KUMIPYÖRÄKONTTINOSTUREIDEN ENERGIATEHOKKUUS VARASTOALUEEN KOKONAISNÄKYMÄSSÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2025

Joona Tahko

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen, Manager, Solutions Technology Juha Santala

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Joona Tahko

Kumipyöräkonttinostureiden energiatehokkuus varastoalueen kokonaisnäkymässä

Sähkötekniikan diplomityö

2025

69 sivua, 23 kuvaa ja 8 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen, Manager, Solutions Technology, Juha Santala

Avainsanat: Energiatehokkuus, RTG, kumipyöräkonttinosturi, konttinosturi, konttiterminaali

Diplomityössä tarkastellaan kumipyöräkonttinostureiden (RTG) energiatehokkuuden parantamista satamaterminaalin varastoalueen näkökulmasta. Työn tavoitteena on selvittää, millä ratkaisuilla terminaalin sähköverkon kuormitusta ja energiankulutusta voidaan vähentää ilman, että nostureiden operatiivinen tehokkuus heikkenee.

Työ perustuu MATLAB/Simulink-ympäristöön rakennettuun simulointimalliin, jolla arvioidaan 40 RTG:n samanaikaista käyttöä erilaisissa energiantehokkuutta parantavissa skenaarioissa. Mallissa otetaan huomioon moottorikohtaiset tehontarpeet, tuulikuormat, sekä regeneratiivisen energian talteenotto. Simuloinnissa verrattiin muun muassa nosturikohtaisia ja terminaalitasolla toimivia akustoja, liikkeiden hidastuksia ja viivästyksiä, vastakkaistehoisia liikkeitä ja kuormituksen ennustettavuutta.

Tulosten perusteella merkittäviä energiasäästöjä ja huipputehojen pienentämistä voidaan saavuttaa terminaalitason akustoilla ja hidastetuilla optimoiduilla liikkeillä. Nosturikohtaisten akustojen käyttäminen kuormahuippujen aikana vähensi verkosta otettavaa energiaa 8 % ja akustot pystyivät tallettamaan 97 % regeneroidusta energiasta. Hidastetut liikkeet pienensivät terminaalin huipputehoa 4.5 % ilman vaikutusta suorituskykyyn. Simuloinnit osoittivat myös, että terminaalin koon ja tarkasteltavien nostureiden määrän kasvaessa, kuormituksen huipun ja keskiarvon suhde tasaantuu luonnollisesti.

Johtopäätöksenä työ osoittaa, että RTG-nostureiden energiantehokkuutta voidaan parantaa merkittävästi, kun energianhallintaratkaisuja suunnitellaan terminaalitasolla ja toteutetaan koordinoidusti. Jatkokehitystä voidaan kohdistaa energianhallintajärjestelmien automatisointiin ja akustojen elinkaaren huomioon ottamiseen, sekä simulaatiomallin jatkokehitykseen.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Joona Tahko

Energy Efficiency of Rubber Tyred Gantry Cranes in the Overall Context of a Container Yard

Master's thesis

2025

69 pages, 23 figures and 8 tables

Examiners: Professor Juha Pyrhönen, Manager, Solutions Technology, Juha Santala

Keywords: Energy Efficiency, RTG, Rubber Tyred Gantry Crane, Gantry Crane, Container Terminal

This Master's thesis examines the improvement of energy efficiency in Rubber Tyred Gantry (RTG) cranes from the perspective of a container terminal's storage area. The objective is to identify solutions that reduce the electrical grid load and energy consumption of the terminal without compromising the operational performance of the cranes.

The study is based on a simulation model developed in MATLAB/Simulink, used to evaluate the simultaneous operation of 40 RTG cranes under various energy-efficiency-enhancing scenarios. The model accounts for motor-specific power requirements, wind loads, and regenerative energy recovery. The simulations compare, among others, crane-specific and terminal-level battery storage, slowed and delayed crane movements, counterbalancing power flows, and load predictability.

According to the results, significant energy savings and peak power reductions can be achieved through terminal-level battery systems and optimized slowed movements. Using crane-specific batteries during load peaks reduced energy drawn from the grid by 8%, and the batteries were able to capture 97% of the regenerated energy. The reduction in movement speed reduced the terminal's peak power by 4.5% without affecting operational performance. The simulations also showed that as the size of the terminal and the number of cranes increases, the load's Peak-to-Average Ratio (PAR) naturally becomes more balanced.

In conclusion, the study demonstrates that the energy efficiency of RTG cranes can be significantly improved when energy management solutions are planned at the terminal level and implemented in a coordinated manner. Future development could focus on the automation of energy management systems, consideration of battery lifecycle effects, and further development of the simulation model.

KIITOKSET

Kiitokset Professori Juha Pyrhöselle ja Konecranesin Port Solutions ja teknologiatiimeille, joita ilman tämä työ ei olisi ollut mahdollinen. Kiitokset myös Glenlivetille ja Hans Baerille simulaatiomallin rakentamiseen kuluneista yhteisistä tunneista.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

RTG	Rubber Tyred Gantry
RMG	Rail Mounted Gantry
CMS	Crane Management System
STS	Ship-to-Shore
THD	Total Harmonic Distortion, Harmoninen kokonaissärö
Gantry	Nosturin runko, joka liikkuu varastoaluetta pitkin
Gantry crane	Nosturi
AFE	Active Front End
ESS	Energy Storage System
TEU	Twenty-Foot Equivalent unit (20-jalkainen vakiomerikontti, pituus: 6,1 metriä, leveys 2,44 metriä, korkeus: 2,59 metriä)
ESS	Energy Storage System
PAR	Peak-to-Average ratio. Huippu/keskiarvosuhde

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Kiitokset)

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1 Johdanto 8
1.1 Työn tausta 8
1.2 Konecranesin toimiala 9
1.2.1 Konecranes yleisesti 9
1.2.2 Yhtiön strategia 9
1.3 Konttien käsittely ja siirto 10
1.3.1 Kumipyöräkonttinosturit ja niiden käyttö 11
1.3.2 Konttilohko 11
1.3.3 Kumipyöränosturit 12
1.3.4 Kumipyöränosturien energiaverkko 12
1.3.5 Konttinosturin ohjausjärjestelmä 20
1.4 Kirjallisuustutkimus 20
1.5 Työn tavoitteet ja tutkimusongelman määritteleminen 21
1.6 Työn toteutus ja tutkimusmenetelmät 21
1.7 Työn rajaus ja rakenne 21
2 Konttiterminaalin prosessi. 23
2.1 RTG nostureiden toimintaperiaate 24
2.1.1 Liikkeiden syklisyys 25
2.2 Energiatehokkuus 28
3 Energiatehokkuuden parantaminen 31
3.1 Simulointi 31
3.1.1 Simulaatiomallin validointi 32
3.1.2 Simuloinnin rajoitukset. 33
3.1.3 Simuloinnin vertailutapaus 34
3.1.4 Simulointitulosten merkitys ja vertailukelpoisuus 36

3.2 Yhtäaikaiset vastakkaistehoiset käytöt 36
3.2.1 Kustannukset 38
3.2.2 Energian kustannussäästöt 39
3.2.3 Hyödyt ja haitat 39
3.2.4 Simulointi 42
3.3 Energian talteenotto nosturikohtaisiin akustoihin 45
3.3.1 Kustannukset 46
3.3.2 Energian kustannussäästöt 46
3.3.3 Hyödyt ja haitat 47
3.3.4 Simulointi 47
3.4 Energian talteenotto lohkokohtaiseen akustoon 50
3.4.1 Simulointi 52
3.4.2 Kustannukset 57
3.4.3 Energian kustannussäästöt 57
3.4.4 Hyödyt ja haitat 58
3.5 Energian talteenotto verkkoon 58
3.5.1 Energian talteenoton haitat 58
3.6 Hidastetut liikkeet hyötysuhteiden varmentamiseksi kiireettömissä nostoissa 59
3.6.1 Kustannukset 60
3.6.2 Energian kustannussäästöt 60
3.6.3 Simulointi 60
3.7 Kulutuksen ja käytön ennustaminen ja tasaaminen 61
3.8 Optimoidut liikkeet 62
4 Toimenpiteitä energiatehokkuuden parantamiseen 63
5 Johtopäätökset 65
5.1 Työn tulokset 65
5.2 Tulevaisuus 66
5.3 Työn rajoitteet ja jatkotutkimustarpeet 67
5.4 Suositukset terminaalioperaattoreille 68
Lähteet 69

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Energiatehokkuusvaatimusten tiukentuessa kaikilla aloilla, konttisatamienkin tulee parantaa operointinsa energiatehokkuutta ja soveltaa tekniikkaa, jonka avulla energiatehokkuuden parantaminen on mahdollista. Konttiterminaaleissa käytetään kumipyöräkonttinostureita (RTG) konttien hallintaan ja siirtoon varastoalueilla. Kumipyöräkonttinosturit toimivat linkkinä konttilaivojen ja terminaalin maaliikenteen välillä.

Kumipyöräkonttinostureiden toiminta voidaan jakaa kolmeen tärkeimpään liikkeeseen:

- Tarttujan (spreader) nostamiseen ja laskemiseen, kontitta tai kontin kanssa.
- Vaunun liikutteluun, kontilla tai kontitta
- Nosturin liikutteluun, kontin kanssa tai ilman.

Konttien nostovoiman, vaunun liikuttelun, ja nosturin ajoon tarvittavan voiman tuottoon käytetään sähkömoottoreita. Yksittäiset nosturit voivat olla käytössä jopa 24 tuntia päivittäin (*Moottorien käyttö yleensä S5- S6 luokassa*). Sääolosuhteista, konttien painosta, ja nosturien operointitahdin mukaan konttien nostoliikkeisiin ja itse nosturin kuljettamiseen kuluu paljon energiaa. Nosturityypistä riippuen sähkö voidaan tuottaa joko nosturissa itsessään olevalla dieselgeneraattorilla, ottaa nosturissa olevasta akustosta, tai tuoda nosturille joko DC-kiskostoa pitkin, tai yleisemmin käytetyllä menetelmällä kaapelikelaa pitkin.

Operoinnin tehokkuutta ja sähköenergian ja mahdollisen liike-energian liikkeitä tarkastellessa havaitaan haasteita energiatehokkuudessa.

Nostureiden operointitavan takia energiankulutus on aaltomaista ja siinä esiintyy suuria kulutuspiikkejä, kun kontteja nostetaan, ja mahdollisesti regeneraatiota, kun kontteja lasketaan. Joillakin nostureilla konttien laskusta otetaan energiaa talteen, mutta on myös yleistä, että tämä potentiaalienergia tuhlataan ohjaamalla energia jarruina toimiviin vastuksiin. Tätä potentiaalienergiaa voidaan kuitenkin käyttää hyödyksi myös ohjaamalla energian talteenotto akustoihin joko nosturitasolla, tai esimerkiksi sataman yhteisiin energiapankkeihin, joista kaikki sataman konttinosturit voivat sitä käyttää. Energiaa on mahdollista säästää myös ohjaamalla

potentiaalienergia takaisin sähköverkkoon, mutta tämä voi johtaa sähköverkon harmonisen kokonaissärön (THD) kasvuun, tai odottamattomaan heiluntaan, jos satamassa ajetaan yhtäaikaisesti useaa nosturia ns. samansuuntaisesti, jolloin sähköenergian liike on yhdensuuntaista.

Sähköverkosta otetun energian kulutuksen vähentämiseksi voitaisiin energiapiikkejä vähentää käyttämällä nostureita mahdollisimman paljon yhtäaikaisesti, niin että toisten nostureiden suurimpien kulutuspiikkien aikaan, muut nosturit siirtäisivät sataman verkkoon sähköenergiaa. Tämä olisi mahdollista toteuttaa ainakin teoriassa esimerkiksi lohkotasolla tarkasteltuna niin että yksi nosturi laskee konttia maksimikorkeudesta, generoiden samalla kontin laskusta energiaa verkkoon, kun blokin eli konttialueen toinen nosturi käyttää tätä talteen otettua energiaa kontin nostoon.

1.2 Konecranesin toimiala

1.2.1 Konecranes yleisesti

Konecranes on suomalainen kansainvälisesti toimiva materiaalinkäsittelyratkaisuihin keskittyvä yritys. Sen asiakaskuntaan kuuluvat mm. valmistusteollisuus, satamat ja konttiterminaalit.

Yhtiön tuotteet ja palvelut kattavat:

- Teollisuusnosturit ja -nostolaitteet

- Terminaalinosturit ja automaatioratkaisut (mm. Konttinosturit, RMG, STS, ja RTG nosturit, joihin tämä työ pohjautuu.

- Huolto ja modernisointi (nostolaitteiden elinkaaripalvelut)

- Automaatio ja digitalisaatio (mm. älykkäät nosturit, etävalvonta ja ohjaus, optimointi.)

1.2.2 Yhtiön strategia

Konecranes toimii yli 50 maassa ja sillä on vahva asema terminaaleissa ja teollisuuslaitoksissa ympäri maailmaa, etenkin Euroopassa, Lähi-Idässä ja Afrikassa.

Konecranesin strategia tähtää materiaalinkäsittelyn tulevan sukupolven ratkaisujen kehittämiseen. Tulevan sukupolven ratkaisuihin kuuluu älykkyys, turvallisuus, kestävyys, ja yhtiö onkin asettanut näille tavoitteille selkeät tavoitteet.

Strategisena tavoitteena Konecranesilla on olla maailman johtava materiankäsittelyratkaisujen toimittaja, joka luo arvoa niin asiakkailleen, henkilöstölleen ja sidosryhmilleen.

Strategian mahdollistajina ovat strategiaa tukevat viisi keskeistä peruspilaria:

1. Vastuullinen liiketoiminta
2. Voittava kulttuuri
3. Asiakaskeskeisyys
4. Digitaaliset ratkaisut
5. Globaali läsnäolo

Vuoden 2025 alusta Konecranes on ottanut käyttöön uuden toimintamallin, jossa liiketoiminta on jaettu kolmeen alueeseen:

1. Teollisuuspalvelut (Industrial service)
2. Teollisuuslaitteet (Industrial equipment)
3. Satamaratkaisut (Port solutions, johon tämä työ keskittyy)

1.3 Konttien käsittely ja siirto

Konttien käsittely ja siirto muodostavat konttiterminaalin ydintoiminnot, joissa RTG-nosturit ovat keskeisessä roolissa. Nämä liikuteltavat nosturit mahdollistavat konttien siirron varastoalueella, erityisesti konttilohkojen välillä ja sisällä. Konttien käsittelyprosessiin sisältyvät konttien siirtäminen laivalta varastoalueelle, varastointi konttilohkoihin, siirrot lohkon sisällä (housekeeping), sekä siirrot kohti maaliikenteen liittymäpisteitä.

