuntia tai enemmän. Nopeassa latauksessa taas 1 tunti tai vähemmän. Suurten koneiden, joihin nosturitkin lukeutuvat, kohdalla voidaan kuitenkin pitää nopeana 2 tunnin latausta. [24]

Akkujen latausta käsitellessä hyödynnetään usein käsitettä C-arvo, joka voidaan ilmoittaa muodossa

$$\text{C-arvo} = \frac{I}{E_r}, \tag{3.1}$$

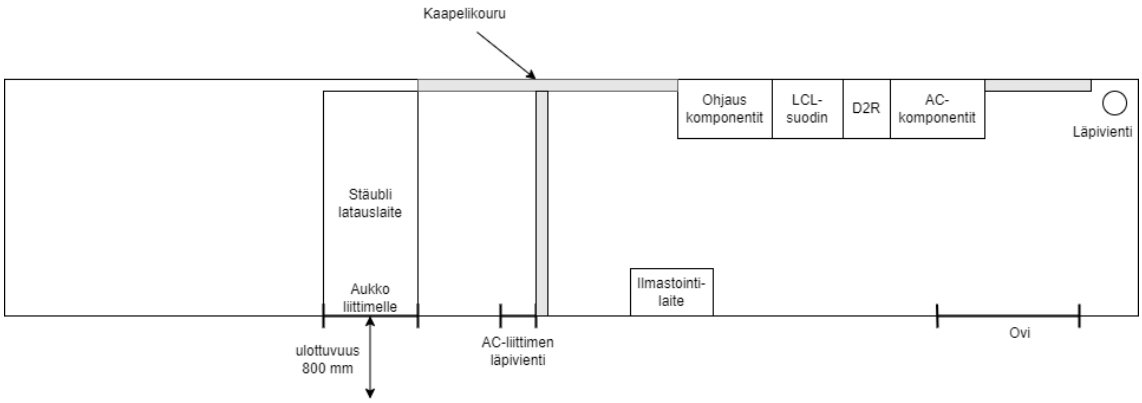
jossa I on virta, jolla akkua ladataan tai jolla se purkautuu ja E_r on akun kapasiteetti ampeeritunteina. C-arvon avulla voidaan laskea akun lataamiseen kuluva aika, t = 1 h/C, eli esimerkiksi lataamiseen C-arvolla 2 C kuluu 0,5 h. [1] BE-RTG-nosturin pienempää ja suurempaa akustovaihtoehtoa on suunniteltu ladattavan samalla C-arvolla, eli niiden lataukseen kuluisi sama aika. Tämä tarkoittaa, että suuremman akuston lataamiseen on käytettävä suurempaa tehoa. Mitä korkeampi on ladattavan akun kapasiteetti, sitä suuremmalla virralla sitä voidaan ladata aiheuttamatta akkua vaurioittavaa lämpötilan nousua [22]. Vaihtojännitteestä tasasuunnatun latausjännitteen aaltoilu pitäisi pitää alle 4 % ja virran alle 5 %, jotta lämpötilan nousulta vältyttäisiin [24].

Akkujen latauksessa käytetään usein vakiovirta-vakiojännite algoritmia. Algoritmin lataussykli voidaan jakaa neljään vaiheeseen. Ensimmäistä vaihetta hyödynnetään tyhjentyneille akuille, joiden jännite on laskenut matalalle. Ladataan maksimissaan 0,1 C virralla, kunnes sen jännite saavuttaa 80 % akun nimellisjännitteestä. Toisessa vaiheessa akkua ladataan vakiovirralla, jonka C-arvo on tyypillisesti 0,2–1 C. Vakiovirtavaihetta jatketaan, kunnes akun jännite on 115 % nimellisjännitteestä. Kolmas vaihe on vakiojännitteellä lataus, jolla akku ladataan, kunnes sen SoC saavuttaa 90–95 %. Neljännessä vaiheessa akkua ladataan vielä täyteen 0,02–0,07 C virralla. Sitä käytetään esimerkiksi lyijyakkujen latauksessa, mutta Li-ioniakkujen kohdalla lataus kannattaa lopettaa vakiojännitevaiheen jälkeen, jotta vältyttäisiin ylilataukselta ja metallisen litiumin muodostumiselta anodille. [11][24] BE-RTG:n akkuja on suunniteltu ladattavan latausasemalla vain sellaisella SoC välillä, joka voidaan toteuttaa vakiojännitteella.

RTG-nosturin DC-latausasema rakennetaan standardin mukaiseen 40 jalkaiseen merikonttiin. Kontin mittasuhteet metreinä ovat pituus 12,192 m, korkeus 2,591 m ja leveys 2,438 m [25]. Näin aseman kuljettaminen on helppoa ja se voidaan sijoittaa satamaalueelle helposti, jopa muiden merikonttien sekaan. Latausaseman sisältävät komponentit pyritään sijoittamaan niin, että sen painopiste on lähellä merikontin keskikohtaa. Tämä helpottaa nostotapahtumaa kontin kuljetuksen ja lopullisen sijoituksen aikana. [26]

Latausasema sisältää Stäublin latauslaitteen ja sähkökaapit, joihin on sijoitettu tasasuuntaava D2R, PLC sekä tarvittavat sulakkeet, kytkimet ja muut komponentit. Latausasemaan asennetaan myös AC-lataukseen tarvittavat komponentit ja lataustapa voidaan valita mekaanisen kytkimen avulla. Kuvassa 3.1 on yksi esimerkki miten latausaseman komponentit voitaisiin sijoitella merikontin sisälle.

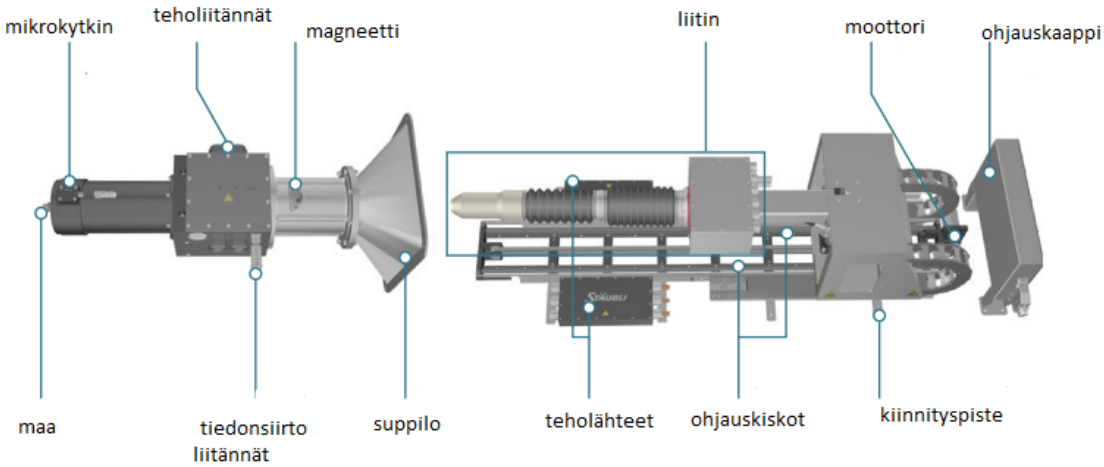
Kuvassa 3.1 näkyvien komponenttien lisäksi kontissa on oltava valaistus katossa sekä sähkökaappien sisällä, sekä useampia hätäseis-painikkeita. Sähköisiä komponentteja on suojattava pölyltä ja lialta. Latausasemassa on oltava lämmönsäätelyjärjestelmä, jotta



Kuva 3.1. *Latausaseman komponenttien sijoittelu, lähteen [26] pohjalta*

komponentit pysyvät niille optimaalisella lämpötila-alueella niiden tuottamasta lämmöstä sekä ympäristön lämpötilasta huolimatta. Tämä voidaan toteuttaa ilmalämpöpumpun avulla, mutta esimerkiksi myös elintarvikkeiden kuljetuksessa käytettävää valmiiksi lämmönsäätelyjärjestelmällä varustettua konttia voisi hyödyntää.

Stäublin latauslaitetta on hyödynnetty esimerkiksi akkukäyttöisten bussien, trukkien ja veneiden latauksessa. Laitteen mitat ovat pituus 2,3 m, leveys 1,0 m ja korkeus 0,8 m. Se mahtuu siis suhteellisen pieneen tilaan ja sopii myös merikonttiin. Latauslaite kiinnitetään alustaansa kiinnityspisteistään pulttien avulla, eli se on helposti asennettava ja tarvittaessa vaihdettava. Valmistaja lupaa laitteen kykenevän jopa 100 000 lataussykliin ilman huoltovälejä. [27] Latauslaite sekä sen lataamassa laitteessa sijaitseva vastaanotin on esitetty kuvassa 3.2.



Kuva 3.2. *DC-latauslaitteisto, muokattu lähteestä [27].*

Latauslaitteen liitintä voidaan liikuttaa moottoroitujen ohjauskiskojen avulla ulos kontista latausta varten. Lataustapahtuman ulkopuolella liittimen on tarkoitus sijaita kokonaan latausaseman sisällä. Latauspistokkeen reunalla on suppilo, joka ohjaa joustavan liittimen

paikalleen, vaikka osat eivät olisi täysin samalla kohdalla. Eroa voi olla maksimissaan 250 mm vaakasuunnassa ja 200 mm pystysuunnassa. Liittimen kytkeytyminen nosturiin oikein varmistetaan magneettikytkimen avulla. Liitintä voidaan myös siirtää aivan kiskojen alku- tai loppupäähän huoltotoimenpiteiden vuoksi.

Latausaseman puolen laitteistoon kuuluu myös ohjauskiskoja liikuttavan moottorin tehölähteet, sekä ohjauskaappi, jonka kautta laite kommunikoi latausaseman PLC:n kanssa. [27] Sähkökaappiin on sijoitettu ohjauspaneeli, josta latauslaitetta voidaan manuaalisesti liikuttaa ja käynnistää tai lopettaa lataus. Sitä voidaan hyödyntää aseman testauksessa, huoltotoimenpiteissä sekä vikatilanteiden määrittämisessä ja ratkaisussa.