Yleisesti konttiterminaalin sisäinen käsittelyprosessi jakautuu seuraaviin vaiheisiin:

- Vastaanotto laivalta (Waterside): Laivasta puretut kontit siirretään Ship-To-Shore (STS) -nosturilla maahan, josta ne siirretään edelleen RTG-nosturien avulla varastoalueen konttilohkoihin.
- Varastointi: RTG-nosturit siirtävät ja pinoavat kontit konttilohkoihin määriteltyihin paikkoihin konttien ominaisuuksista, kuten painosta, ja seuraavasta kuljetusmuodosta riippuen.
- Housekeeping-toiminnot: Kontteja uudelleen sijoitellaan konttilohkossa hiljaisina aikoina tehokkuuden parantamiseksi, jotta seuraavat lastaukset tai purut voidaan suorittaa ilman viivästyksiä.
- Maaliikenteen lastaus (Landside): Kontit siirretään maaliikenteen puolella odottaviin ajoneuvoihin. RTG-nosturit siirtävät kontit tyypillisesti rekkakaistalla odottaviin rekkoihin.

1.3.1 Kumipyöräkonttinosturit ja niiden käyttö

RTG (Rubber Tyred Gantry) kumipyöräkonttinosturit ovat avainasemassa konttiterminaalien toiminnassa, missä ne käsittelevät ja siirtävät merikontteja. RTG-nosturit ovat liikuteltavia nostureita, jotka toimivat kumipyörillä, mahdollistaen niiden liikkumisen eri alueiden välillä satamaterminaalissa. Ne on suunniteltu nostamaan, siirtämään ja laskemaan kontteja tarkasti ja tehokkaasti, mikä tekee niistä olennaisen osan konttiliikenteen logistiikkaketjua.

1.3.2 Konttilohko

Block, eli konttilohko on alue, jolla kaksi eri nosturia työskentelee yhdessä konttien siirrossa ja käsittelyssä. Konttilohkot on jaettu siten, että kumpikin siinä työskentelevä nosturi voi toimia alueella itsenäisesti tai yhdessä koordinoidusti. Kahden nosturin työskennellessä samalla konttilohkolla saavutetaan tehokkuutta ja sujuvuutta konttien siirtelyssä, lastauksessa, ja purkamisessa, kun nosturit voivat siirtää kontteja omilla ennalta määritetyillä alueillaan. Kahden nosturin yhteistyöskentely vähentää odotusaikoja ja optimoi työskentelyä terminaalissa. Kaksi nosturia työskentelee lohkossa niin, että toinen nosturi käsittelee lohkon WS (waterside) puolen

kontteja ja hallinnoi konttien nostoa terminaalin puolelle, jossa laivoista tulevia ja laivoihin lastattavia kontteja käsitellään. Toinen nosturi käsittelee lohkon LS (landside) kontteja ja hallinnoi niiden lastaamista ja purkamista konttiterminaalin sille puolelle, missä maaliikenne toimii. Molemmat nosturit siirtelevät myös kontteja tulevia lastauksia ja purkuja varten otollisempiin paikkoihin. Tällaista varastoalueen hallintaa kutsutaan englanniksi useimmiten termillä Housekeeping, ja sitä pyritään tekemään silloin, kun konttialueella on hiljaisempia hetkiä, kuten öisin.

1.3.3 Kumipyöränosturit

RTG Kumipyöränosturien operointia voidaan kuvata kolmella pääperiaatteella:

- Tarttujan nosto- ja laskuoperaatiot kontin kanssa tai ilman. RTG nostaa kontteja köysien varassa olevan tarttujan avulla. Tarttujat kiinnittyvät kontin yläkulmissa oleviin kiinnityspisteisiin mahdollistaen konttien turvallisen noston.
- Trolley-vaunun liikuttelu kontin kanssa tai ilman. Kun kontti on nostettu, tai kun sitä ollaan nostamassa, voidaan konttia liikuttaa vaunun avulla, pitkittäin RTG:n pääkannattimien suuntaisesti.
- Gantryn liikuttelu, kontin kanssa tai ilman. Gantryä, eli koko nosturia voidaan liikuttaa konteille varatulla blokilla ja näin kuljettaa konttia paikasta toiseen.

Kaikkien yllä mainittujen liikkeiden tarvitsemat voimat tuotetaan sähkömoottorikäytöillä. Sähkömoottorikäytöt saavat energiansa joko suoraan sataman sähköverkosta, akkupankista, tai välillisesti dieselgeneraattorilta, riippuen sovelluksesta ja asiakkaan tarpeista. Usein RTG konttinosturit toimivat joko dieselmoottorilla tai kaapelikelan välityksellä sataman sähköverkosta otetulla energialla. Nosturit voivat toimia joko ihmisen ohjaamina tai automaattisesti ihmisen valvonnassa, tai ROS-järjestelmän (Remote Operating System) välityksellä niin, että niitä esimerkiksi kaikkia sataman nostureita ohjataan keskitetysti yhdestä paikasta etäohjauksella.

1.3.4 Kumipyöränosturien energiaverkko

Yksinkertaistettuna suurimmat tehonkulutukset P voidaan esittää seuraavasti:

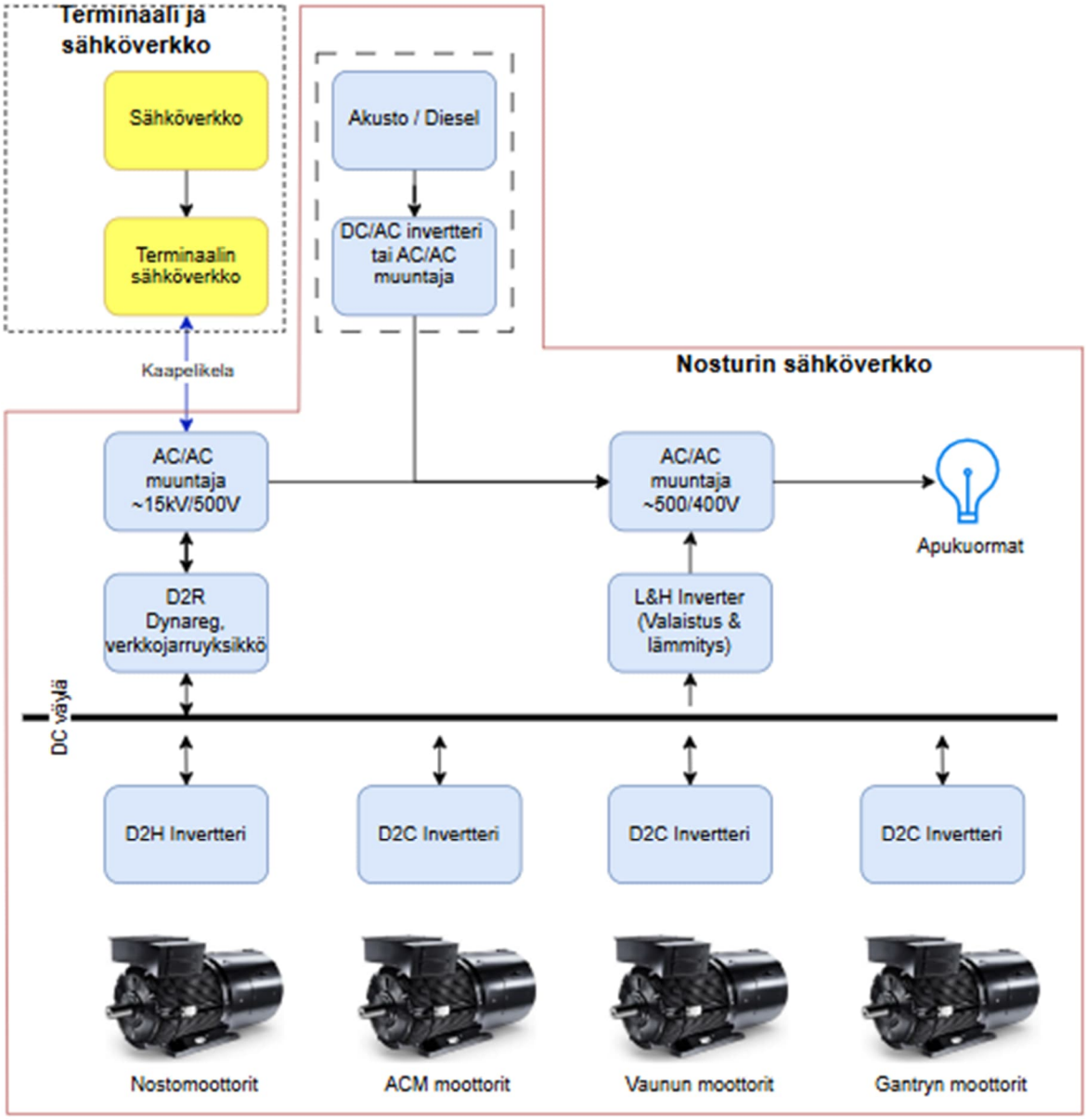
$$P_{\mathrm{G}} = P_{\mathrm{Cr}} = P_{\mathrm{H}} + P_{\mathrm{Tr}} + P_{\mathrm{G}}, \tag{1}$$

missä alaindeksit G, Cr, H, Tr ja G viittaavat sähköverkkoon, nosturiin, nostoon, trolley-vaunuun ja portaaliin.

Kumipyöräkonttinosturien sähköverkko on esitetty pääpiirteittäin seuraavissa kuvissa.

Kuvan 1 mukaisessa verkossa on esitetty seuraavat nosturin sähköverkon peruselementit:

- Ulkoinen sähköverkko ja terminaalin sähköverkko
- AC/AC muuntaja, jolla terminaalilta tuleva sähköenergia muutetaan keskijännitteestä matalajännitteeseen nosturin inverttereille käytettäväksi.
- AC/AC muuntaja muille sähkölaitteille, mukaan lukien lämmitys ja valaistus, sekä ohjausjännitteet.
- D2R Dynareg, Tasasuuntaaja regeneratiiviseen jarrutukseen. Dynaregin avulla nosturin toiminnassa syntyvä ylimääräinen energia siirtyy takaisin sähköverkkoon.
- DC-kiskosto invertterien syöttöön.
- Noston invertterit ja moottorit
- Nosturin pyörien moottorit ja niiden invertterit
- Vaunun pyörien moottorit ja niiden invertterit
- ACM moottorit ja niiden invertterit
- Akusto tai dieselgeneraattori ja niiden muuntaja

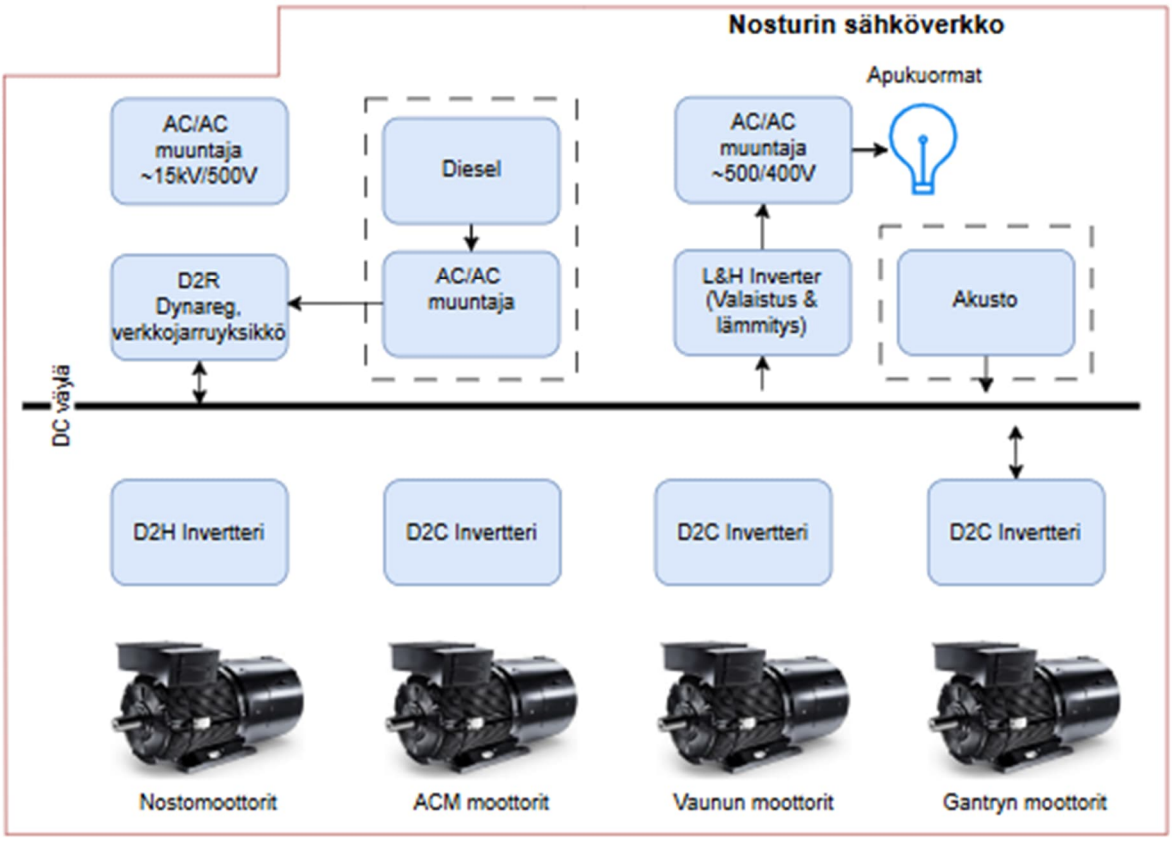


Kuva 1 RTG:n sähköverkko yksinkertaistettuna

Normaalin operoinnin aikana nosturia syötetään terminaalin verkosta kaapelikelan kautta terminaalista riippuen noin 11–15 kV keskijännitteellä, ja kaikki nosturin toiminnot ovat samanaikaisesti käytettävissä.

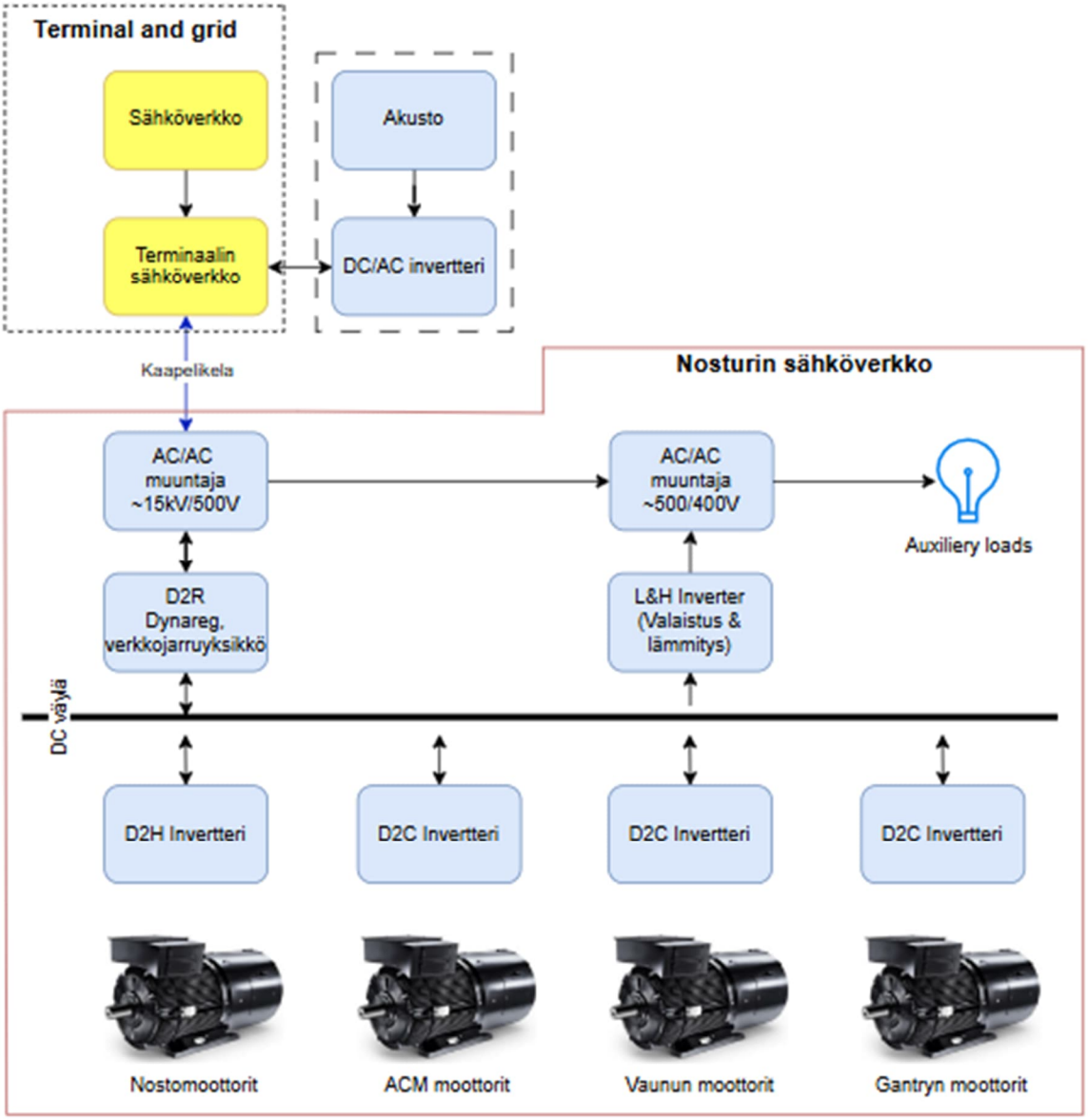
Kun nosturia liikutetaan blokista toiseen, irrotetaan kaapelikelan syöttö terminaalin päästä ja tarvittava energia otetaan joko nosturikohtaisesta akusta, tai tuotetaan dieselgeneraattorilla. Myös huolto-operaatioiden aikana voidaan nosturia liikutella dieselgeneraattorin tai akuston avulla. Blokkia vaihtaessa vain nosturin pyöriä liikuttavat moottorit ja avustavat kuormat,

kuten lämmitys ja valaistus, tarvitsevat energiaa. Kuva 2 esittää nosturin sähköverkkoa nosturin toimiessa irti sähköverkosta.



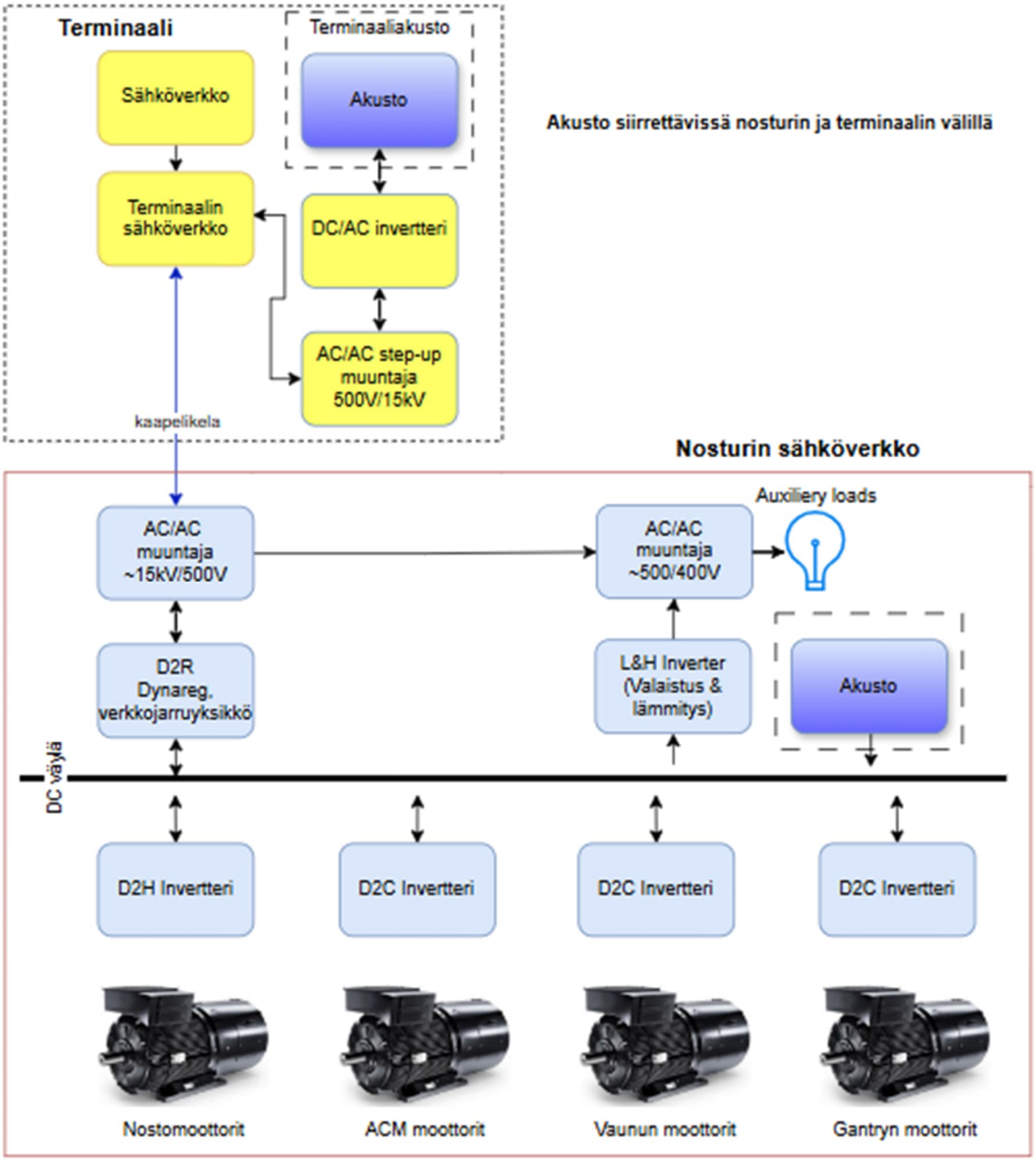
Kuva 2 Nosturin sähköistys konttialueen eli blokin vaihdon aikaan

Kuva 3 havainnollistaa tilannetta, jossa sähköverkon puolella on akkuvarasto.



Kuva 3 Yhteiskäyttöisen akuston malli, jossa on erillinen akkuhuone terminaalin verkossa.

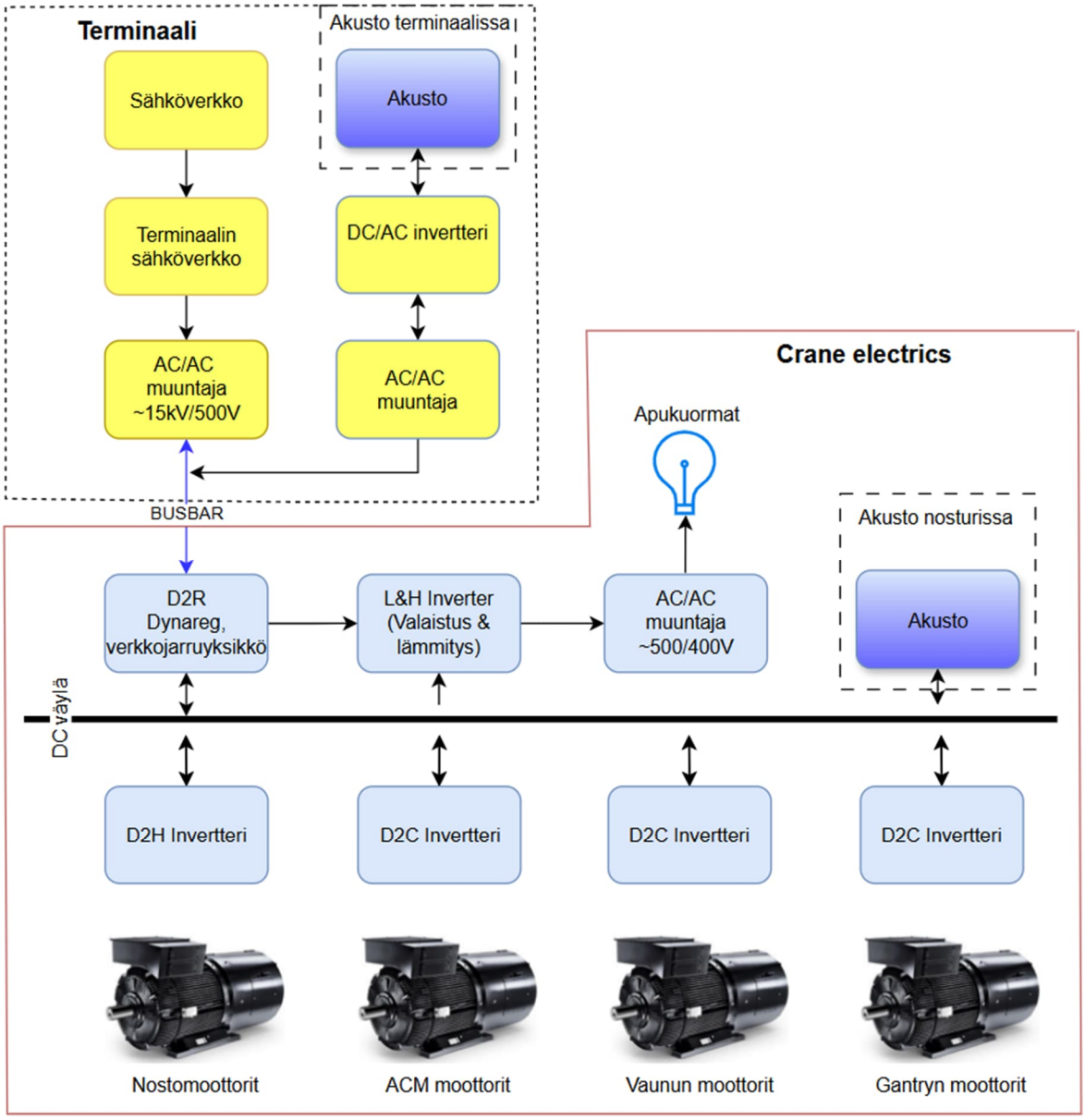
Kuvassa 4 on esitettynä malli, jossa nosturia syötetään normaalikäytössä kaapelikelan avulla ja jossa on liikuteltava akusto.



Kuva 4 Yhteiskäyttöisen akuston malli, jossa akusto on liikuteltavissa nosturin ja terminaalin välillä.

Akustoa voidaan ladata terminaalin sähköverkosta ja käyttää tarvittaessa energiavarastona tai useamman nosturin regeneratiivisen energian talteenottoon. Akusto voidaan tarvittaessa siirtää terminaalista suoraan nosturiin, jolloin nosturia voidaan ajaa pelkällä akustolla esimerkiksi blokin vaihtoa tehtäessä tai muissa tilanteissa, kun kaapelikela ei ole kytkettynä.

Kuva 5 esittää uutta varianttia sähkön syöttöön.



Kuva 5 Vaihtoehtoinen energiansiirtoketju, jossa kaapelikela on korvattu kiskostolla.

Kuvan 5 nosturin vaihtoehtoisessa syöttötavassa kaapelikela on korvattu energiansiirtoon tarkoitetulla virtakiskostolla ja nosturikohtainen AC-muuntaja on siirretty terminaalin puolelle syöttöketjua. Muuntajan siirtäminen terminaaliin vähentää nosturin painoa ja siirrettävää massaa. Kiskostolla voidaan syöttää nosturia pienjännitteellä < 1000 VAC. Kuvan esimerkkitapauksessa myös akusto on siirrettävissä terminaalin ja nosturin välillä. Akustolta saatava, yleisesti noin 400–800 VDC jännite, tulee tällaisessa tapauksessa ensin muuntaa esimerkiksi 500–15 000 VAC jännitteeksi, jotta se voidaan kytkeä verkkoon virtakiskostolle

keskijännitemuuntajan toisiopuolelle. Koska kumipyöräkonttinostureita täytyy voida liikutella blokkien välillä, tulee nosturilla olla redundanttinen syöttömahdollisuus, joka ei nojaa pelkkään virtakiskostoon.

Kiinteästi asennetulla virtakiskostolla voidaan nähdä seuraavia hyötyjä:

- Kiskostossa ei ole liikuteltavia osia, mikä voi vähentää vikaantumisriskiä ja lisätä luotettavuutta.
- Kiinteä asennus voi kestää paremmin ympäristön vaikutuksia, kuten tuulta, sadetta, tai terminaaleissa yleisesti esiintyvää suolapitoista ilmaa.
- Virtakiskostot vaativat yleensä vähemmän huoltoa kuin kaapelikela. Kaapelikela saattaa kulua nopeasti jatkuvassa käytössä ja vaatii enemmän säännöllistä huoltoa ja tarkastuksia.
- Kiskosto voidaan asentaa niin että se on suojattu fyysisiltä vaurioilta ja rasitteilta. Kaapelikelaa käytettäessä sen kaapeli roikkuu ja kulkee maata pitkin, mikä voi terminaalista ja blokista riippuen aiheuttaa kompastumisen tai sähköiskun vaaraa.
- Virtakiskolla voidaan tarjota tehokkaampi energiansiirto pienemmillä häviöillä, joita syntyy pitkien syöttökaapelien kanssa. Pienemmillä häviöillä voidaan tuoda jopa merkittäviä energiasäästöjä pitkällä aikavälillä
- Yhdellä kiskorakenteella kahden blokin välillä, voidaan syöttää kahden blokin nostureita niin, että toisella puolella oleva kiskosto syöttää kahta nosturia blokissa 1, ja kiskorakenteen toisella puolella olevat kiskot syöttävät blokin 2 nostureita. Tällä tavalla voidaan myös mahdollisesti syöttää kahta tai neljää nosturia yhden keskijännitemuuntajan avulla.
- Kiskostoihin on saatavilla järjestelmiä, joiden avulla nosturin automaatio voi lukea sijaintiaan blokissa. Sijainnin tunnistaminen on satamanostureiden toiminnan kannalta erittäin tärkeää. Yksinään kiskoston paikannustieto ei välttämättä voi korvata muuta paikannusta, mutta se voi tuoda redundanttista paikannusdataa.
- Jos yksittäinen kiskosto syöttää kahta blokkia, voidaan tällä tuoda tilansäätöä koko terminaalin pohjapiirrokseen.

1.3.5 Konttinosturin ohjausjärjestelmä

CMS järjestelmä (Crane Management System) on digitaalinen alusta, joka on suunniteltu konttinosturien hallintaan ja seurantaan. Järjestelmää käytetään nosturien suorituskyvyn, turvallisuuden, käytettyjen ominaisuuksien ja rajojen seurantaan, ja huollon optimointiin. Järjestelmä kerää ja analysoi tietoa nostureista käyttäen nosturin sensoreita ja ohjelmistoa, tarjoten kattavan yleiskuvan nostureiden operatiivisesta tilasta.