Latausaseman DynAReg on kytketty syöttöjännitteeseen, jonka se tasasuuntaa nosturin DC-väylään yhdistyneelle latauslaitteelle. Aseman käyttämä syöttöjännite on 400–500 V ja konttiin voidaan asentaa muuntaja tuottamaan tarvittava jännite ulkoisesta sähköverkosta. [4] Tarvittavat kytkennät voidaan tuoda merikonttiin läpivienneillä sen lattiasta tai seinästä. Jälkimmäisessä tapauksessa on varmistettava, etteivät kaapelit häiritse nosturin operointia tai etteivät nosturi tai viereiset kontit pääse vahingoittamaan niitä. Myös esimerkiksi ilmalämpöpumpun ulkoyksikön sijoituksessa on otettava huomioon latausaseman ympäristö. [26]

Kuva 3.3. *Latausasema kytkettynä BE-RTG-nosturiin [4].*

Lataustilannetta on havainnollistettu kuvassa 3.3. RTG-nosturi ajetaan latausaseman vierelle, korkeintaan 800 mm päähän latausasemasta. Nosturin ajamisessa latausaseman kohdalle voidaan käyttää automaattista ohjausta (engl. auto-steering), ominaisuutta jossa nosturi liikkuu automaattisesti hyödyntäen maailmanlaajuista paikallistamisjärjestelmää (engl. Global Positioning System, GPS) [6]. Nosturin ja aseman sijaintia toisiinsa nähden pituussuunnassa, sekä etäisyyttä toisistaan voidaan mitata lasereiden avulla ja näin varmistaa, että paikka on sopiva latausaseman kytkeytymiselle.

Nosturin ajoliike estetään latauksen ajaksi, sen voi kuitenkin olla mahdollista liikuttaa vaunua ja tehdä nostoja samaan aikaan. Tämä voisi olla hyödyllistä tapauksissa, joissa latauskontti on sijoitettu nosteltavien merikonttien sekaan. Lataus käynnistetään ja lopetetaan joko nosturista, tai latausasemalta käsin ohjauspaneelin avulla. Lataustapahtuman tilasta viestitään kontin ulkopuolelle asennetulla merkkivalolla [26].

Automaattisen lataustapahtuman hyötynä on se, ettei joko nosturin operaattorin tai toisen työntekijän tarvitse käydä kytkemässä nosturia lataukseen. Tämä säästää siis aikaa ja vähentää fyysistä työtä, sekä mahdollistaa toiminnan myös tilanteissa, joissa nosturit toimivat automaattisesti tai jossa niitä ohjataan etätyöpisteeltä käsin. Myös operaattorien pitämät lyhyemmät tauot, joiden aikana ei ehdi poistua ohjaamosta, voidaan hyödyntää akkujen latauksessa. Lisäksi on turvallisempaa, kun työntekijän ei tarvitse koskea latausliittimiin. Latausasemat on kuitenkin onnistuttava sijoittamaan satama-alueelle, ja niiden rakentaminen sekä huoltotoimenpiteet aiheuttavat lisäkustannuksia.

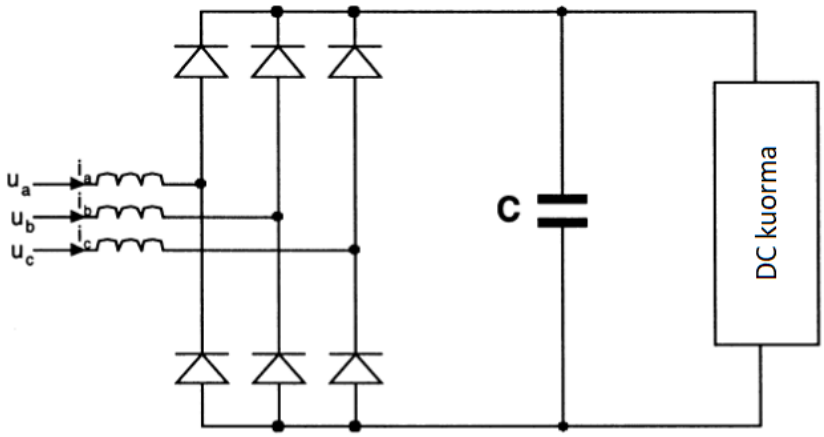
4. DYNAREG TASASUUNTAAJANA

DynAReg on verkkoonjarrutuslaite, jota voidaan hyödyntää myös tasasuuntaajana. Latausasemassa se on kytketty vaihtojännitteen ja latauslaitteen välille. Muissa kuin akkukäyttöisissä RTG-nostureissa sitä hyödynnetään muuntamaan voimantuoton AC-jännite DC-jännitteeksi nosturin DC-väylälle.

Tässä luvussa käydään ensin läpi tasasuuntauksen ja sen säädön teoriaa alaluvussa 4.1. Alaluvussa 4.2 kuvataan yleisesti D2R-yksikön rakennetta ja toimintaa. Lataustapahtumaa ja D2R-yksikön käyttäytymistä sen aikana kuvataan alaluvussa 4.3.

4.1 Ohjattu tasasuuntaus

Vaihtojännitettä voidaan tasasuunnata hyödyntämällä diodeja, jotka johtavat vain jännitteen positiivisten tai negatiivisten puolijaksojen aikana. Kolmivaihejännitteen tasasuuntaamisessa on yleisintä hyödyntää diodisiltaa. Diodisilta on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. *Tasasuuntaava diodisilta, muokattu lähteestä [28].*

Tasasuunnatun DC-jännitteen keskiarvo voidaan yleisesti kirjoittaa muodossa

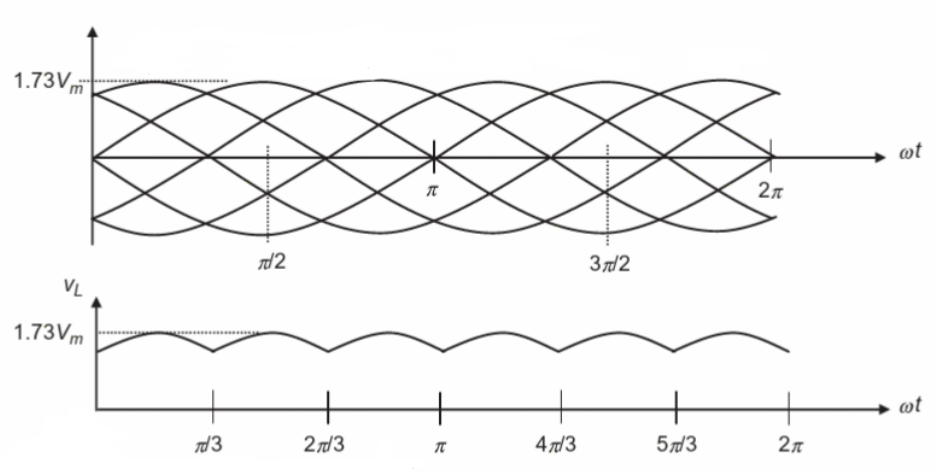
$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T v_L(t)\, dt \tag{4.1}$$

jossa T on vaihtojännitteen jännitejakson jaksonaika ja $v_L(t)$ vaihtojännite ajan funktio-

na. Kaavasta 4.1 voidaan johtaa diodisillan avulla tasasuunnatulle kolmivaihejännitteelle muoto

$$V_{dc} = \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{3} V_m \sin\theta \, d\theta = V_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} = 1,654 V_m, \tag{4.2}$$

jossa V_m on vaihejännitteen, eli vaiheen ja nollan välisen jännitteen, tehollisarvo. Kuvassa 4.2 on ylempänä kuvaaja syötettävistä pääjännitteistä, eli eri kolmivaihejärjestelmän vaiheiden välisistä jännitteistä, sekä alempana kuvaaja diodisillan avulla tuotetusta tasajännitteestä. Kuvaajissa v_L merkitsee pääjännitettä ja V_m vaihejännitettä. [29]

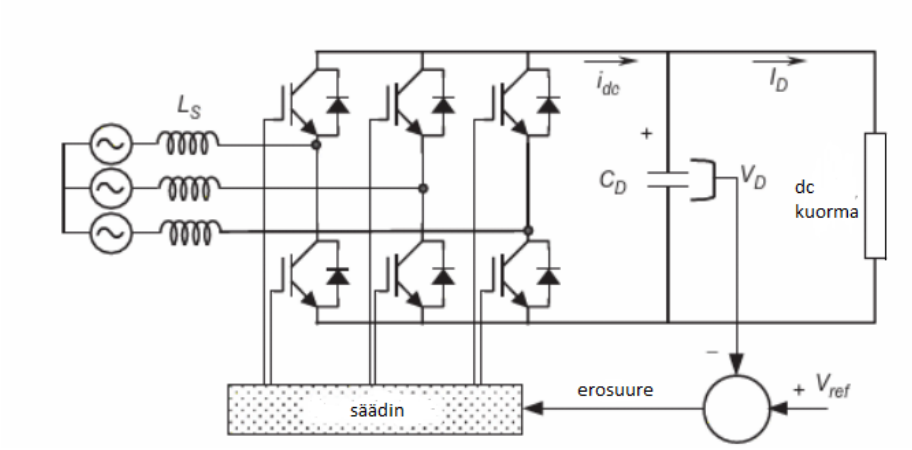


Kuva 4.2. *AC-pääjännitteet sekä syntyvä tasajännite, muokattu lähteestä [29].*

Tasasuuntaussovelluksissa käytetään suotimia tasoittamaan ulostulojännitettä ja sisään menevää virtaa. Suotimena voidaan hyödyntää induktanssia, kapasitanssia tai molempia LC-suotimessa. LC-suodin on tehokas suodattamaan sekä jännitettä, että virtaa. Kela komponenttina kuitenkin vie tilaa ja on kallis. Pelkkä kondensaattori suodattaa hyvin DC-jännitettä, mutta sisäänmenovirtaa heikommin. Kondensaattoria hyödyntävä suodin toimii hyvin alhaisen tehon sovelluksissa, ja sillä saavutetaan enemmän hyötyä sen tilavuuteen nähden. [30]

Koska diodien toimintaa ei voida ohjata, pelkkää diodisiltaa ei voida hyödyntää sovelluksissa, joissa tasajännitettä halutaan säätää. Ohjattu tasasuuntaus voidaan toteuttaa esimerkiksi korvaamalla diodit tyristoreilla tai kytkemällä DC/DC muunnin diodisillan kanssa rinnan, mutta teollisuudessa eniten hyödynnetty tapa on kytkeä jokaisen diodin kanssa rinnan kytkimenä toimiva transistori. Tällainen laite voi toimia toiseen suuntaan myös vaihtosuuntaajana. Sen rakennetta ja säätöä havainnollistetaan kuvassa 4.3. [28][29]

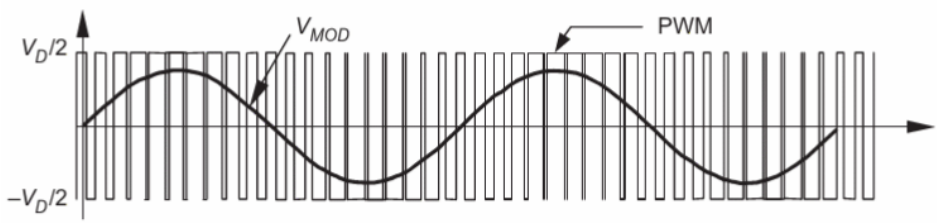
Jokaista vaihetta kohtaan on kaksi diodin ja transistorin paria, jotka on merkitty päällekkäin kuvassa 4.3. Näistä transistoreista aina toinen kerrallaan on johtavassa tilassa, sillä jos molemmat olisivat päällä seuraisi oikosulku ja jos molemmat pois päältä, laite operoisi