Konecranesin CMS-järjestelmän keskeisimmät ominaisuudet sisältävät:

1. Reaaliaikainen seuranta. CMS järjestelmä tarjoaa reaaliaikaista tietoa järjestelmän toiminnasta, käytöstä, kuormasykleistä ja käyttöolosuhteista, sekä nosturin sensorien ja anturien tilatietoa. Nämä yhdessä mahdollistavat mahdollisten toiminnallisten poikkeamien havainnoinnin tai mahdolliset turvallisuusongelmat.
2. Huollon hallinnointi. Analysoimalla kerättyjä tietotrendejä ja käyttötapoja, järjestelmä auttaa ennaltaehkäisevän huollon suunnittelussa, vähentäen suunnittelemattomia huolloista seuraavia seisokkiaikoja ja pidentäen samalla nosturin käyttöikää.
3. Turvallisuuden parantaminen. Järjestelmä auttaa turvallisen toiminnan ylläpidossa seuraamalla nosturin toimintaa ja tilatietoja mahdollisten poikkeamien varalta.
4. Toiminnallinen tehokkuus. Järjestelmällä voi optimoida nosturien käyttöä seuraamalla tietoa toiminnallisesta tehokkuudesta ja tunnistamalla parannusalueita toiminnassa.
5. Raportointi ja analytiikka. Järjestelmä tarjoaa tarkkoja tapahtumalogeja ja analytiikkaa nosturin toiminnasta, jota voidaan hyödyntää tietoihin perustuvien päätösten tekemiseen.

1.4 Kirjallisuustutkimus

Työ perustuu suurelta osin Konecranesin sisäiseen dokumentaatioon ja dokumentteihin. Työtä varten tehty simulaatiomalli on inspiroitunut Stefano Pietrosantin tohtorityöstä "Net Energy Savings in Rubber Tyred Gantry Cranes Equipped with an Active Front End".

1.5 Työn tavoitteet ja tutkimusongelman määritteleminen

Tämän työn tarkoituksena on selvittää kuinka konttiterminaalin toimintaa ja konttien hallinnan prosessia voidaan parantaa energiatehokkaammaksi. Työssä tutkitaan mahdollisuuksia konttiterminaalin energiavarastointiin yksittäisten nostureiden ja koko terminaalin tasolla, ja niiden vaikutuksia kokonaistehokkuuteen.

Työn sujuvuuden takaamiseksi tavoite jaetaan seuraavasti:

-Jo tehdyn tutkimustyön läpikäyntiin. Tarkoituksena tutustua konttiterminaalien ja yksittäisten RTG/RMG nostureiden energiatehokkuuteen keskittyviin tutkimuksiin.

-Akkuteknologiaan ja energian varastointiin tutustuminen konttiterminaalien kannalta.

1.6 Työn toteutus ja tutkimusmenetelmät

Työ toteutetaan tutustumalla aiempaan alan tutkimukseen ja luomalla simulointiohjelma, jolla voidaan vertailla erilaisia energiatehokkuuden ratkaisuja konttiterminaalin näkökulmasta. Erilaisia nosturikohtaisia ratkaisuja, kuten koko terminaalin hetkittäisen tehon mukaan hidastettuja tai ajoitettuja liikkeitä, tai nosturikohtaisia akustoja vertaillaan terminaalikohtaiseen suurempaan akustoon ja sen tuomiin hyötyihin. Näillä vertailuilla pyritään etsimään ratkaisuja, joilla koko terminaalin energiankulutusta ja huipputehoja voidaan mahdollisesti tulevaisuudessa pienentää. Yksittäisten nostureiden energiantehokkuuteen esimerkiksi erilaisten moottoriratkaisuiden osalta ei oteta työssä kantaa, sillä työ keskittyy koko terminaalin yhteistehoon ja sen hallintaan. Yksittäisten nostureiden energiatehokkuus ei välttämättä suoraan vaikuttaisi esimerkiksi terminaaliin kokonaistehon tasaisuuteen, sillä monesta nosturista koostuvassa verkossa töiden ajoituksella ja hetkittäisillä tehopiikeillä voi olla suurempi vaikutus koko terminaalin tehokkuuteen.

1.7 Työn rajaus ja rakenne

Työ on rajattu keskittymään sähkö ja akkukäyttöisten RTG nosturien energiatehokkuuden parantamiseen.

Energian varastointiin liittyen vain akustot otetaan huomioon. Muut energiavarastointitekniikat kuten vauhtipyörät, superkondensaattorit ja hybridi energiavarastointijärjestelmät jätetään työn ulkopuolelle.

2 Konttiterminaalin prosessi.

Konttiterminaalin perusprosessi koostuu mereltä laivoilla saapuvien konttien purkamisesta, varastoinnista, terminaalin sisäisistä siirroista, ja maaliikenteen järjestämisestä. Prosessi voidaan jakaa lyhyesti viiteen eri vaiheeseen:

1. Saapuminen ja purku

   – Laiva saapuu terminaaliin ja halutut kontit puretaan laivasta Ship-to-Shore (STS) -nosturilla.

   – Kontit lasketaan maahan ja siirretään siirtoalueelle tai kuljetetaan RTG-nosturien varastoalueelle.

2. Varastointi konttilohkoon.

   – RTG-nosturit siirtävät ja pinoavat kontit konttilohkoihin.

   – Kontit asetetaan ennalta määriteltyihin paikkoihin konttilohkossa mm. Painon, seuraavan kuljetustavan, määränpään, ja aikataulun mukaisesti.

3. Terminaalin sisäiset siirrot.

   – Tarvittaessa kontteja siirrellään konttilohkojen sisällä, jotta lastaukset ja purut voidaan optimoida suoritettavan sujuvasti.

   – RTG nosturit hoitavat tätä konttilohkon sisäistä siirtoa hiljaisempina aikoina, kun lohkoista ei siirretä kontteja tai sinne ei tuoda uusia kontteja.

4. Lähtö ja lastaus maaliikenteeseen.

   – Kun kontti on tarkoitus siirtää eteenpäin maaliikenteeseen, RTG nostaa kontin lohkosta ja siirtää sen esimerkiksi odottavan rekan perään.

5. Tyhjän tilan hallinta ja valmistautuminen seuraaviin eriin.

   – RTG nosturit vapauttavat tilaa seuraavia aluksia ja saapuvia kontteja varten siirtelemällä jo varastoituja kontteja tarpeen mukaan uudelleen.

   – Näin varmistetaan terminaalin jatkuva operointivalmius ja sujuva liikenne.

RTG-nostureiden rooli on keskeistä etenkin vaiheissa 2–4, missä ne vastaavat konttien siirroista paikasta toiseen ja pinoamisesta terminaalin sisällä. Nosturien tehokas hallinta ja energiatehokkuus ovat merkittäviä terminaalin toiminnan kokonaiskustannusten ja päästöjen kannalta.

2.1 RTG nostureiden toimintaperiaate

RTG-nosturien toiminta on optimoitu energiatehokkuuden, turvallisuuden, ja varastotilanteen hallinnan kautta seuraavasti:

1. Liikkuminen terminaalissa ja varastoalueella: Nosturit liikkuvat alueella kumipyörillä, jotka mahdollistavat ketterän liikkumisen varastoalueella konttilohkojen sisällä ja välillä. Liikkuminen on nosturityypin mukaan joko automaattista tai operoijan hallinnassa joko paikan päältä tai etäohjaiskeskuksesta. Nosturit liikkuvat ennalta määritettyjä reittejä pitkin ja kuljettavat reitit ovat terminaalikohtaisesti optimoituja. Nostureilla on tyypillisesti rajoitettu liikenopeus turvallisuuden ja tarkan paikannuksen edellyttämänä. Ajonopeudet ovat keskimäärin 20–45 m/min nosturin siirto- ja nostotilanteissa.

2. Nostotilanteet: RTG-nostureiden yleisin toiminta on konttien käsittelyä ja siirtoa paikasta A paikkaan B. Kontteja siirretään konttilohkojen sisäisesti tai ulos konttilohkosta lastausalueelle tai lastausalueelta konttilohkoon. Nostureilla ei liikuteta kontteja lohkosta toiseen lohkoon, vaan tällaiset operaatiot on varattu muille laitteille. Nosturien nostonopeudet vaihtelevat kuorman painon ja nostettavien korkeuksien mukaan, mutta nostonopeudet voivat olla 15–20 m/min tyhjille konteille, ja 10–15 m/min täysille konteille.

3. Konttien siirtonopeus ja kuljetuskapasiteetti: Varastoalueella konttien siirtonopeus riippuu nosturin liikenopeudesta sekä nostamiseen ja laskemiseen käytetystä ajasta. Tyypillisesti yksittäisellä nosturilla on noin 20 konttinostoa (sykliä) tunnissa. Jotkin hitaammat nosturityypit, tai vähemmän nopeutta vaativat nostot, suoritetaan pienemmillä syklimäärillä.

4. Varastoalueen kapasiteetti: Koko varastoalueen käyttökapasiteetti riippuu käytettävien nosturien ja varastoalueen pinta-alan määrästä. Yksittäiset konttilohkot voivat olla 300–400 metrin pituisia, ja näissä voi olla jopa kahdeksan riviä kontteja, useammassa kerroksessa. Usein kontit pinotaan neljästä kuuteen kerrokseen. Kokonaisen konttilohkon kapasiteetti voi siten olla esimerkiksi 2000 standardikonttia (TEU, twenty-foot equivalent unit, 20-jalkainen merikontti). Kapasiteetti ilmoitetaan aina standardikontin mukaisesti, mutta konttilohkoissa säilötään myös kohteen mukaan muita konttikokoja. Tällaisia ovat esimerkiksi yleinen konttikoko, jonka pituus on 40 jalkaa (2 TEU), ja pidempi 45 jalkainen kontti. Suuremmissa terminaaleissa yksittäisen lohkon konttikapasiteetit voivat olla tätä huomattavasti suurempia. Standardikonttien lisäksi konttialueilla varastoidaan operatiivisten vaatimusten mukaisesti myös muita kontteja. Näihin kuuluvat mm. 40-jalkaiset 2TEU kontit, kylmävarastointiin käytetyt reefer-kontit, sekä suuremmat koot, kuten 60- ja 65-jalkaiset kontit.

2.1.1 Liikkeiden syklisyys

RTG-nosturin energiasyklit koostuvat useista eri vaiheista, joissa nosturi käyttää energiaa eri tarkoituksiin: nosturin liikuttamiseen, vaunun liikuttamiseen, ja konttien nostoon ja laskemiseen. Normaaleista energiasykleistä poiketen RTG nostureilla on myös konttilohkojen välisiä liikkeitä, joissa nosturia liikutetaan lohkosta toiseen. Lohkojen väliset liikkeet voidaan kuitenkin tässä työssä jättää tutkimatta, niiden vähäisyyden ja huonon seurattavuuden takia.

Seuraavassa vaiheessa on kuvattu nosturin eri toiminnot ja niiden energiakulutuksia. Kuvaajassa 6 on esitetty nosturin teho ajan funktiona yhden tyypillisen syklin aikana:

A: Tarttujan lasku aloitusasennosta kohti konttia ja konttiin tarttuminen. Tämä vaihe on merkittävä jarrutusenergian talteenoton kannalta, sillä nostomoottorit muuntavat kuormaa laskiessaan potentiaalienergiaa sähköksi. Keskimääräinen teho on tälle vaiheelle –81kW 19 sekunnin ajan.

B: Kontin nosto nostokorkeuteen. Kuvaajalla 6 on käytetty esimerkkikonttia, jonka paino on 20 tonnia, joka on keskimääräisen kontin paino. Tämä on nosturin liikkeiden kannalta intensiivisin vaihe, sillä nostomoottorit tarvitsevat suuren tehon nostaakseen kontin täyteen korkeuteen

painovoimaa vasten. Noston alussa tapahtuu tehopiikki noston kiihdytyksen aikana. Keskimääräinen teho on tälle vaiheelle 186 kW 34 sekunnin ajan.

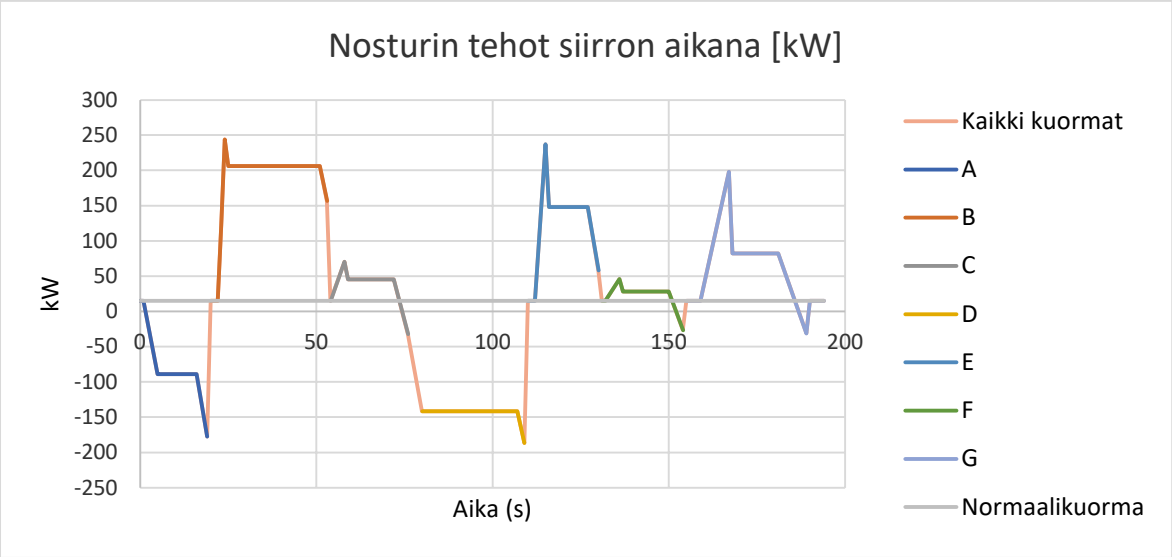
C: Vaunun siirto vaakasuunnassa konttilohkoon nähden. Nosturi siirtää kontin konttilohkon oikealle vaakasuuntaiselle riville. Tehontarve on tässä vaiheessa huomattavasti pienempi kuin nostossa, sillä vaakasiirto ei vaadi painovoiman vastustusta, vaikka kuorma onkin raskas. Keskimääräinen teho on tälle vaiheelle 41 kW 23 sekunnin ajan.

D: Kontin lasku. Tässä vaiheessa nosturi laskee kontin halutulle korkeudelle, riippuen konttipinon korkeudesta, ja jarrutuksen ansiosta sähköenergiaa tuotetaan takaisin DC-väylään. Koska kontin laskusta ja jarrutuksesta syntyy mekaanisia häviöitä, on regeneroitu teho pienempi kuin nostovaiheessa kulutettu teho. Keskimääräinen teho on tälle vaiheelle –143 kW 33 sekunnin ajan, eli noin 76 % nostovaiheen käyttämästä tehosta DC verkkoon tuotettuna.