Kuva 4.3. *Ohjatun tasasuuntaajan piirikaavio, muokattu lähteestä [29].*

vain diodien kautta. Transistorit voivat tuottaa siis kaksi eri jännitetasoa, V_D/2 ja -V_D/2, kun V_D on tasajännitteen suuruus. [28]

Transistoreja voidaan ohjata päälle ja pois päältä satoja kertoja yhden vaihejännitteen jakson aikana. Tämä mahdollistaa pulssinleveysmodulaation (engl. pulse-width modulation, PWM) hyödyntämisen ja tehokertoimen säädön. Pulssinleveysmodulaatiossa kytkimien päälle ja pois kytkeminen tuottaa diskreetin jännitesignaalin. Signaalin perustaajuinen aalto on tasasuuntaussovelluksissa vaihtojännitesignaali, jonka taajuus on sama kuin syöttöjännitteen. Kuvassa 4.4 on kuvattuna diskreetti PWM-signaali, sekä perustaajuinen aalto V_{MOD}. [29]



Kuva 4.4. *PWM-signaali ja sen perustaajuinen aalto [29].*

Modulointisignaalin amplitudia ja vaihetta voidaan muuttaa PWM-signaalia muokkaamalla. Transistorien päälle ja pois kytkeytyminen pakottaa sisäänmenovirrat noudattamaan modulointisignaalia ja näin voidaan vaikuttaa syntyvän DC-jännitteen korkeuteen, sekä suodattaa pois mahdollisia syöttöjännitteen häiriöitä. Tasajännite on kuitenkin pidettävä korkeampana kuin jännite, joka syntyisi pelkällä diodisillalla, tai diodit eivät pysy negatiivisesti polarisoituneina ja laite alkaa operoida kuin tavallinen diodisilta. [29]

Säätö toteutetaan niin, että tasajännite V_D mitataan kapasitanssin C_D yli ja sitä verrataan jännitteen asetusarvoon V_{ref}. Todellisen ja asetusarvon välinen virhe, eli erosuure, annetaan sisäänmenona säätimelle, joka tuottaa sen perusteella PWM-signaalit kytkimille. Tasasuuntauksessa hyödynnettyjä säätöalgoritmeja on useita. Usein kolmivaihejän-

nitteet muunnetaan kaksiulotteiseen $\alpha\beta$- tai dq-koordinaatistoon. Tämän avulla voidaan esimerkiksi säätää koordinaatiston komponentteja erikseen skalaarisesti PI-säätimellä tai hyödyntää tilamallia. [29]

Usein säätöalgoritmi tuottaa sinimuotoiset signaalit, jotka on vielä muunnettava kytkimiä ohjaavaksi diskreetiksi signaaliksi modulaattorin avulla, mutta joillakin algoritmeilla on mahdollista tuottaa suoraan diskreettiä signaalia. Modulointi voidaan toteuttaa esimerkiksi vertaamalla modulointisignaalia sitä taajuudeltaan korkeampaan ja amplitudiltaan vähintään yhtä korkeaan saha-aaltoon. Avaruusvektorimodulaatiossa (engl. space vector modulation) taas haluttu kolmivaihesignaali muunnetaan kaksiulotteiseen koordinaatistoon, ja valitaan kytkimien eri tiloja edustavista vektoreista sitä lähin. [28]

4.2 Rakenne ja toiminta

DynAReg koostuu tehoyksiköstä, eli varsinaisesta jännitemuuntimesta, ja ohjausyksiköstä, joka toteuttaa muun muassa säätöalgoritmin ja vikavalvonnan. Ohjausyksikköön kuuluu ohjauskortti ja siinä on paikat, joihin voidaan kytkeä valinnaisia ohjauskortteja lisäominaisuuksien toteuttamiseksi. Yhteen korteista kytketään aina säädössä tarvittavat sisäänmenot ja ulostulot. Ohjausyksikössä on ohjauspaneeli, josta D2R voidaan käynnistää, sulkea, nollata vikakoodit, sekä muuttaa sen parametrejä. [31] Testilatausaseman sähkökaapissa sijaitseva DynARegin ohjainyksikkö on esitetty kuvassa 4.5.

Kuva 4.5. *D2R ohjausyksikkö [32]*

Lisäksi kytkentään kuuluu erillinen latauspiiri ja LCL-suodin. Latauspiiri sisältää tasasuuntaajan, latausvastuksen, sekä kontaktorin ja se nostaa DC-väylän jännitteen sopivalle tasolle ennen kuin varsinainen tehoyksikkö käynnistyy. [31] LCL-suodin koostuu induktanssista ja kapasitanssista. Sitä käytetään yleensä vaihtosuuntauksessa vaihtosuuntaajan ja verkon välillä suodattamassa pois vaihtosuuntauksessa syntyviä harmonisia komponentteja. [33] Tasasuuntauksessa sitä hyödyntämällä voidaan laskea tasasuuntaajan kytkentätaajuutta ja näin vähentää komponenteissa tapahtuvia tehohäviöitä [34]. Tasajännitepuolella on DC-sulakkeet suojaamassa oikosululta.

Kuva 4.6. *Latausaseman D2R tehoyksikkö ja LCL-suodin, muokattu lähteestä [32]*

Kuvaan 4.6 on yhdistetty valokuvat testilatausaseman vierekkäisistä sähkökaapeista. Kuvassa näkyy vasemmalla LCL-suodin ja oikealla DynARegin tehoyksikkö. DC-kiskot sijaitsevat kaappien takaseinässä ja niiden ja tehoyksikön välille on kytketty sulakkeet. Komponenttien eteen on asennettu suojaksi kirkkaat muovilevyt.

Useita DR2-yksiköitä voidaan kytkeä rinnan. Ne toimivat itsenäisesti, eli niillä ei ole yksiköitä, jotka ohjaajat muita yksiköitä. Tämä mahdollistaa modulaarisuuden, yksiköitä voidaan kytkeä lisää, jos tarvitaan enemmän tehoa. Lisäksi, jos yksi monesta D2R-yksiköstä hajoaa, voidaan jatkaa toimintaa alemmalla teholla. Järjestelmään on toteutettu suojauk-

set yli- ja alijännitteelle, ylikuormalle, ylikuumenemiselle, oikosululle ja maavialle. DynA-Regissa on vikarele, joka aukeaa, kun vika huomataan ja estää laitteen toiminnan. [31]

D2R:n ohjausyksiköllä on lista parametreja, joilla voidaan muuttaa laitteen toimintaa, esimerkiksi määrittää virtaraja. Silloin kun D2R ei ole käynnissä parametreja voidaan määrittää ohjauspaneelin kautta tai ohjelmiston avulla kytkemällä tietokone ohjausyksikköön. Toiminnan aikana niitä voidaan muuttaa PLC:n kautta. Tavallisessa käytössä nosturissa, ja myös latausasemassa, ohjaus onkin toteutettu PLC:n avulla.

PLC ja D2R kommunikoivat keskenään Profinetin kautta. PLC saa tietoa esimerkiksi todellisesta ulostulojännitteestä, mahdollisista vioista ja yksikön lämpötilasta. Se voi määrätä D2R-yksikön käynnistymään ja muuttaa parametrien arvoja. Tärkeimmät parametrit latausasemasovelluksessa ovat ulostulojännitteen asetusarvo, sekä tehoraja. Lataustilanteessa jännitteen asetusarvoksi annetaan haluttu latausjännite ja tehoraja nostetaan haluttuun maksimitehoon. Kun latausasema on kytkettynä nosturiin, mutta lataus ei ole käynnissä, jännitteen asetusarvo vastaa tavallista nosturin DC-väylän jännitettä ja tehoraja ohjataan nollaksi.

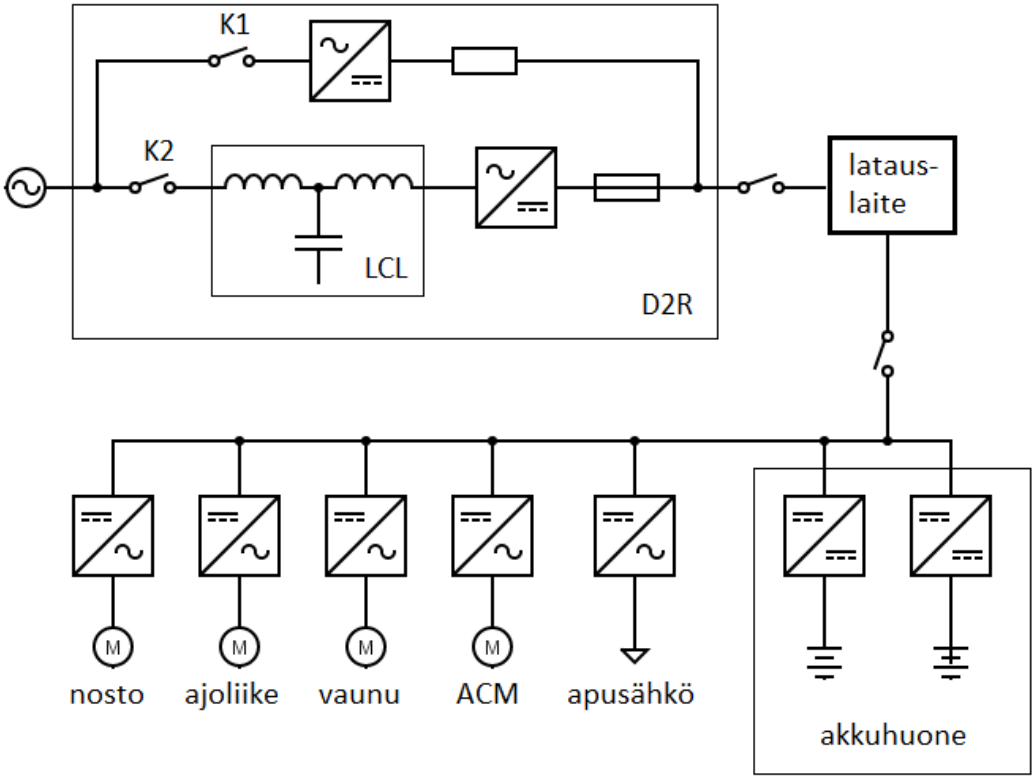
4.3 Lataussekvenssin kuvaus

Lataus voidaan käynnistää nosturista käsin, jolloin latausasema toimii automaattisesti, tai latausta voidaan manuaalisesti ohjata latausaseman ohjauspaneelin avulla. Kun latauskäsky annetaan nosturista nappia painamalla, latauslaitteen liitin liikkuu asemakontin ulkopuolelle ja kytkeytyy magneettikytkimen avulla nosturiin. Jos liitin ei löydä oikeaa kohtaa, se liikkuu takaisin konttiin. Liittimen kytkeytymisen jälkeen nosturin DC-kontaktorit sulkeutuvat. Latausasemalla mitataan nosturin DC-väylän jännite ja varmistetaan, että se on sopivalla tasolla latausta varten.

Kuvassa 4.7 havainnollistetaan latausaseman kytkeytymistä nosturin DC-väylään lataustapahtuman aikana. Kuvassa alempi tasasuuntaaja ilmaisee varsinaista latauksessa hyödynnettyä tehoyksikköä ja ylempi sen latauspiiriä. Kuvaan on merkitty tärkeimmät lataustapahtumassa hyödynnettävät kontaktorit.

DynAReg aloittaa toimintansa, kun PLC ohjaa kytkimen, joka sulkee latauspiirin kontaktorin K2, sulkeutumaan. K2 sulkeutuu, jos hätäseis ei ole painettuna eikä vikarele ei ole auki. DC-väylän jännitettä kasvatetaan noin 3–5 s. Kun se on saavuttanut halutun tason, rele ja apukontaktori sulkevat varsinaisen tasasuuntauspiirin kontaktorin K1. D2R on nyt valmiustilassa. [31]

Seuraavaksi PLC ohjaa DynARegin aloittamaan tasasuuntauksen. DC-jännitteen asetusarvoparametrille annetaan latausjännitettä vastaava arvo, jonka on oltava RTG:n DC-väylän jännitettä korkeampi. Tehorajaparametria nostetaan rampin kautta haluttuun maksimitehoon. D2R-yksikön ja latauslaitteen välinen kontaktori sulkeutuu ja virta kulkee



Kuva 4.7. *Kaavio nosturin lataustapahtumasta*

akuille. Akkuhuoneen PLC ohjaa laataustehoa latauksen eri vaiheissa.

Lataus lopetetaan, kun lopetuskäsky annetaan nosturista käsin. PLC ohjaa DynARegin pois päältä ja tehoraja lasketaan rampin kautta nollaksi. DC-jännitteen asetusarvolle annetaan taas tavallista nosturin DC-väylän jännitettä vastaava arvo. DC-kontaktorit DynARegissa ja nosturissa avautuvat. Latauslaitteen liitin irtoaa ja se liikkuu takaisin latausaseman sisälle. RTG voi taas käyttää ajoliikettä ja operoida normaalisti.

Latausaseman käyttöliittymä esitetään kuvassa 4.8. Se sisältää on painikkeita sekä näytön, jolta voidaan lukea tietoa lataustapahtumasta. Tuotettu teho, jännite ja virta, sekä vaihejännitteet ja -virrat ilmaistaan numeroarvoina ja latauksen tilan kuvauksen vieressä näytetään valaistu symboli. Latauksen tiloja ovat DC-lataus signaali, eli kytkeytyminen nosturiin onnistunut ja lataus sallittu, DC-lataus päällä, DC-latauksen vika, sekä AC-lataus. Taulukossa 4.1 selitetään kuvaan numeroilla merkityt painikkeet.

Manuaalinen lataustila valitaan kuvan 4.8 painiketta 2. kääntämällä. Manuaalisessa latauksen ohjauksessa käännetään ensin 3. painikkeella Stäubli ulos, jolla latausliitin saadaan liikkumaan ulos asemasta ja kytkeytymään nosturiin. Jos magneettikytkintä ei löydy, se palaa paikoilleen konttiin. D2R saadaan valmiustilaan painamalla aloituspainiketta 4., ja lataus aloitetaan painamalla sitä uudelleen.

Lataus voidaan keskeyttää painamalla lopetuspainiketta 7. Jos painiketta ei paineta, la-

Kuva 4.8. *Latausaseman käyttöliittymä*

Taulukko 4.1. *Latausaseman käyttöliittymän painikkeiden kuvaukset*

painike	kuvaus
1.	hätäseis
2.	manuaalinen/automaattinen lataustila
3.	Stäubli sisään/seis/ulos
4.	aloita lataus
5.	nollaa Stäublin/DynARegin vikakoodit
6.	Stäublin liikutus yli tavallisten rajojen
7.	lopeta lataus/vika

taus lopetetaan automaattisesti akun ollessa täynnä tai virhetilan tapahtuessa. Latausliitin on kuitenkin ohjattava takaisin kääntämällä 3. painikkeesta Stäubli sisään. RTG voi taas operoida normaalisti.

5. LATAUSASEMAN TESTAUS

Latausasema on kehitetty vaiheeseen, jossa sitä voidaan testata. Tavoitteena on tuottaa tietoa jännitteiden, virtojen ja tehon käyttäytymisestä lataussyklin aikana, sekä sen alussa ja lopussa. Lisäksi aseman ohjausten ja komponenttien oli varmistettava toimivan oikein.

Tässä luvussa kerrotaan ensin testistä ja esitellään sitten sen tulokset. Alaluvussa 5.1 kerrotaan testiympäristöstä ja testistä, sekä esitellään muutamia testauksen aikana esille nousseita huomioita. Alaluvussa 5.2 esitetään testituloksia kuvaajien muodossa.

5.1 Testausympäristö ja testin kuvaus

Testaus toteutettiin testialueella joka sisältää RTG-nosturin, latausaseman ja eri painoisia merikontteja. Testinosturissa on normaalista poiketen sekä akusto, että kaapelikela. Sitä voidaan operoida nosturin vaunun lisäksi myös läheisen rakennuksen etätyöpisteeltä (engl. remote operating station, ROS) käsin. Nosturissa on käytössä akkupaketeista pienempi.

Mittaustulosten tallentamiseen käytettiin Datalogger ja CART ohjelmistoja. Dataloggerin avulla voidaan tallentaa latausaseman PLC signaaleja ja piirtää niistä kuvaajia. Latausaseman DynARegilta voidaan tarkastella DC-jännitteen, virran ja tehon suuruutta. Syöttöjännitteeseen kytketyltä tehomittarilta taas saadaan tietoa verkon jännitteistä, virroista ja niiden tuottamasta tehosta. CART tallentaa vastaavasti RTG-nosturin mittaamia signaaleja, esimerkiksi moottorien nopeudet ja nostetun kuorman korkeus. Sen kautta saadaan tietoa myös akkuhuoneelta, kuten akkuketjujen jännitteet ja virrat.

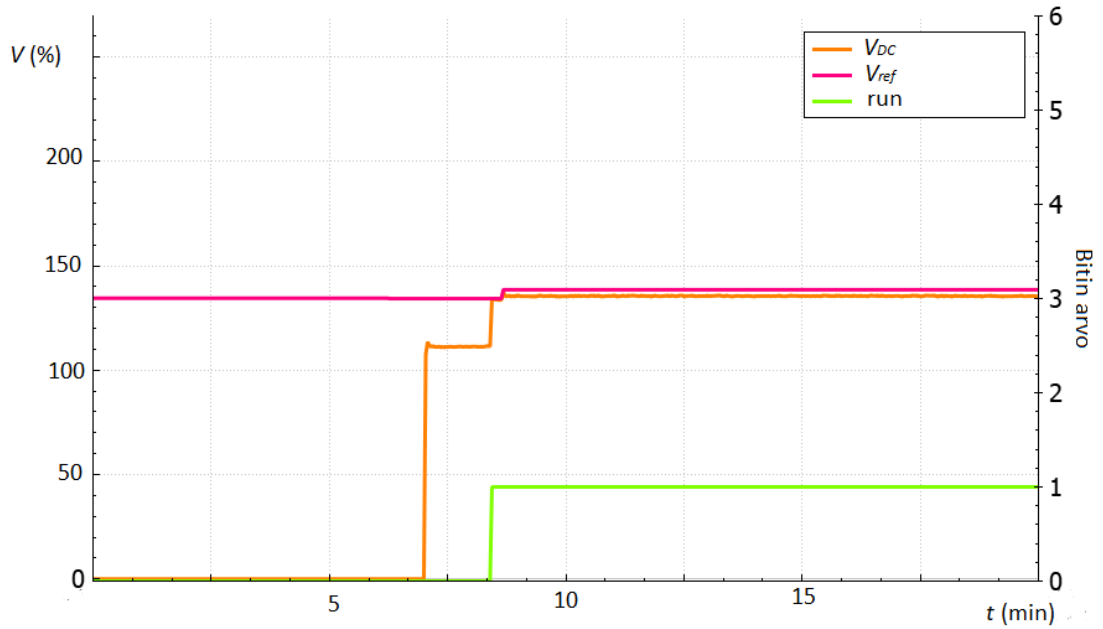
Testauksen aikana huomattiin, että latausaseman tuottaman jännitteen pysyminen tarpeeksi korkealla on tärkeää. Jos välipiirin jännite nousi latausaseman tuottamaa jännitettä korkeammalle, DynARegin ja akkuhuoneen sisältävät kondensaattorit purkautuivat aiheuttaen virtapiikin, joka poltti sulakkeet ja keskeytti latauksen. Lisäksi järjestelmän komponentit osoittautuivat hieman alimitoitetuiksi kestämään latausvirtaa. Näistä syistä latausjännitteen asetusarvoa nostettiin korkeammalle ja tehorajaa laskettiin. Huomiota vaativaksi seikaksi osoittautuivat myös talven sääolosuhteet. Maahan kerääntynyt lumi ja jää saattoi nostaa RTG-nosturin korkeammalle kuin latausaseman ja häiritä latauslaitteen kytkeytymistä paikalleen. Korkeuden muutos ja pinnoille kertyvä jää myös heikensi

nosturin paikoituksessa hyödynnettyjen laserien toimintaa.

Esitellyt mittaustulokset ovat lataussykliltä, joka toteutettiin luvun 4 mukaisesti latausaseman sisäisen käyttöliittymän kautta ohjaamalla. Akkuja ladattiin noin SoC välillä 20–80 %. Koska tehorajaa alennettiin myöskään latausaika ei vastaa alunperin suunniteltua.