E: Tarttujan nosto. Kun kontti on laskettu ja irrotettu tarttujasta, nostetaan tarttuja takaisin sen täyteen korkeuteen. Tällä vaiheella tehontarve on matala. Keskimääräinen teho on tälle vaiheelle 124 kW 21 sekunnin ajan.

F: Vaunun siirto takaisin. Nosturin vaunu siirretään takaisin alkuperäiseen sijaintiinsa vaakasuunnassa. Keskimääräinen teho on tälle vaiheelle 25 kW 44 sekunnin ajan.

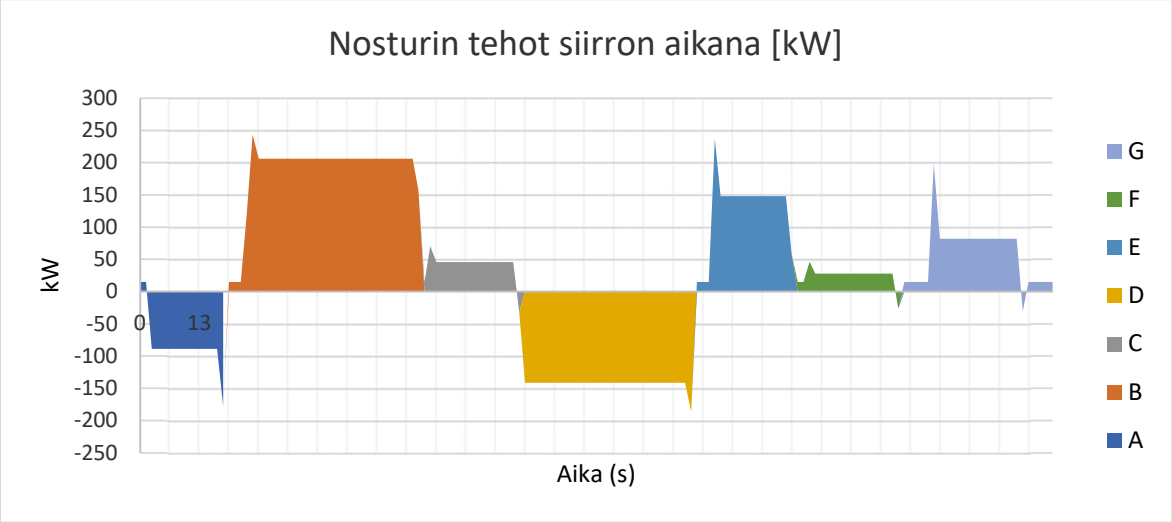
G: Nosturin siirtyminen konttipinojen välillä. Kun nosturia siirretään konttipinojen välillä, ovat nosturin kokonaiskuormat huomattavan pieniä. Pieni määrä jarruenergiaa voidaan ottaa talteen. Tämä on syklin ajallisesti pisin vaihe. Keskimääräinen teho on tälle vaiheelle 56 kW 40 sekunnin ajan.



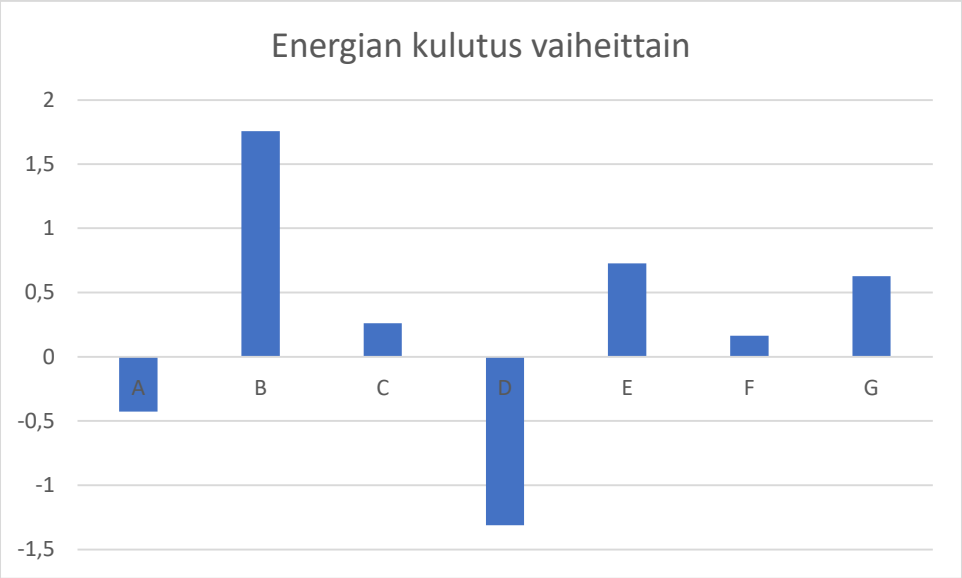
Kuva 6 Nosturin teho eri liikkeiden aikaan. A: tarttujan lasku, B: kontin nosto, C: vaakasuora siirto, D: kontin lasku, E: tarttujan nosto, F: vaunun siirto, G: nosturin siirto

Kuvassa 6 on esitetty nosturin tehot yksittäisen syklin aikana. Peruskuormana nosturilla on 15 kW. Peruskuorma koostuu moottoreihin suoraan liittymättömistä kuormista, kuten ohjausjärjestelmän komponenteista, lämmityksestä, ja valaistuksesta. Vaiheiden C ja F lopussa nähdään lyhyet negatiivisen tehon hetket, kun vaunun siirto on loppuvaiheilla ja vaunua jarrutetaan. Samankaltainen negatiivinen teholukema tulee vaiheessa G, kun nosturia jarrutetaan.

Kuva 7 esittää tehon ajan funktiona sekä integroituna energiaksi



Kuva 7Yksittäisen nosturin yhden liikkeen aikainen tehonkulutus hetkellisesti (kW)



Kuva 8 Energian kulutus ja DC kiskostolle takaisin syötetty energia syklivaiheittain (kWh)

Taulukko 1 Eri työvaiheissa kuluvat tai regeneroituvat energiat

Energiat syklivaiheittain		
Toiminto	Vaihe	kWh
Tarttujan lasku	A	–0,43
Kontin nosto	B	1,76
Vaunun siirto kontilla	C	0,26
Kontin lasku	D	–1,31
Tarttujan nosto	E	0,73
Vaunun siirto kontitta	F	0,16
Nosturin siirto	G	0,63

Edellisestä taulukosta nähdään, että suurimmat energiamäärät liittyvät kontin nostoon ja laskuun. Kontin laskuvaihe ja tyhjän tarttujan laskuvaihe ovat parhaat vaiheet energian talteenottoon.

2.2 Energiatehokkuus

Yksi käytetyistä energiatehokkuuden parannuskeinoista on nosturikohtaisten energiapiikkien tasaaminen. Koska nostureiden automaatiojärjestelmä ja nostureissa jo käytössä olevat keinot yksittäisten piikkien tasaamiseen ovat laajalti käytössä, ei tässä työssä keskitytä enää yksittäisiin nostureihin.

Terminaaleissa, joissa useat kymmenet RTG-nosturit toimivat samanaikaisesti, eri syklivaiheissa, tasaantuu tarvittava huipputehojen määrä huomattavasti. Kun konttiterminaalissa on esimerkiksi 10 nosturia, jotka toimivat toisistaan riippumatta eri syklivaiheissa, vaikuttaa se tehohuippuihin seuraavilla tavoilla:

1. Energiakulutuksen tasaantuminen: Koska nostureiden liikkeet eivät ole suoraan riippuvaisia toisista nostureista, toimivat nosturit todennäköisesti eri syklivaiheissa. Tämä tasoittaa terminaalin näkökannalta energiankulutusta, sillä kaikki nosturit eivät työskentele samanaikaisesti energiaintensiivisimmissä vaiheissa kuten nostoissa. Terminaalin kokonaiskulutus on siten keskimäärin tasaisempi kuin yksittäisen nosturin energiankulutus. Ilman erityistä sääntelyä on tietenkin teoriassa mahdollista, että useat sataman nosturit ottavat yhtaikaisesti suurta tehoa. Se että kaikki nosturit olisivat syklin kuluttavimmassa hetkessä samanaikaisesti, on kuitenkin todella epätodennäköistä.

2. Suhteellisten kulutushuippujen vähentyminen: Mitä enemmän nostureita terminaalissa työskentelee sitä vähemmän yhden yksittäisen nosturin tehohuiput vaikuttavat suhteellisesti kokonaisuuden keskimääräiseen tehonkulutukseen, sillä todennäköisyys sille, että nosturit olisivat energiaintensiivisimmissä vaiheissa, pienenee. Vaikka yhden nosturin nosto- tai siirtovaihe aiheuttaa hetkellisesti korkean kulutuksen, kaikkien nostureiden tehohuiput jakautuvat todennäköisemmin eri aikoihin, jolloin kokonaisuudessa suhteelliset tehohuiput jäävät mataliksi. Tämän ansiosta terminaalin sähkönsyöttöjärjestelmä ei joudu yhtä usein käsittelemään suuria tehopiikkejä, mikä voi vähentää tarvetta varautua suuriin hetkellisiin tehotarpeisiin, laskea sähkön hankinnan kustannuksia ja mahdollisesti pienentää varajärjestelmien tarvetta.

3. Keskimääräinen kuormitus ja kokonaissähkönkulutus: Vaikka suhteellisesti suurten tehohuippujen esiintyminen vähenee nosturien määrän kasvaessa, useamman nosturien yhtäaikainen toiminta luonnollisesti kasvattaa keskimääräistä energiankulutusta. Kokonaiskulutusta voidaan arvioida yksittäisen nosturin keskimääräisen, yhden syklin aikaisen energiankulutuksen avulla kertomalla sen nosturien ja ajettavien syklien määrällä.

4. Energiantarpeen suunnittelu ja optimointi: Nosturien määrän kasvaessa ja suhteellisten kulutushuippujen vähetessä voidaan terminaalin sähköjärjestelmä suunnitella aiempaa

tehokkaammin ilman ylikapasiteettia. Kun nosturit toimivat eri työvaiheissa, on myös energian talteenotto ja varastointijärjestelmät ja niihin käytettävät menetelmät helpompi suunnitella. Esimerkiksi konttilohkokohtaiset akustot voidaan suunnitella kahden tai neljän nosturin kuormien mukaan niin, ettei niillä ole suurta tarvetta reagoida suuriin vaihteluihin kulutuksessa.

3 Energiatehokkuuden parantaminen

Tässä luvussa käsitellään erilaisia skenaarioita, joilla nostureiden energiatehokkuutta voidaan parantaa. Luvussa käsitellään myös työtä varten kehitettyä simulaatiomallia, jolla eri skenaarioita vertaillaan keskenään.

3.1 Simulointi

Erilaisten energiahallintamenetelmien simulointi on toteutettu Matlab 2024b ohjelmalla. Työtä varten on rakennettu RTG_EnergySimulation ohjelma, jolla voidaan simuloida usean nosturin samanaikaista käyttöä muunneltavan kokoisissa konttilohkoissa. Nostureiden mekaaniset tiedot, sekä nosturikohtaisten moottoreiden ja akkujen tiedot on valittu Konecranesin asiakasprojekteista, niin että ne luovat testiprojektista vertailukelpoisen.

Simulointiohjelman perustoimintaperiaate on rakennettu niin että terminaalin toimintaa simuloidaan kaikkien nostureiden osalta ajanjakso (timeStep) kerrallaan. Tätä työtä varten on ajanjaksoksi valittu yksi (1) sekunti. Simulointiohjelma käy siis koko terminaalin ja kaikkien nostureiden hetkittäiset tehot läpi sekunti kerrallaan. Ohjelma kerää jokaisella kierrolla kaikilta nostureilta läpi niiden suorittaman tehtävän, liikkeen, nopeudet, ja käytetyn energian. Terminaalin kokonaiskuormaa seurataan hetkittäin, jotta yksittäisille nostureille voidaan antaa halutessa hidastus, tai viivästyskäskyjä myöhempiä vertailutilanteita varten.

Nostureiden tehot on laskettu tilanteessa, jossa konttilohkoon kohdistuu 12 m/s tuulikuorma konttilohkon suuntaisesti. Tämä aiheuttaa nostureille korkeampia liiketehoja, kun kuljetaan tuulensuuntaa vastaan, ja pienempiä kun kuljetaan tuulen suuntaisesti. Tuulikuorma on yleinen ongelma, usein rannikolla sijaitseville terminaaleille ja niiden sähköverkoille.

Nostureiden moottoreiden vaatimat tehot on laskettu erikseen kiihdytys, jarrutus, ja normaalinopeuksille. Nosto ja siirtomoottoreihin kohdistuva kuorma perustuu myös siirrettävän kontin painoon. Simulaatiossa tämä tarkoittaa sitä, että raskaita kontteja siirrettäessä vaadittu teho kasvaa.

Kaikki simuloinnit on suoritettu niin, että niissä esitetään 40 nosturin yhtäaikaista käyttöä, jossa kukin nosturi suorittaa omalla ennalta määritellyllä varastoalueellaan 50 siirtoa

samanaikaisesti. Siirtokäskyt ovat kaikilla simuloinneilla samat, jotta kaikki nosturit suorittaisivat ennalta asetetut siirrot eri tilanteita simuloidessa. Samojen siirtokäskyjen käytöllä on pyritty tuottamaan mahdollisimman vertailukelpoista dataa kaikista simuloinneista. Käyttämällä samoja siirtokäskyjä vältytään tilanteilta, jossa satunnaiset siirtokäskyt aiheuttaisivat vertailuun epäolennaisia tuloksia. Simulointituloksissa esitetään kaikkien nostureiden tuottama kuormitus terminaalin verkkoon, sekä tehonkulutuksen huippuhetket ja tehohuiput. Akkujen ja regeneroidun energian osalta simulointituloksista saadaan ilmi myös kuinka paljon energiaa akustoista on otettu ja kuinka paljon energiaa on tuotettu akustoihin tai terminaalin verkkoon. Regeneroinnin huippuhetkinä kaikkea energiaa ei välttämättä voida ottaa akkuihin talteen, sillä akustojen maksimaaliset lataustehot ylittyvät. Tässä simuloinnissa akustojen kapasiteetti ja lataus-/purkaustehot on valittu Konecranes B-RTG [4] tuotteen mukaisesti, niin että akuston kapasiteetti on 296 kWh ja lataus/purkausteho on 300 kW. Terminaaliakun tapauksessa käytetään akustolla suurempia arvoja, nosturien määrällä skaalattuna.

3.1.1 Simulaatiomallin validointi

Työssä käytetty simulaatiomalli on laadittu perustuen Konecranesin toteuttamiin asiakasprojekteihin sekä nosturien tyyppitietoihin ja valmistajan aiempiin mittaustuloksiin. Malli kuvaa nosturin keskeisimmät toiminnot (nosto, lasku, vaakasiirto vaunulla, ja liikkuminen konttilohkon sisällä nosturilla) sekä regeneratiivisen energian talteenotto ja käyttö muilla nostureilla.

Simulaatiomallin lähtötiedot ja oletukset on validoitu seuraavin tavoin:

- Nosturien tekniset tiedot: Mallissa käytetyt nosturikohtaiset moottori ja energiankulutusarviot perustuvat valmistajan nostureiden todellisiin projektitietoihin ja toimintaprofiileihin. Eri painoisten konttien siirrosta johtuva muuttuva tehotarve, sekä vakiotehot kuormittamattomina on myös huomioitu simulaatiossa.
- Ympäristöolosuhteet ja kuormitus: Simulaatiossa on käytetty 12 m/s konttilohkon suuntaista tuulikuormaa, joka perustuu projektikohtaisiin tietoihin ja kuvaa yleisesti konttiterminaaleille ominaista tuulikuormaa. Tuulikuorma toimii skenaarioissa kuormitushuippujen arvioinnissa.

- Siirtokäskyt: Siirtokäskyjen vakiointi kaikille skenaarioille erilaisia ratkaisuja simuloidessa varmistaa vertailukelpoisuuden eri energian talteenottotapojen ja huipputehojen hallinnoinnin välillä. Nostureiden tekemät liikkeet ovat kuitenkin simulaatiossa optimaalisia, eivätkä kuvaa täydellisesti mallin soveltuvuutta poikkeustilanteissa.
- Akustojen lataus- ja purkaustehot sekä hyötysuhde: Simuloinnissa käytetään valmistajan tietoihin perustuvia energiavarastojen keskimääräisiä hyötysuhteita.

3.1.2 Simuloinnin rajoitukset.

Simulaatiomallilla saavutetut tulokset ovat suuntaa antavia ja soveltuvat parhaiten keskikokoisiin tai suuriin terminaaleihin. Seuraavat seikat rajoittavat tulosten suoraa soveltamista kaikkiin tilanteisiin ja olosuhteisiin:

- Satunnaisuus ja liikennevirrat: Nostureiden liikkeet eivät ole täysin satunnaisia, jotta eri tilanteiden vertailu olisi helpompaa. Terminaalin ulkopuolisia muuttujia kuten konttilaivojen satunnaista saapumista tai rekkaliikenteen myöhästymistä ei ole otettu huomioon.
- Järjestelmän viiveet ja ohjauksen dynamiikka: Nosturien viiveitä ja mahdollisia ongelmia (esim. Huoltotilanteet, konttilohkossa olevan toisen RTG-nosturin väistäminen tai liikkeen odottaminen, kun toinen nosturi on liikkeen tiellä) ei ole otettu huomioon.
- Verkkoon kohdistuvat vaikutukset ja THD: Regeneratiivisen energian syötössä verkkoon ei ole otettu huomioon mahdollisia harmonisia häiriöitä, tai muita verkon kuormien vaikutuksia.
- Akustojen elinkaari tai lämpötila: Akustojen kapasiteetin heikkeneminen käytön ja ajan mukaisesti, tai ympäristön lämpötilan vaikutuksia akustoihin ei ole otettu huomioon.

Yhteenvetona simulaatio on riittävän tarkka vaihtoehtoisten energiaratkaisuiden (akustot, terminaaliakusto, hidastetut liikkeet, ym.) vertailuun keskenään. Todellista terminaalin toimintaa

mallintaessa ja tarkkoja energiansäästöpotentiaaleja arvioitaessa tulee kuitenkin huomata terminaalikohtaiset olosuhteet, mukaan lukien terminaalin ulkoiset muuttujat ja olosuhteet.

3.1.3 Simuloinnin vertailutapaus

Simulointituloksien vertailua varten on testiohjelmalla ajettu simulointi, jossa nostureille ei anneta minkäänlaisia hidastus tai viivästyskäskyjä, eikä nostureilla tai terminaalilla ole akustoa. Nosturit voivat kuitenkin tuottaa energiaa terminaalin verkkoon jarrutus tai laskutilanteissa. Tällaisessa tilanteessa toiset nosturit voivat käyttää regeneroitua energiaa suoraan hyödyksi. Jos terminaalin kokonaisteho kaikilta nostureilta menee negatiiviseksi, tarkoittaa se sitä, että terminaali syöttää tehoa ulkoiseen sähköverkkoon tai terminaaliakkua käytettäessä lataa terminaaliakkua.

Vertailutapauksessa on käytetty seuraavia parametreja.

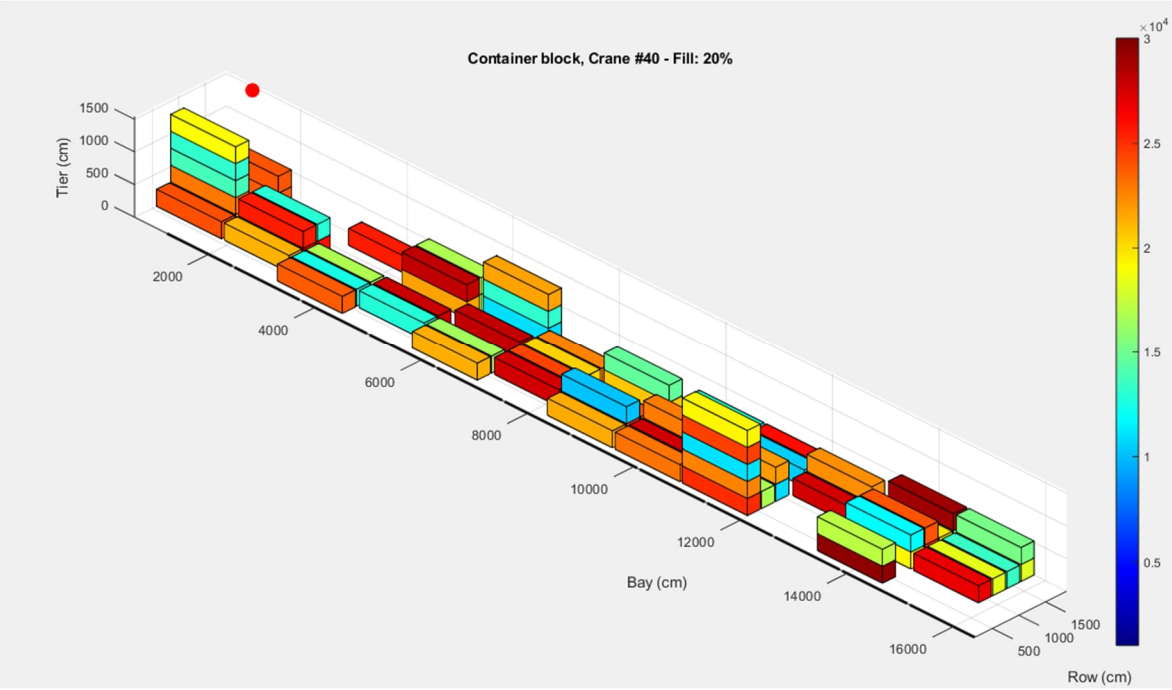
Nosturien lukumäärä: 40

Siirtojen lukumäärä: 50

Konttilohkon koko: Pituus 12 konttia, leveys 6 konttia, korkeus 5 konttia

Tuulennopeus: 12 m/s konttilohkon suuntaisesti

Kuva 9 esittää yhtä konttilohkoa.

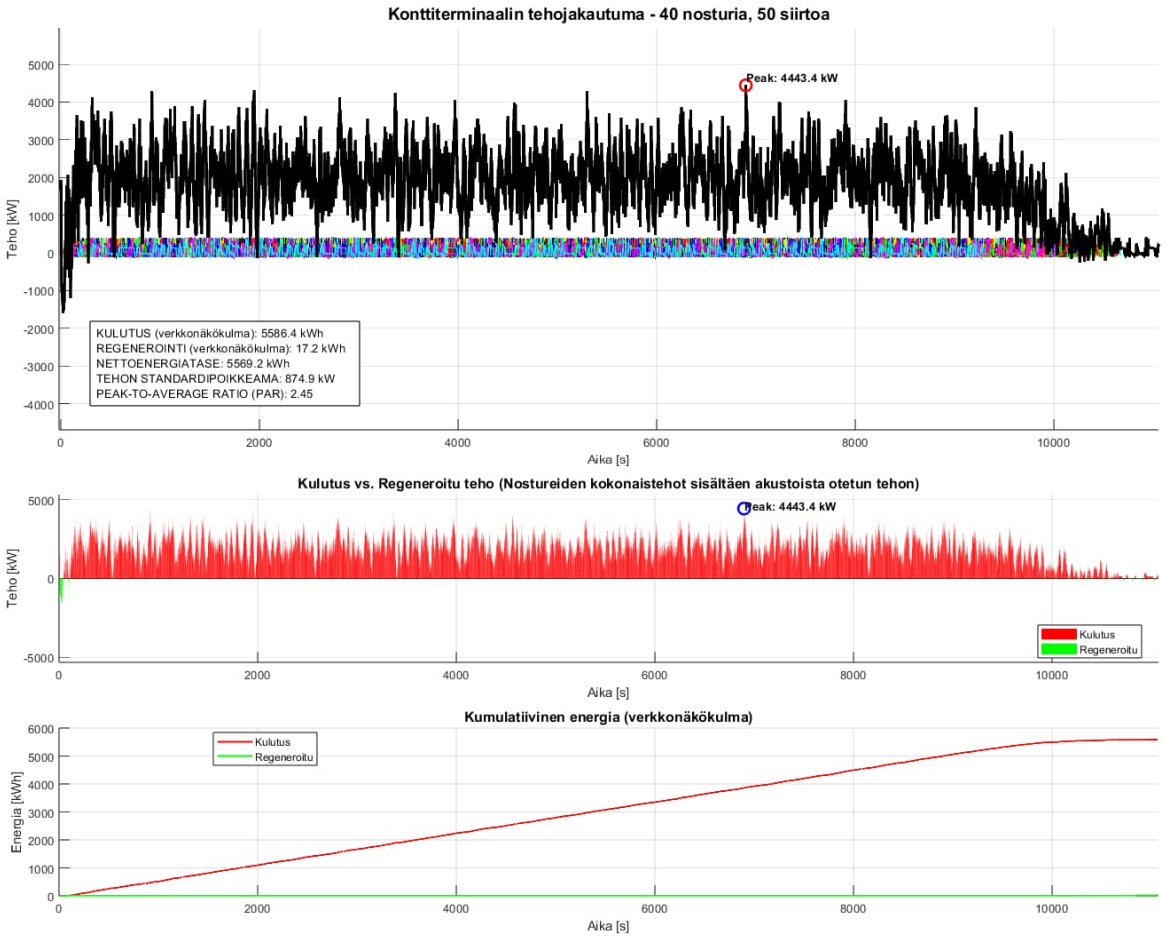


Kuva 9 Esimerkki konttilohkosta 1 mittoineen [cm]. Nosturi 1 suorittaa siirtoja. Konttien värit edustavat niiden massaa [kg] väriskaalan mukaisesti.

Simulaatio osoitti vertailuajossa kaikkien siirtojen olevan suoritettu 11072 sekunnissa, eli hieman yli 184 minuutissa. Kaikkien nosturien keskiarvona tämä tarkoittaa keskimääräiseksi siirron pituudeksi 11072/60/50 = 3,69 minuuttia, ja siirtonopeudeksi hieman yli 16 siirtoa tunnissa.

Terminaalin näkökulmasta suurin hetkittäinen maksimiteho oli simuloinnissa 4443 kW, keskitehon ollessa koko ajanjaksolla 1810 kW.

Kokonaiskulutus energianäkökulmasta oli 5586 kWh ja ulkoiseen verkkoon regeneroitu energia 17.2 kWh. Terminaalin nettoenergiankulutukseksi saadaan näistä lukemista 5569 kWh. Tehon huippu/keskiarvosuhde oli simulaatiossa 2.45. Vertailuajon energiankulutuksen kuvaajat on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10 Vertailuajon energiankulutus. Kuvasta havaitaan, että regeneroitua energiaa ei syötetä takaisin terminaalin ulkoiseen verkkoon, vaan kaikki regeneroitu energia menee käyttöön terminaalissa.

3.1.4 Simulointitulosten merkitys ja vertailukelpoisuus

Simuloinnin vertailutapaus vastaa normaalin RTG-terminaalin osittaista energiankulutusta, siltä osin miten paljon energiaa nosturit terminaalissa käyttävät. Koska loput simuloinneista voidaan simulointiohjelmalla ajaa samoilla siirtokäskyillä, voidaan myöhempiä vertailutuloksia pitää tähän nähden simulaation validoinnin ja rajoitteiden puitteissa merkityksellisinä.

3.2 Yhtäaikaiset vastakkaistehoiset käytöt

Tilanteissa, joissa useita nosturissa olevia sähkömoottoreita voidaan käyttää vastakkaisin tehoin, tai tilanteissa, joissa useiden nostureiden hallinnoimia kuormia voidaan liikuttaa niin, että

nostureiden kokonaiskuormat liikkuvat vastakkaisin tehoin, voidaan esimerkiksi nostettavan kuorman kuluttamaa energiaa paikata yhtäaikaisesti laskettavan kuorman verkkoon tuottamalla energialla. Tällä tavoin voidaan moottorin tuottamaa energiaa käyttää toisella moottorilla tuottamaan liikevoimaa jopa ilman akustoja.

Tällaisten tilanteiden toteuttaminen vaatii nosturien hallinnointia niin, että konttien nostoliikkeet ja laskuliikkeet on suunniteltu toimimaan yhdessä synergisesti eri nosturien välillä. Sähköenergian syöttö nosturilta takaisin nosturiverkkoon taas vaatii verkkovaihtosuuntaajaa (Active Front End, AFE). AFE:lla varmistetaan verkkoon päin syötettävän sähköenergian laatu ja hallinta. AFE vaatii toimiakseen myös kehitystyötä koko sataman nosturiverkostoa hallinnoivalta CMS järjestelmältä. Pietrosanti et. al. [3] tutkimuksessa on todennettu jopa 47 % energiasäästöt AFE:n eduksi verrattaessa AFE nosturiverkostoa nostureihin ilman AFE:ta Alasanti et al. [2] tutkimuksessa on vertailtu AFE ja ESS (Energy Storage System) nostureita ja todettu AFE:n olevan 47 % energiatehokkaampia ESS nostureihin verrattuna.

Perusperiaate voidaan jakaa viiteen osaan:

1. Energian talteenotto: Kun yhdellä nosturilla lasketaan konttia, painovoima vauhdittaa liikettä ja laskusta tuleva potentiaalienergia voidaan muuttaa sähköenergiaksi, joka voidaan joko tallentaa sähköakkuihin, tai tässä tapauksessa käyttää yhtä aikaa tehtävään nostoon toisella nosturilla. Nostureissa voidaan käyttää erilaisia energian talteenoton mekanismeja, kuten regeneratiivisia jarruja. Regeneratiivinen jarrutus toimii siten, että nosturin laskiessa kuormaa, sähkömoottorit toimivat generaattoreina muuntaen laskevan massan potentiaalienergian sähköenergiaksi, joka otetaan talteen.

2. Energian jakaminen: Ensimmäisessä kohdassa mainittu talteen otettava sähköenergia jaetaan verkon kautta ja hyödynnetään toisella nosturilla, joka samanaikaisesti tarvitsee lisäenergiaa liikkeeseen, kuten kontin nostoon tai nosturin liikuttamiseen. Näin ollen toisen nosturin ei tarvitse käyttää yhtä paljon omaa energiaresurssiaan, kun se voi vastaanottaa ensimmäisen nosturin tuottamaa energiaa.