5.2 Tulokset

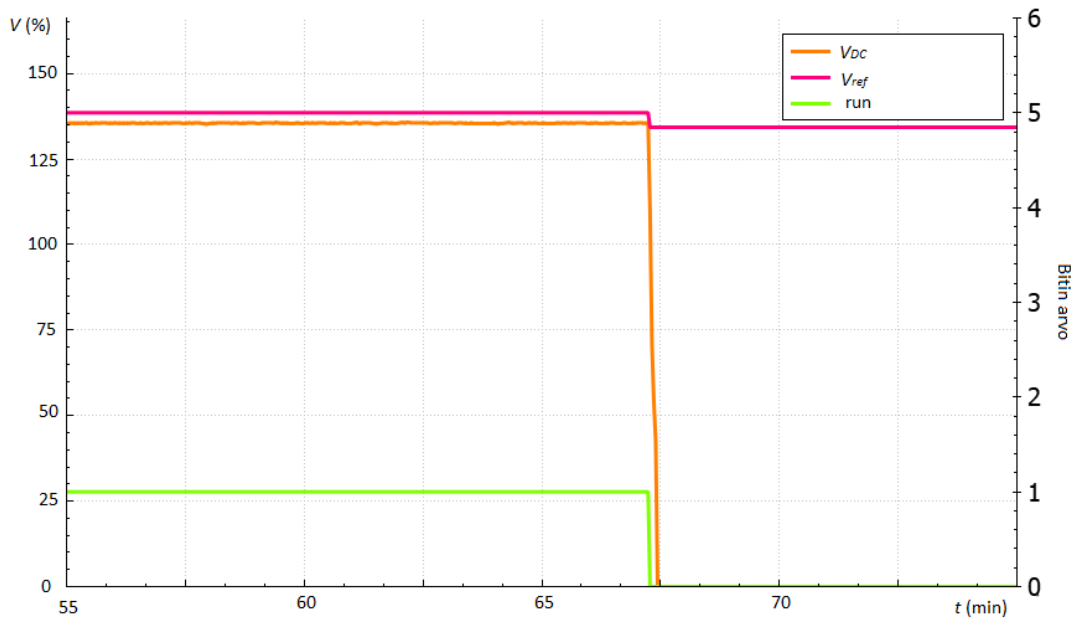
Esitetään ensin D2R-ohjainyksiköltä luettuja signaaleja. Tarkastellaan latausjännitteen käyttäytymistä. Kuvassa 5.1 on esitettynä jännitekuvaajat latauksen alkupuolelta. V_{DC} merkitsee kuvassa latausjännitettä, V_{ref} sen asetusarvoa, sekä run bittiä, joka antaa DynARegille käskyn siirtyä valmiustilasta lataustilaan. Y-akseli on esitetty prosentteina, joissa 100 % kuvaa DynARegin nimellisjännitettä. Kaikissa kuvaajissa x-akseli on aika minuutteina.



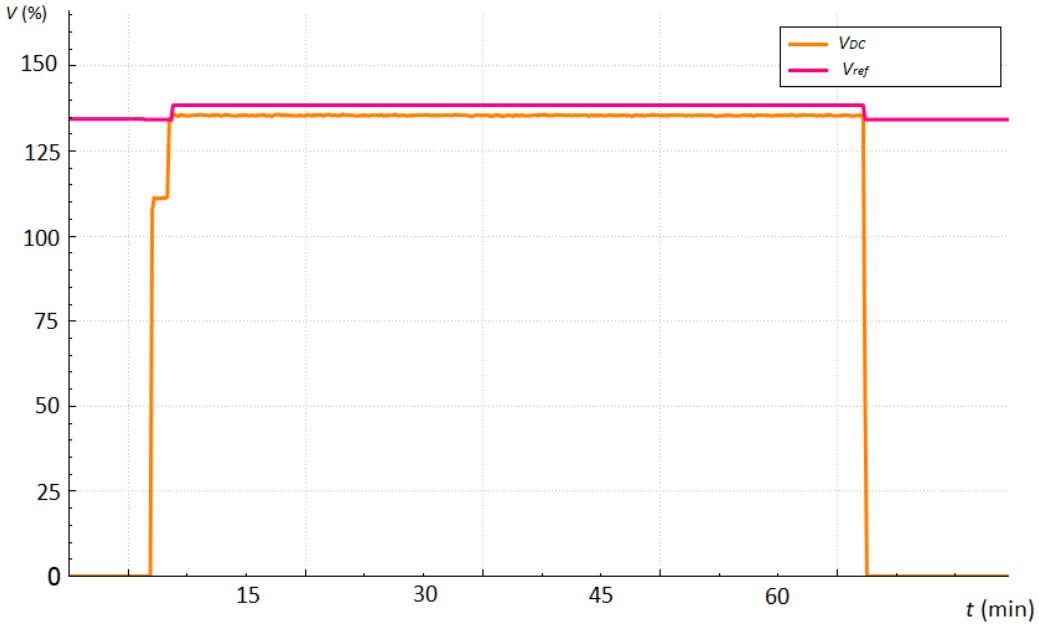
Kuva 5.1. *Latausjännite, sen asetusarvo sekä run-bitti latauksen alussa*

Kuvasta 5.1 voidaan huomata kuinka ennen latausta jännitettä ei ole ja tasajännitteen asetusarvo edustaa tilaa, jossa ei ladata. Noin 7 min kohdalla D2R siirtyy valmiustilaan ja sen tuottama jännite nousee hieman yli 100 %. Kun run-bitti asetetaan arvoon 1, D2R jännitteen asetusarvo nousee lataustilan asetusarvoon ja ulostulojännite latausjännitteeseen. Kuvassa 5.2 nähdään samat suureet kuin aloituksessa latauksen loppupuolelta. Kuvaajista voidaan havaita kuinka run-bitti on asetettu nollaksi, mikä on saanut tasasuuntauksen loppumaan ja jännitteen laskemaan nollaan. Hieman sen jälkeen asetusarvo on asetettu vastamaan ei-lataustilaa.

Kuvassa 5.3 on kuvaajat DC-jännitteen asetusarvosta sekä mitatusta jännitteestä koko latauksen ajalta. Huomataan että latausjännite ei nouse lataustilan asetusarvon tasol-



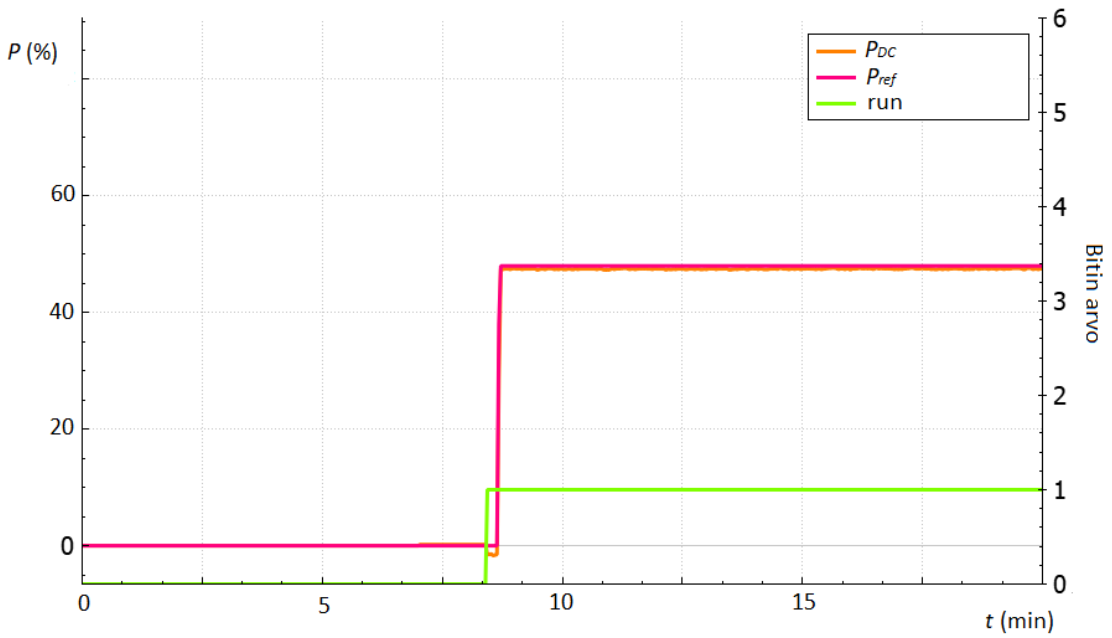
Kuva 5.2. *Latausjännite, sen asetusarvo sekä run-bitti latauksen lopussa*



Kuva 5.3. *Latausjännite sekä sen asetusarvo latauksen aikana*

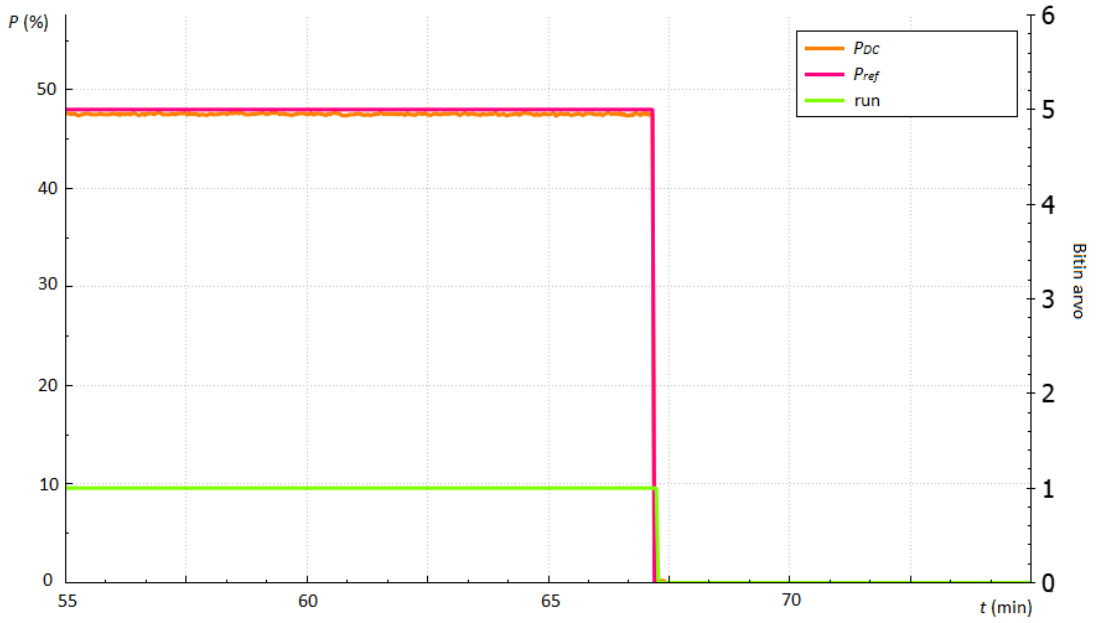
le, vaan pysyy lähempänä DC-väylän jännitteen tasoa. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että kun D2R:n lataustehoa rajoitetaan, välipiirin jännite seuraa akkuhuoneen DC/DC muuntimien asetusarvoa. Jännitteen taso on kuitenkin tarpeeksi lataamaan akkuja. Se myös pysyy melko tasaisena koko latauksen ajan.