3. Dynaaminen toimintatapa: Nosturien toiminnan dynaaminen koordinointi tarkoittaa, että ne vaihtavat rooleja aktiivisesti. Yhdellä nosturilla talteen otettavaa kontin laskusta generoitua energiaa toimitetaan toiselle nosturille, joka samanaikaisesti liikuttaa toista konttia ylös, tai liikkuu itse. Tällaista prosessia kutsutaan ”energian vastapainotukseksi”.

4. Älykäs ohjaus: Etenkin ilman akustoja, talteen otettavien ja samanaikaiseen käyttöön menevien energiavirtojen ohjaus vaatii edistynyttä ohjausjärjestelmää, jolla pystytään laskemaan energiavaihteluja ja tarpeita reaaliajassa ja ohjaamaan nostureita toteuttamaan liikkeet optimaalisella ajoituksella.
5. Verkon integrointi: Kun nostureita ei käytetä samanaikaisesti tai kun ne eivät ole energianvaihtotilanteessa, osa niiden tuottamasta energiasta voidaan palauttaa esimerkiksi sataman sähköverkkoon, jolloin se voidaan hyödyntää muissa prosesseissa tai laitteistoissa. Energiatehokkuuden parantaminen tällaisella menetelmällä vähentää sataman toiminnan kokonaisenergiankulutusta ja voi johtaa merkittäviin kustannussäästöihin pitkällä aikavälillä. Lisäksi se on hyödyllinen ympäristön kannalta, koska vähentää satamaoperaatioiden hiilidioksidipäästöjä ja parantaa sataman kestävyyttä.

3.2.1 Kustannukset

Energian talteenottojärjestelmät: Vaikka järjestelmä voitaisiin periaatteessa rakentaa ilman akustoja, tarvitaan energian talteenottoa varten silti regeneratiivinen jarrutusjärjestelmä ja siihen soveltuva invertteri.

Älykäs ohjausjärjestelmä. Järjestelmän on pystyttävä reaaliaikaisesti seuraamaan ja ohjaamaan nosturien liikkeitä sekä koordinoimaan energian siirtoja nostureiden välillä.

Tehonhallintajärjestelmät: Mitoitus ja hallinta kaiken käyttöön tulevan tehon varmistamiseksi edellyttää investointeja tehonhallintajärjestelmiin, jotka optimoivat energiaa ja parantavat kokonaistehokkuutta.

Sataman operaatioiden uudistaminen: Energiatehokkaan käyttömallin saavuttaminen edellyttää sataman operaatioiden uudistamista, mikä voi merkitä lisäkustannuksia logistiikassa ja ajoituksessa.

Tekninen suunnittelu ja konsultointi: Nämä järjestelmät ovat monimutkaisia ja edellyttävät asiantuntijoiden apua suunnittelussa ja toteutuksessa, jotka tuovat mukanaan lisäkustannuksia.

Mahdolliset lisätarvikkeet valmiuden parantamiseksi: Tarvittaisiin myös lisäkomponentteja tai saatavilla olevaa kapasiteettia energian puskurointiin eri tilanteissa, kuten energianpiikkien aikana. On tärkeää mainita, että vaikka nämä investoinnit voivat olla aluksi melko suuria, ne voivat johtaa pitkällä aikavälillä merkittäviin säästöihin osana energiatehokkuuden

parantumista ja operatiivisten kustannusten pienenemistä. Lisäksi ympäristösyistä ja mahdollisista säädöksistä johtuen tällaiset investoinnit voivat olla välttämättömiä tulevaisuudessa.

3.2.2 Energian kustannussäästöt

Jotta voidaan alkaa selvittää uusien teknologioiden ja ratkaisujen tuomia energiakustannusten säästöjä, täytyy ensin luoda kattava energiakäytön analyysi. Tätä varten täytyy tehdä tutkimusta ja tunnistaa alueet, joilla on suurin säästöpotentiaali. Näin saadaan kohdistettua mahdolliset investoinnit tehokkaimmin.

Energiakustannusten säästöissä on hyvä huomata, että vaikka säästöihin vaadittavat alkuinvestoinnit, eli nosturien hinnat, voivat olla suuria, tulevat niiden käyttökustannukset olemaan pitkällä aikavälillä tarkasteltuna pienempiä. Alkukustannuksiin voi myös mahdollisesti saada rahoitusta tai tukia, riippuen nosturitoimintaa suorittavan yrityksen kohdemaasta.

Jotta kustannuksista koituvia säästöjä voitaisiin seurata paremmin, tulisi säästöä ja suorituskykyä seurata pitkällä aikavälillä säännöllisesti, jotta voidaan todeta investointien odotetut hyödyt.

3.2.3 Hyödyt ja haitat

Jotta vastakkaistehoisia käyttöjä voidaan hyödyntää nostojen aikana, täytyy nostureissa olla AFE. Pienemmissä terminaaleissa, tai terminaaleissa, joissa nostureiden syötönjako on rakennettu niin että vain pientä määrää nostureista syötetään yhdestä pisteestä, joitakin liikkeitä täytyy hidastaa tai viivästyttää jotta liikkeiden vastakkaisia tehoja voidaan hyödyntää. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että yksittäisten nostureiden nostotoimenpide täytyisi ajoittaa sellaiseen aikaan, kun terminaalin verkon kulutus on pientä, tai toinen nosturi suorittaa samanaikaisesti painavan kontin laskua. Tämän takia terminaalin toiminta voi hidastua.

Terminaalin sähköverkon näkökulmasta vastakkaistehoisia käyttöjä tapahtuu useammin, jos verkossa on samanaikaisesti enemmän nostureita toiminnassa. Siirtojen satunnaisuuden ja vaihtuvien konttien painojen seurauksena voi terminaalin sähköverkkoon kohdistua myös suurempia kulutushuippuja, kun useampi nosturi suorittaa samanaikaisesti nostoja tai gantryn liikettä, konttien laskun sijaan.

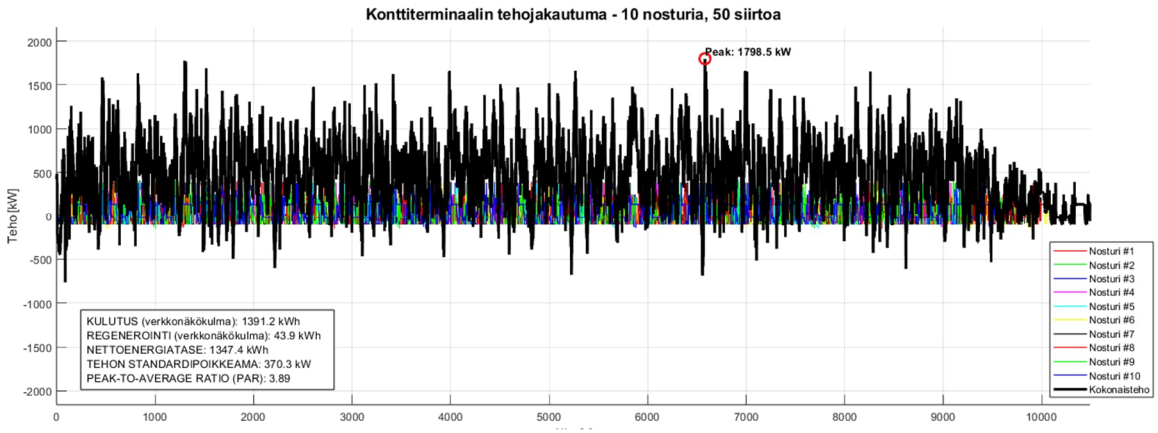
Pienempiä terminaaleja, tai pienempiä nosturiryhmiä tarkastellessa voidaan myös havaita, että kaikkien nostureiden yhteisteho heittelee käänteisesti verrannollisena nostureiden määrään nähden. Esimerkiksi 10 nosturin terminaalia simuloidessa saatiin yhteistehon huippu/keskiarvosuhde (PAR) arvoksi 3.89. Vastaavasti PAR lukema oli 40 nosturin verkolla vain 2.81, ja 60 nosturin verkolla 2.39. Tästä voidaan havaita, että mitä suurempaa määrää nostureita tarkastellaan, sitä lähempänä kuormituksen huiput ovat suhteelliseen keskiarvoon.

Mitä suurempaa joukkoa nostureita tarkastellaan, sitä epätodennäköisemmäksi muuttuu myös tilanteet, joissa koko terminaalin teho on hetkittäin negatiivisena.

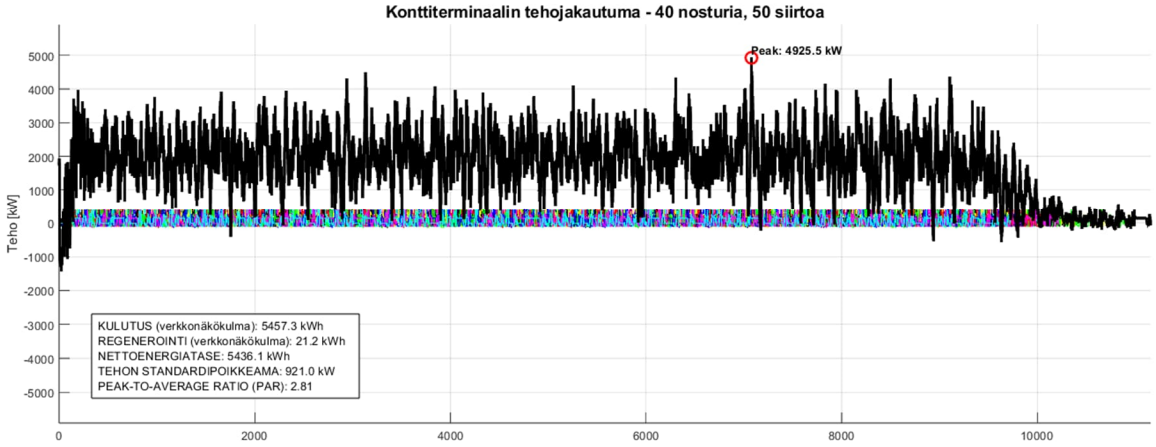
Taulukko 2 Nosturimäärän vaikutukset yhtäaikaisiin käyttöihin

Nostureiden määrä	Huipputehon suhde keskitehoon, PAR	Maksimiteho	Tehon standardipoikkeama
10	3,89	1799 kW	370 kW
40	2,81	4926 kW	921 kW
60	2,39	6626 kW	1162 kW
80	2,12	7741 kW	1514 kW

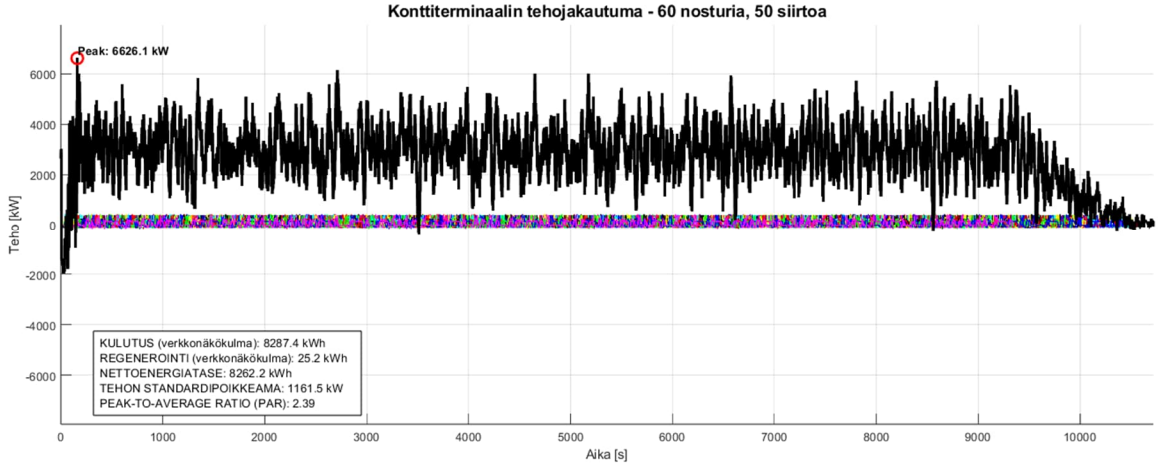
Kuvista 11–14 voidaan havaita, että mitä suurempaa määrää nostureita tarkastellaan sitä harvemmin kokonaisteho menee negatiiviseksi. Simuloinnin alussa teho on negatiivisena, sillä kaikki nosturit suorittavat ensimmäistä nostoa suurin piirtein samaan aikaan.



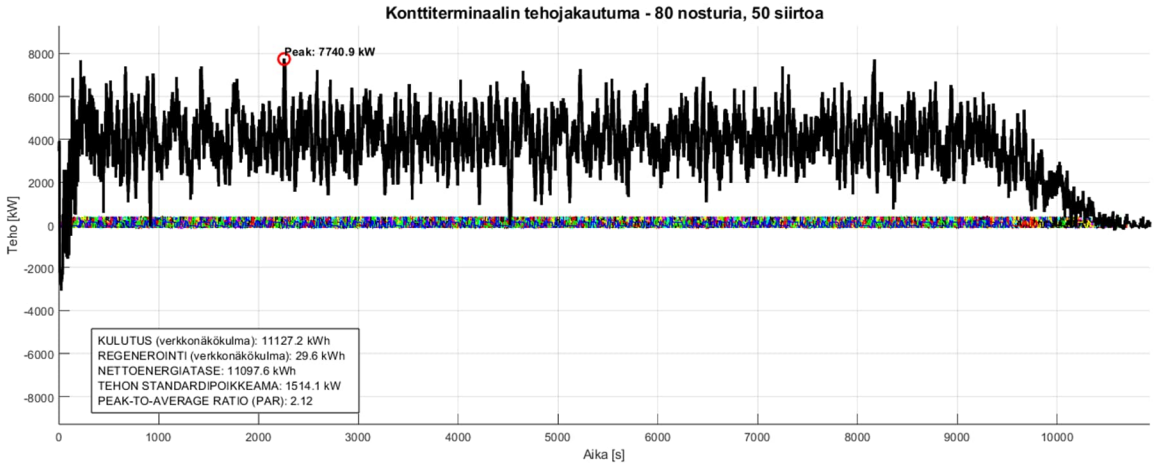
Kuva 11 Kymmenen nosturin terminaaliverkko. Kuvasta on havaittavissa, että tarkastellun verkon teho on usein negatiivinen.



Kuva 12 40 Nosturin terminaaliverkko. Kokonaisteho menee harvoin negatiiviseksi.



Kuva 13 60 Nosturin terminaaliverkko. Teho ei ole lähes koskaan negatiivinen.



Kuva 14 80 Nosturin terminaaliverkko. Teho on negatiivisena ainoastaan alun poikkeustapauksessa, jolloin kaikki nosturit ovat suorittamassa ensimmäistä nostoa.

3.2.4 Simulointi

Vertailua varten on aiemmin esitettyyn simulointiin lisätty viivetoiminta, joka viivästyttää yksittäisten nosturien tekemiä nostoja sen perusteella, mikä terminaalin kokonaiskuorma on ajan hetkellä. Viivästysten vaatimaksi kokonaiskuormaksi on simuloinnissa määritelty 3900 kW, ja liikkeiden maksimaaliseksi viivästysajaksi 30 sekuntia.