Kuvassa 5.4 on esitettynä lataustehon käyttäytyminen latauksen alussa. Kuvaajista P_{DC} merkitsee lataustehoa ja P_{ref} lataustehon ylärajan asetusarvoa. Nämä kuvaajat asettuvat lähes päällekkäin. Teho on ilmaistu akselilla prosentteina DynARegin tuottamasta mak-



Kuva 5.4. *Latausteho, sen asetusarvo sekä run-bitti latauksen alussa*

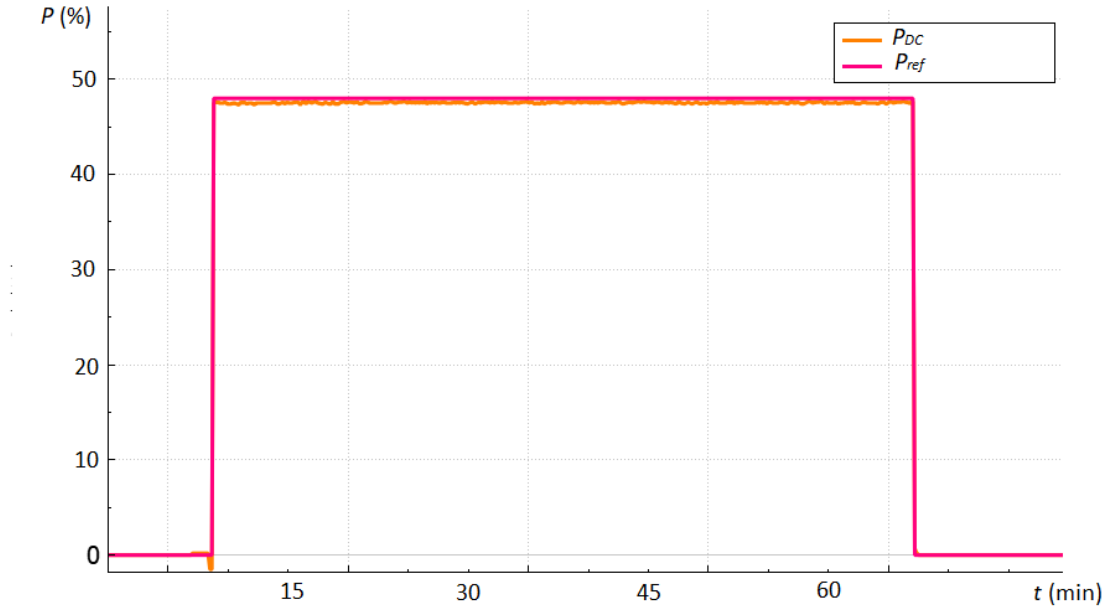
simitehosta. Huomataan kuinka latauksen käynnistyessä run-bitti asetetaan arvoon 1 ja hieman sen jälkeen tehorajan asetusarvoa nostetaan. Lataustehon voidaan huomata käyvän negatiivisena hetken ennen asetusarvon nostamista ja seuraavan sitten asetusarvoa.



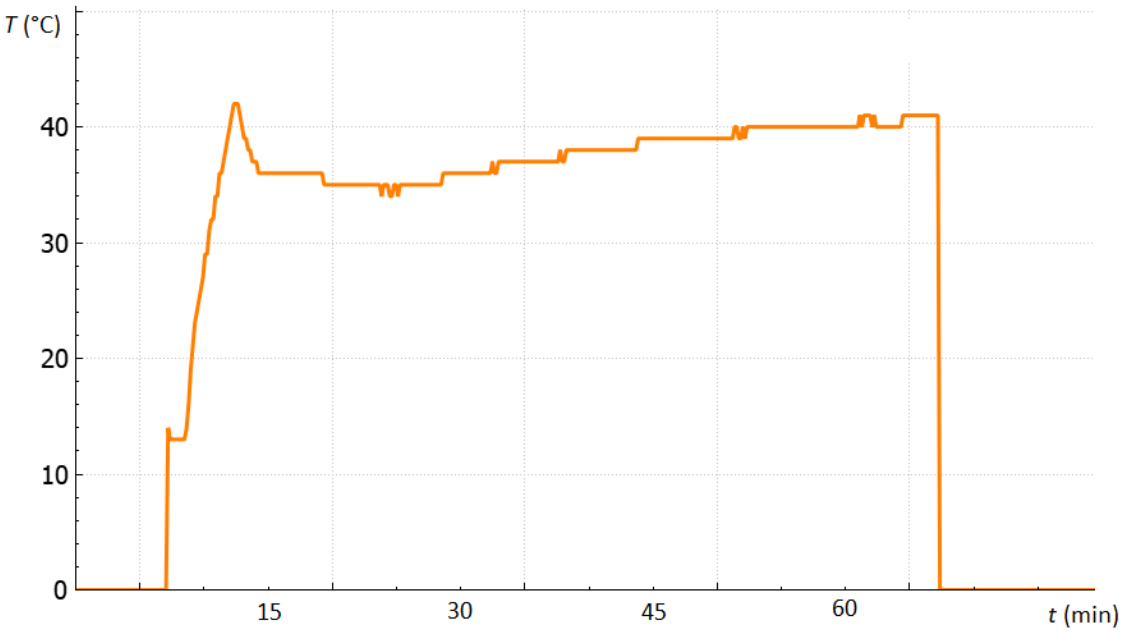
Kuva 5.5. *Latausteho, sen asetusarvo sekä run-bitti latauksen lopussa*

Kuvassa 5.5 on esitettynä samat kuvaajat kuin alusta latauksen loppupuolelta. Latausteho on laskenut, kun tehoraja on asetettu nollaksi ja run-bitti on hieman sen jälkeen asetettu nollaksi. Kuvassa 5.6 on esitettynä tehorajan asetusarvo, sekä DynARegin tuottama teho koko latauksen ajalta. Tehon kuvaajista voidaan päätellä, että mitattu teho vastaa

asetuksarvoksi annettua vakiotehoa.

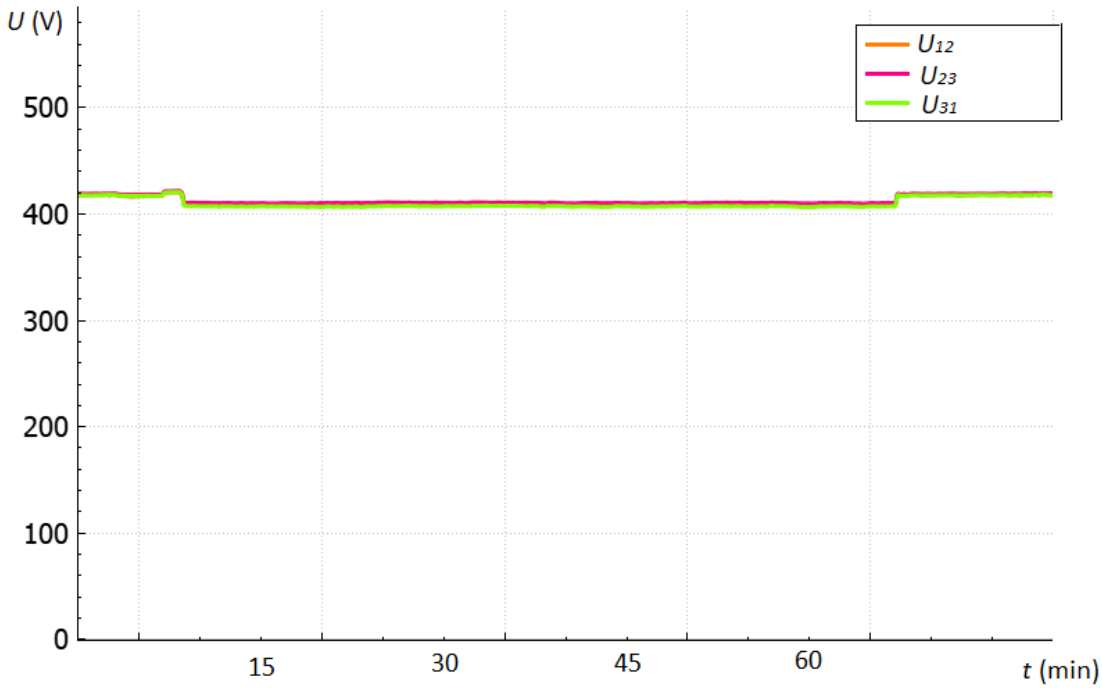


Kuva 5.6. *Lataусteho sekä sen asetusarvo latauksen aikana*



Kuva 5.7. *D2R-yksikön lämpötila*

Kuvassa 5.7 on esitettynä kuvaaja D2R-yksikön lämpötilasta T celsiusasteina latauksen aikana. Lämpötilan voidaan havaita nousevan nopeasti latauksen alkupuolella, jonka jälkeen se laskee hieman ja alkaa hitaasti nousta latauksen loppupuolella. D2R-ohjainyksikkö antaa varoituksen, jos lämpötila nousee yli 85 ℃, joten voidaan olettaa, että lämpötila pysyy latauksen aikana hyväksyttävissä lukemissa.



Kuva 5.8. *AC-pääjännitteiden tehollisarvot*

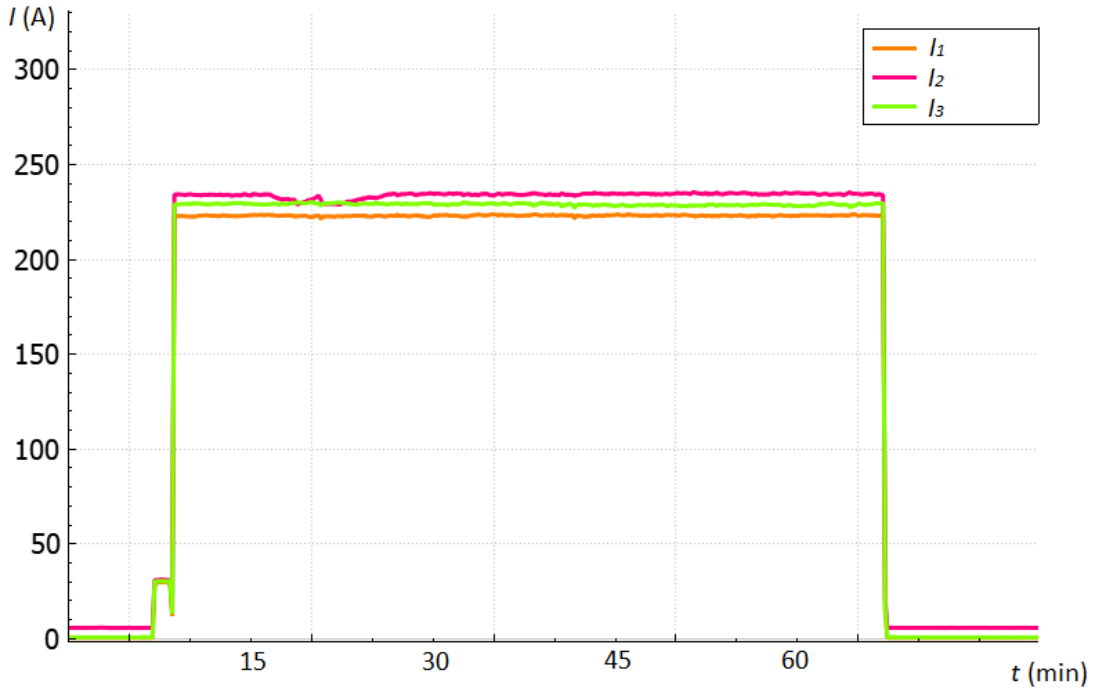
Esitetään seuraavaksi tehomittarilta luettuja AC-puolen arvoja. Kuvassa 5.8 on kuvattuna AC-pääjännitteiden U_{12}, U_{23} ja U_{31} tehollisarvot. Kuvaajista voidaan nähdä, kun lataus on käynnissä ja kuormittaa järjestelmää.

Kuvassa on 5.9 esitettynä samalla tavalla vaihevirtojen tehollisarvojen I_1, I_2 ja I_3 kuvaajat. Voidaan huomata, kuinka virtaa otetaan hieman enemmän DynARegin siirtyessä valmiustilaan ja virrat nousevat täydelle tasolle, kun lataus aloitetaan. Virrat eivät ole aivan samalla tasolla, sillä latausaseman eri komponenttien tarvitsemaa virtaa otetaan eri vaiheista ja määrät eivät ole aivan tasaisia. Vaiheessa 2 voidaan myös huomata jonkin verran häiriötä noin 15–30 minuutin kohdalla.

Kuvassa 5.10 on esitettynä latausaseman ottama vaihtojännitteen pätöteho P sekä loisteho Q. Huomataan, että loistehon määrä on melko vähäinen pätötehoon verrattuna latauksen aikana. Latauksen käynnistymisen aikana sitä kuitenkin tuotetaan jonkin verran.

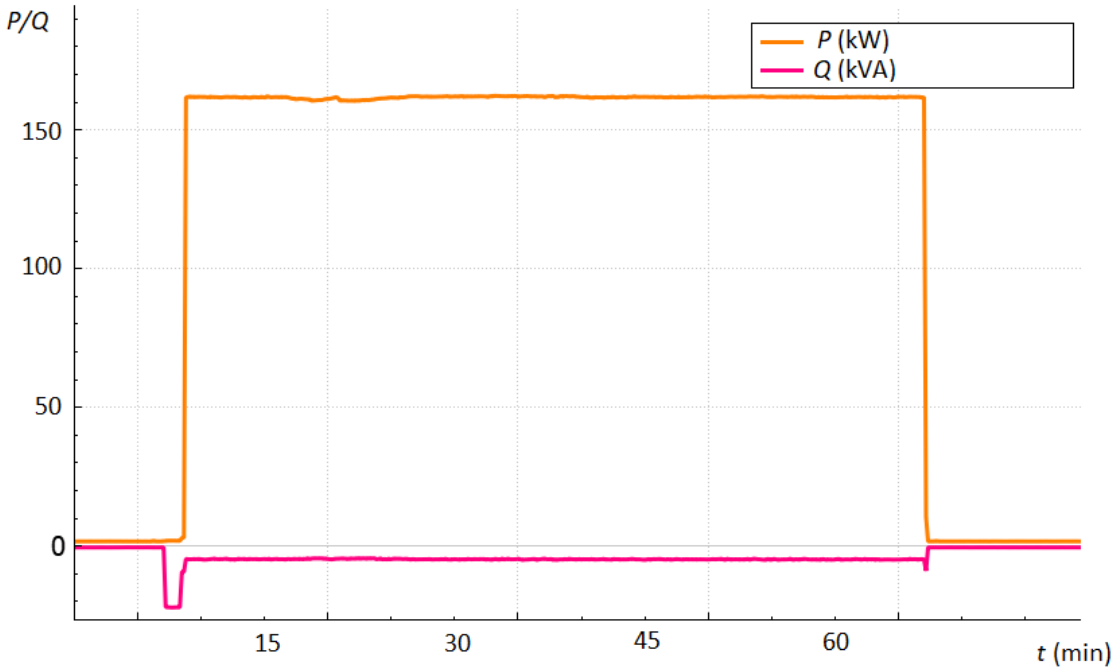
Kuvassa 5.11 on vaihtovirran tehokertoimen $\cos\phi$, eli pätötehon P ja näennäistehon S suhteen P/S, kuvaaja. Tehokerroin käy latauksen aloituksen aikana alhaalla, mutta huomataan että latauksen aikana se on lähes 1. Tästäkin voidaan päätellä, että järjestelmän loisteho on vähäistä pätötehoon verrattuna.

RTG-nosturin puolelta tallennettiin kuvaajat DC-väylän jännitteestä ja akkujen SoC-tasoista. Kuvassa 5.12 on nosturin puolelta mitattu DC-väylän jännite. Nähdään, että jännite on laskenut, kun latausasema on kytkeytynyt kiinni nosturiin. Jännitteessä näkyy hieman piikkejä, mutta ne eivät ole niin suuria, että niistä olisi haittaa. Kuvassa 5.13 näh-

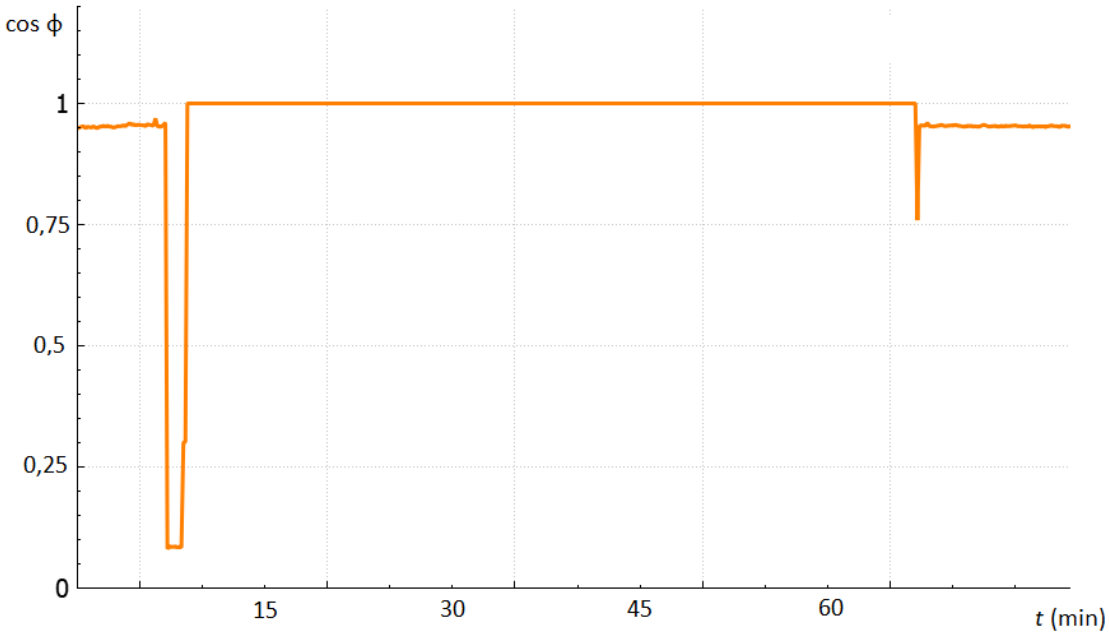


Kuva 5.9. *AC-virtojen tehollisarvot*

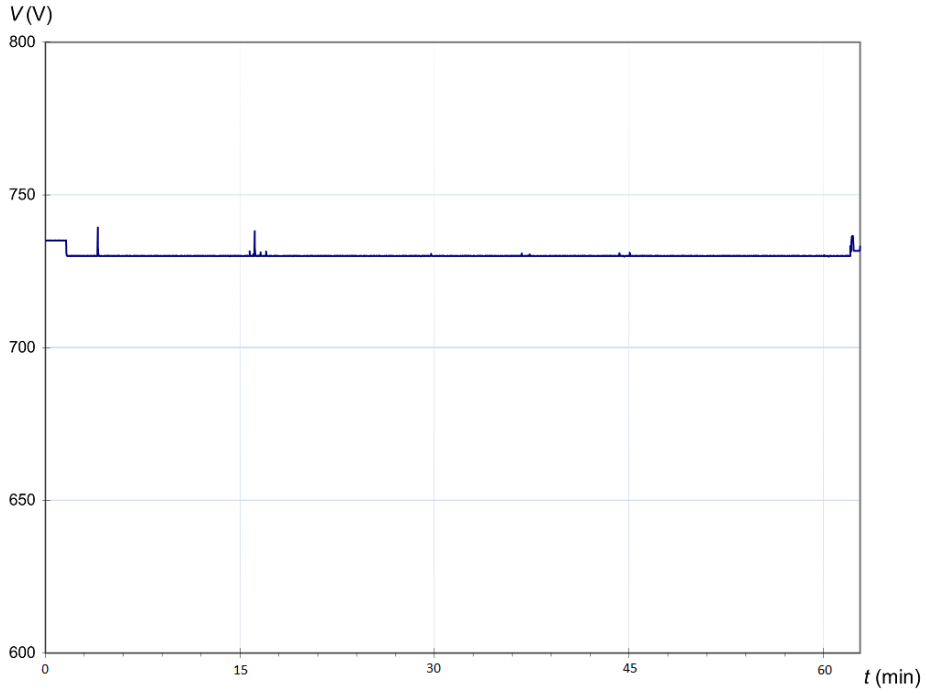
dään kummankin akkuketjun varaustaso latauksen aikana. Kuvaajasta voidaan nähdä varaustason kasvavan tasaisesti latauksen aikana, kuten on tarkoituskin.



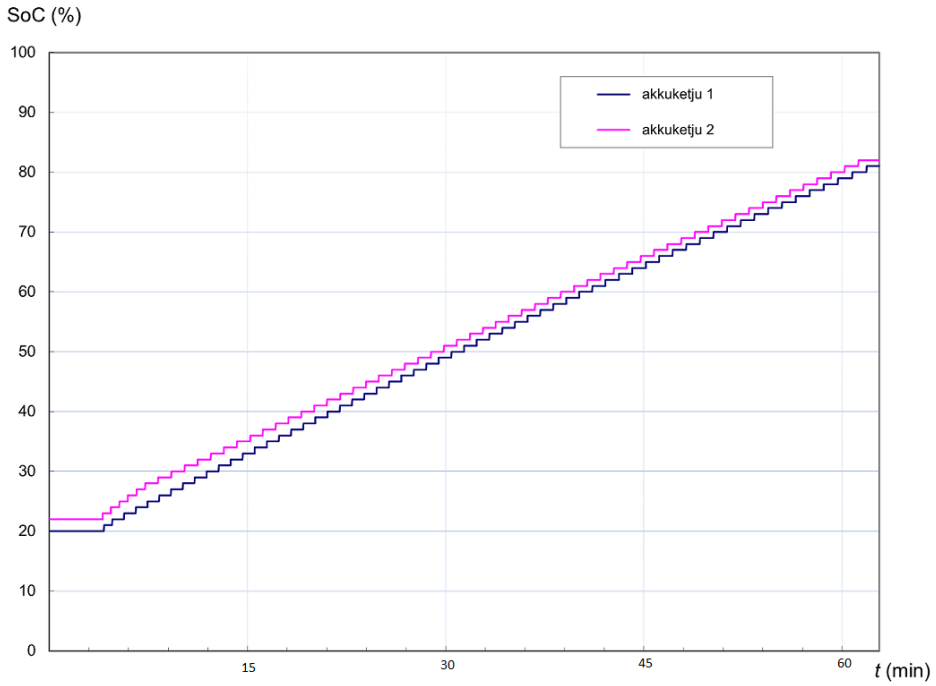
Kuva 5.10. *AC-puolen pätöteho sekä loisteho*



Kuva 5.11. *Vaihtovirran tehokerroin*



Kuva 5.12. *RTG-nosturin DC-väylän jännite*



Kuva 5.13. *Akkuketjujen varaustasot*

6. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä tarkasteltiin kumipyöräkonttinosturin DC-latausasemaa ja sen tasasuuntaavaa laitetta. Työn tavoitteena oli tuottaa dokumentaatiota latausasemasta ja testata sitä. Työ toteutettiin enimmäkseen kirjallisuusselvityksenä, jonka lähteenä käytettiin alaan liittyviä kirjoja, tutkimuksia sekä yrityksen sisäisiä manuaaleja. Lisäksi työssä esiteltiin latausasemalla ja RTG-nosturissa mitattua tietoa latauksen tilasta.

Työssä esiteltiin akkukäyttöisen RTG-nosturin mekaanista ja sähköistä rakennetta. Akkuja tarkasteltiin teorian tasolla ja vertailtiin erilaisia akkukemiallisia vaihtoehtoja. Muut voimantuottovaihtoehdot, dieselgeneraattori, hybridi, kaapelikela ja virtakisko, esiteltiin lyhyesti ja BE-RTG-nosturia verrattiin niihin. BE-RTG-nosturi yhdistää sähköisyyden hyödyt diesel- ja hybridinosturien rajoittamattomaan liikkuvuuteen, mutta haasteena operaation sujuvuus akkujen lataukseen kuluvan ajan ja niiden dieselpolttoainetta huomattavasti alemman energiatiheyden vuoksi.

Latausaseman toimintaa ja sen komponentteja ja niiden sijoittelua kuvattiin. Akkujen latauksen tarpeessa oleva RTG ajaa merikonttiin sijoitetun latausaseman viereen, latausasema kytkeytyy nosturiin ja lataa akkuja, kunnes ne ovat täynnä. Tärkeimpiä komponentteja ovat tasasuuntaajana toimiva DynAReg sekä latausaseman nosturiin yhdistävä moottoroitu latauslaite. Latausasemien standardeja ja akkujen latausalgoritmeja sivuttiin teorian tasolla. DC-latauksen hyötynä on sen mahdollistama korkeampi lataus teho AC-lataukseen verrattuna. Automaattinen lataustapahtuma taas on manuaalista turvallisempi, sekä säästää työntekijöiden aikaa. Latausasemat kuitenkin aiheuttavat lisäkustannuksia asiakkaalle ja ne on onnistuttava sijoittamaan satama-alueelle.

DC-latausaseman tasasuuntaukseen liittyen käytiin läpi ohjatun tasasuuntauksen teoriaa ja esiteltiin latausasemassa tasasuuntaajana hyödynnetyn DynAReg verkkoonjarrutuslaitteen ominaisuuksia. Tasasuuntauslaitteen tuottaman tasajännitteen korkeutta voidaan säätää esimerkiksi kytkimien aukeamista ohjaamalla. Tässä sovelluksessa tärkeitä ohjauksia ovat laitteelle annetut jännitteen sekä tehorajan asetusarvot. Lataussekvenssistä kirjoitettiin kuvaus. Valmiissa tuotteessa operaattorin olisi mahdollista käynnistää lataus nosturista käsin ja latausasema hoitaisi latauksen automaattisesti. Nosturin paikoittaminen latausaseman vierelle sekä nosturin ja aseman välinen kommunikaatio ovat seuraava tärkeä kehityksen kohde.

Akkujen latausta latausasemalla testattiin ja yhdeltä lataussykliltä kerättiin dataa, joka esitettiin työssä kuvaajien muodossa. Latausjännitteen ja -tehon käyttäytymistä tarkasteltiin latauksen alussa, lopussa ja aikana. Lisäksi latauksen ajalta esitettiin vaihtojännite puolen pääjännitteitä, virtoja ja tehoa, D2R-yksikön lämpötila, sekä nosturilta mitatut DC-väylän jännite ja akkuketjujen varaustilat. Mittaustuloksista voidaan päätellä, että latausasema toimii suunnitellusti ja DynARegia voidaan hyödyntää järjestelmässä tasasuuntaajana.

Testauksen aikana huomattiin, että komponentteja oli alimitoitettu tarvittavalle latausvirralle, joten niitä voi olla tarpeellista vaihtaa, jotta voidaan hyödyntää suunniteltua korkeampaa lataustehoa. Lisäksi talven olosuhteet osoittautuivat haasteellisiksi latauslaitteen kytkeytymiselle nosturiin ja paikoitusta varten suunnitelluille lasereille. Latausaseman ja RTG-nosturin välistä kommunikaatiota voisi myös parantaa, tällä hetkellä nosturi antoi vain signaalin sen merkiksi, että lataus on sallittua. Latausasema voisi esimerkiksi tarkkailla akkujen jännitteitä, jotta häiriötilanteilta vältyttäisiin.

LÄHTEET

[1] Battery & Charging Solutions in Ports and Terminals, PEMA, 2021, URL: https://www.pema.org/downloads.

[2] Fahdi, Soukaina, Elkhechafi, Mariam ja Hachimi, Hanaa, Green Port in Blue Ocean: Optimization of Energy in Asian Ports, 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), s. 1–4, 2019.

[3] Konecranes RTG: from the creator of the modern RTG, Konecranes Oyj, 2021, URL: https://www.konecranes.com/sites/default/files/2022-06/Konecranes%5C%20RTG%5C%20Typical%5C%20Tech%5C%20Spec%5C%20EN_Final_EN.pdf.

[4] Merimaa, Joona, Battery-driven RTG with uncompromised performance, Sisäinen julkaisu, Konecranes Oyj, 2022.

[5] Konecranes in Brief, Konecranes Oyj, 2022, URL: https://www.konecranes.com/about/konecranes-in-brief (viitattu 03. 11. 2022).

[6] Operator's manual, Sisäinen julkaisu, Konecranes Oyj, 2020.

[7] DynA Vector II, Konecranes Oyj, 2021, URL: https://www.konecranes.com/sites/default/files/download/dynavectorii.pdf.

[8] Electrics product information, Sisäinen julkaisu, Konecranes Oyj, 2020.

[9] Linden, David ja Reddy, Thomas, Linden's Handbook of Batteries, 4. painos, McGraw-Hill Professional Publishing, 2010.

[10] Warner, John T., The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology, Elsevier Science & Technology, 2015.

[11] Dearborn, Scott, Charging Li-ion Batteries for Maximum Run Times, Power Electronics Technology 31.4, s. 40–49, 2005.

[12] Maharjan, Laxman et al., State-of-Charge (SOC)-Balancing Control of a Battery Energy Storage System Based on a Cascade PWM Converter, IEEE Transactions on Power Electronics 24.6, s. 1628–1636, 2009.

[13] DS2 250 A, Marechal Electric, 2022, URL: https://marechal.com/marechal/en/gamme/industrial/decontactorswitchsocket-outlet/ds-30-400a-polymetal/ds2-250-a-32 (viitattu 21. 11. 2022).

[14] Haapala, Tomas, Engineer, Energy and Drives, Konecranes Oyj, Hyvinkää, Haastattelu, 2022.

[15] Nektalova, Tatyana, Energy Density of Diesel Fuel, The Physics Factbook, 2006, URL: https://hypertextbook.com/facts/2006/TatyanaNektalova.shtml (viitattu 30. 11. 2022).

[16] Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle, United States Environmental Protection Agency, 2022, URL: https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle (viitattu 09. 01. 2023).

[17] Papaioannou, Vicky et al., Analysis of energy usage for RTG cranes, Energy 125, s. 337–344, 2017.

[18] Matikainen, Teemu, Cable Reel Training Material, Sisäinen julkaisu, Konecranes Oyj, 2022.

[19] Matikainen, Teemu, Busbar Training RTG, Sisäinen julkaisu, Konecranes Oyj, 2022.

[20] Yang, Yi-Chih ja Chang, Wei-Ming, Impacts of electric rubber-tired gantries on green port performance, Research in Transportation Business & Management 8, s. 67–76, 2013.

[21] Schmidt-Ewig, Jan P., Battery Drives: A Benefit for Ports and Terminal Operators, Sisäinen julkaisu, Konecranes Oyj, 2017.

[22] Eickelmann, Jens, Driving Force Electromobility, 1. painos, Phoenix Contact, 2017.

[23] IEEE Standard for Technical Specifications of a DC Quick and Bidirectional Charger for Use with Electric Vehicles, en, Standardi 2030.1.1-2021, IEEE, DOI: 10.1109/IEEESTD.2022.9714435.

[24] Kumar, Jagdesh et al., Design and Analysis of New Harbour Grid Models to Facilitate Multiple Scenarios of Battery Charging and Onshore Supply for Modern Vessels, Energies 12.12, 2019.

[25] Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings, en, Standardi ISO 668:2020, International Organization for Standardization, 2020, URL: https://www.iso.org/standard/76912.html.

[26] Myller, Mikko, BRTG Charging Station Technical Specification, Sisäinen julkaisu, Konecranes Oyj, 2022.

[27] Automated rapid charging connector QCC, Stäubli International, 2021, URL: https://www.staubli.com/content/dam/spot/APP-QCC-Quick-Guide-11014055-en.pdf.

[28] Kazmierkowski, Marian P. et al., Control in Power Electronics, 1. painos, Elsevier Science & Technology, 2002.

[29] Rashid, Muhammad H., Power Electronics Handbook, 4. painos, Elsevier Science & Technology, 2017.

[30] Patin, Nicolas, Power Electronics Applied to Industrial Systems and Transport, ISTE Press Ltd, 2015.

[31] Service Manual for DynAReg Vector II, Sisäinen julkaisu, Konecranes Oyj, 2011.

[32] Tiittanen, Leo, Konecranes NEXT Charging Station Pilot, Rejlers AOS digitaalinen malli, Sisäinen julkaisu, Konecranes Oyj, 2022.

[33] Panagiotis, Karampelas ja Ekonomou, Lambros, Electricity Distribution, Springer, 2016.

[34] Liserre, Marco, Blaabjerg, Frede ja Hansen, Steffan, Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier, IEEE Transactions on Industry Applications 41.5, s. 1281–1291, 2005.