Näillä parametreille on päästy simulaatiossa lähes samaan aikarajaan kuin vertailussa, 11074 sekuntia. Viivästyksistä huolimatta on siis siirtonopeudeksi saatu hieman yli 16 siirtoa tunnissa.

Viivästyksiä tapahtui tällä simulaatiokerralla yhteensä 172 kappaletta ja viivästysten keskimääräinen aika oli 8.2 sekuntia, viivästysten yhteiskeston ollessa 1411 sekuntia, eli noin 23 minuuttia. Keskimääräinen tehopiikki, jonka aikaan viivästys otettiin yksittäisillä nostureilla käyttöön, oli terminaalin kannalta 4067 kW. Kokonaiskulutukseksi saatiin viivästysten kanssa 5587 kWh, maksimaalisen huipputehon pudotessa 4340 kW:iin ja tehon huippu/keskiarvosuhteen pudotessa hieman 2.45:stä 2.4:ään.

Yhteenvetona voidaan todeta, että viivästyksistä ei koitunut simulaatiossa terminaalille suurta haittaa, mutta huipputehoa saatiin pienennettyä 2.3 %. Tarkemmalla nostojen ajoituksella voitaisiin teoriassa päästä paljon suurempiin säästöihin, mutta se ei tähän työhän rakennetulla simulaatiolla ole aikarajojen puutteessa mahdollista. Jos simulointia ajettaisiin pidempään, eli jos nosturit tekisivät suuremman määrän toistoja, esimerkiksi 20 tunnin ajan, nähtäisiin viiveistä luultavasti koituvan suurempia haittoja. Koska simulointi ajaa nostureiden liikkeitä vain muutaman tunnin ajan, ja koska yksittäiset nosturit, joilla voi olla pidempikestoisia liikkeitä venyttävät simulaation kestoa, ei viiveitä kuitenkaan havaita kaikkia nostureita tarkastellessa. Yksittäinen pidempiä siirtoja tekevä nosturi saattaa siis venyttää alkuperäisen simulaation kestoa liikaa, jotta muiden nopeampia siirtoja tekevien nostureiden pienet viiveet havaittaisiin.

Todellisuudessa nostureiden tekemien siirtojen hidastus vaatisi terminaalilta kattavaa systeemiä, joka ennustaa nostureiden verkkoon tuoman kuorman. Tätä varten tulisi terminaalilla olla myös tiedossa kaikkien terminaaliin säilöttävien konttien todelliset painot mahdollisimman suurella tarkkuudella. Ulkoiset olosuhteet, kuten konttilohkoon kohdistuva tuulikuorma, joka vaikuttaa eri tavalla eri suuntaan tehtyihin siirtoihin, tulisi myös huomioida siirtoja ja viiveitä suunnitellessa. Viiveistä johtuva toiminnan hidastuminen vaikuttaa myös siirrettävien konttien

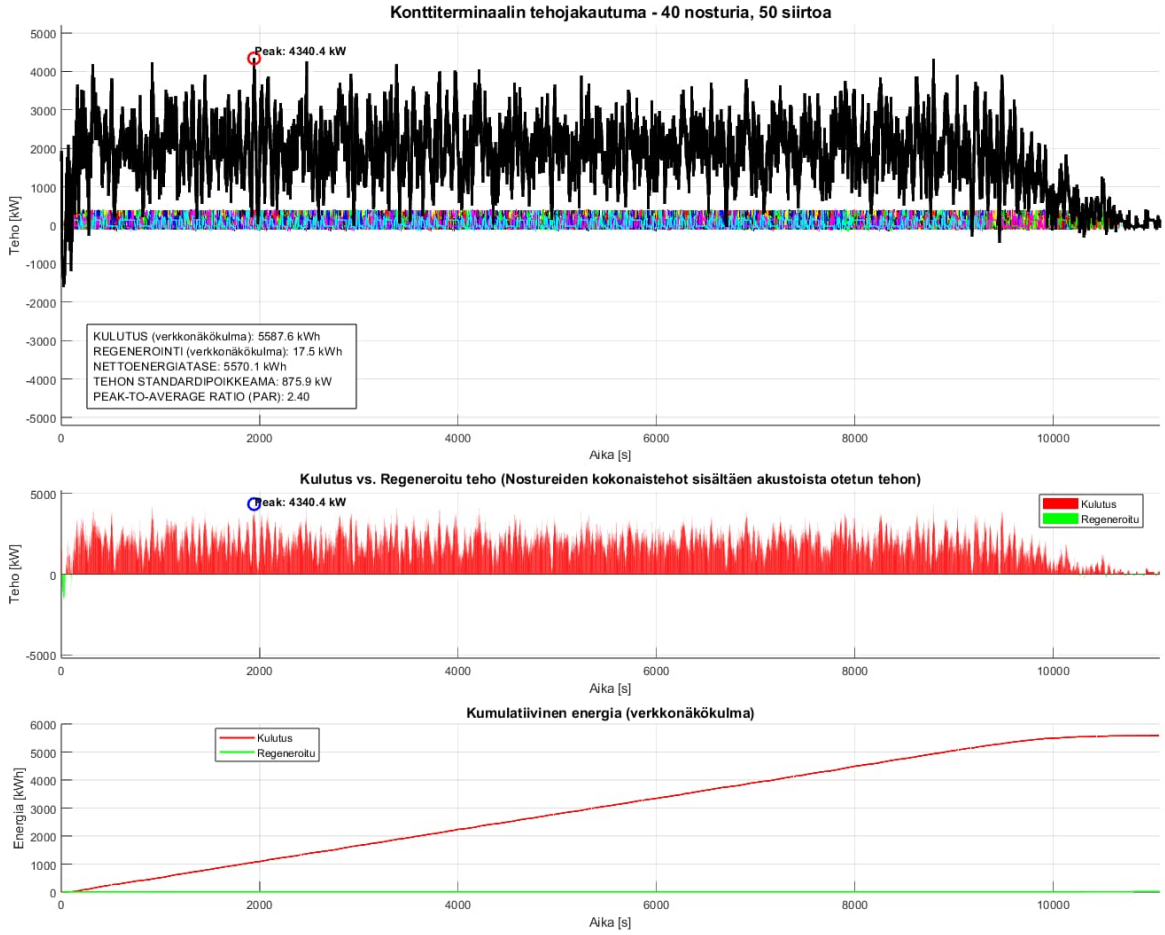
siirtoon lohkon maapuolella, jossa konttia hakeva rekka voi joutua odottamaan pidempään. Tällaisten kerrannaisten vaikutusten haittoja ei kuitenkaan tässä työssä voida tutkia.

Taulukossa 3 on esitetty simulaation tulokset.

Taulukko 3 Yhtäaikaisten ja viivästettyjen liikkeiden vertailutulokset

Simulaation kesto	11074 s
Maksimiteho	4340 kW
Keskiteho	1811 kW
Tehon standardipoikkeama	876 kW
Peak-to-Average Ratio (PAR)	2.40
Viivästysten kokonaismäärä	172
Keskimääräinen viivästysaika	8.20 s
Viivästysten yhteiskesto	1411 s
Viivästyksiin liittyvien tehopiikkien keskiarvo	4067 kW

Kuva 15 esittää tilannetta, kun käytetään viivästystä.



Kuva 15 Terminaalin tehojakauma viivästystoimintoa käyttäen. Kuvasta voidaan havaita, että huipputeho on pienempi ja esiintyy eri aikaan kuin vertailussa.

3.3 Energian talteenotto nosturikohtaisiin akustoihin

Samoin kuin moottorien yhtäaikaisella vastakkaistehoisella käytöllä, voidaan yhden moottorin laskuliikkeessä tuottamaa ja talteen otettua energiaa hyödyntää akustojen avulla muiden moottorien käyttöön. Nosturikohtaisilla akustoilla tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että moottoreiden generoima energia otetaan talteen akustoihin ja akustoja käytetään virtalähteenä valituissa tilanteissa.

3.3.1 Kustannukset

Akustoilla on alkuinvestointikulu ja akustot tuovat nostureille lisää huoltotarvetta. Tätä investointia kompensoi kuitenkin akustojen tuoma energiansäästö.

3.3.2 Energian kustannussäästöt

Energian kustannussäästöjä syntyy nosturikohtaisia akustoja käytettäessä kahdella merkittävällä tavalla:

1. Verkosta otetun energian määrä vähenee. Simuloinnin mukaan akustoilla saatiin katettua 479 kWh energiatarpeesta, mikä vastaa noin 7.9 % vähemmän verkosta otettua energiaa. Tätä voidaan pitää merkittävänä vähennyksenä, etenkin kun terminaaleissa sähkön hinta voi perustua osittain huipputehoihin.
2. Huipputehon leikkaaminen. Akustojen avulla verkosta otettu hetkellinen huipputeho väheni 26.7 % mikä voi suoraan pienentää terminaalin energiankäytöstä tulevia maksuja, jos hinnoittelussa käytetään huipputehopohjaista laskutusta.

Lisäksi akustot mahdollistavat tulevia säästöjä energian hinnan nousun ja sähkömarkkinoiden kehittymisen myötä, mahdollistaen paremman reagoimisen lataus- ja purkausajankohtien optimoinnilla.

3.3.3 Hyödyt ja haitat

Hyödyt:

1. Huipputehon leikkaus. Nosturikohtaiset akustot vähentävät huipputehoja.
2. Energian kierrätys. Lasku ja jarrutusliikkeistä regeneroitu energia voidaan hyödyntää tehokkaasti, ilman että se syötetään verkkoon.
3. Autonomia. Nosturit voivat akustojen avulla toimia tilapäisesti ilman yhteyttä sähköverkkoon, esimerkiksi siirto- tai huoltotilanteissa.
4. Modulaarisuus. Järjestelmä voidaan ottaa käyttöön nosturi kerrallaan ilman kokonaisvaltaisia muutoksia verkkoon.

Haitat:

1. Korkea alkuinvestointi. Akustot ovat kalliita ja niiden takaisinmaksuaika perustuu pitkän aikavälin säästöihin ja optimoituun käyttöön.
2. Lisähuoltotarve. Akustot vaativat ylläpitoa, erillistä lämpötilan hallintaa ja varaustason seurantaa.
3. Kapasiteetin rajoitteet. Jos akustoja ei mitoiteta oikein, voi kapasiteetti loppua kesken huipputehojen aikana tai akustoja ei saada ladattua tarpeeksi.
4. Käyttöskenaarion herkkyys. Akustojen kannattavuus on sidoksissa terminaalin käyttöprofiiliin. Suurissa ja jatkuvasti kuormituksessa olevissa terminaaleissa hyödyt voivat olla suurempia kuin pienemmissä terminaaleissa. Jos terminaalin käyttöprofiili muuttuu, voi myös akkujen kannattavuus muuttua.

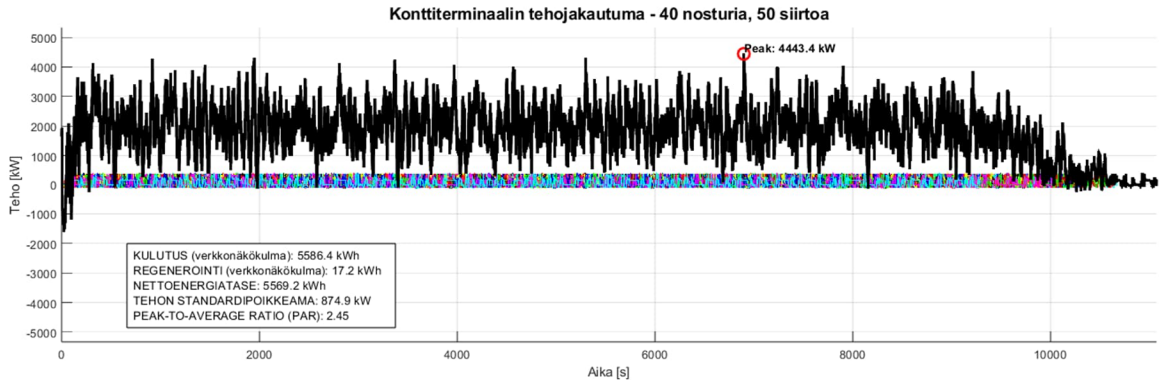
3.3.4 Simulointi

Simulointiin on valittu nostureille nosturikohtainen akusto Konecranes B-RTG:n mukaisesti [4]. Akustojen kapasiteetti on 296 kWh ja purkausteho 300 kW. Simulointiin on valittu nosturikohtainen tehoraja, jonka ylittyessä priorisoidaan energianlähteeksi terminaalin sähköverkon sijaan akusto, niin että akustojen suhteellinen lataus- ja purkaus pysyy samana. Tällä

varmistetaan, että akustojen kapasiteettia ei pureta turhaan tyhjäksi, sillä akustoja liikaa priorisoimalla testitulokset eivät olisi vertailukelpoisia. Jos akustoja käytettäisiin liikaa, tai väärillä tehorajoilla, niin testituloksissa nähtäisiin epärealistisen pieni verkkoenergian käyttö.

Jotta akustojen käytöstä ja energiamuunnoksista johtuvia häviöitä pystyttäisiin paremmin seuraamaan, on simuloinnissa käytetty akustoilla lataustehokkuutta 92 % ja purkaustehokkuutta 95 %.

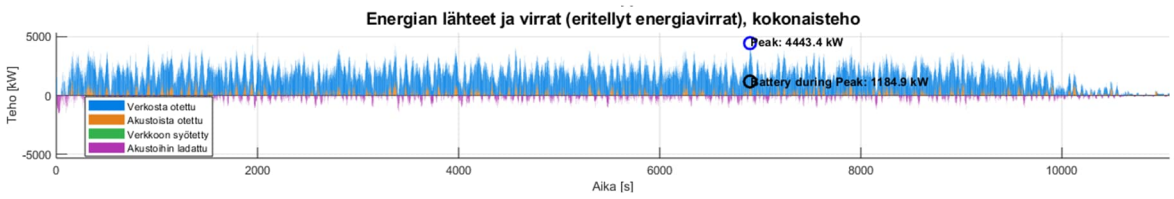
Akustot eivät vaikuta simuloinnin pituuteen. Simuloinnin kestoaika pysyy samana kuin alkuperäisessä vertailusimuloinnissa (11072 sekuntia). Akustot eivät myöskään vaikuta liikkeiden kokonaisenergiankulutukseen, joten se pysyy samana 5586.41 kWh. Yhtäaikaisten liikkeiden käyttämä hetkellinen maksimitehokin pysyy samana, 4443,3 kW. Kuva 16 esittää tuloksia tässä tapauksessa.



Kuva 16 Terminaalin tehonjakauma nosturikohtaisilla akustoilla

Simuloinnin mukainen kaikkiin liikkeisiin käytetty energia pysyi samana kuin vertailusimuloinnissa missä akustoja ei käytetty, mutta tässä tapauksessa akustoista otettiin 479 kWh energiaa, eli terminaalin energiankulutus pieneni 7,9 %, mitä voidaan pitää merkittävänä saavutuksena.

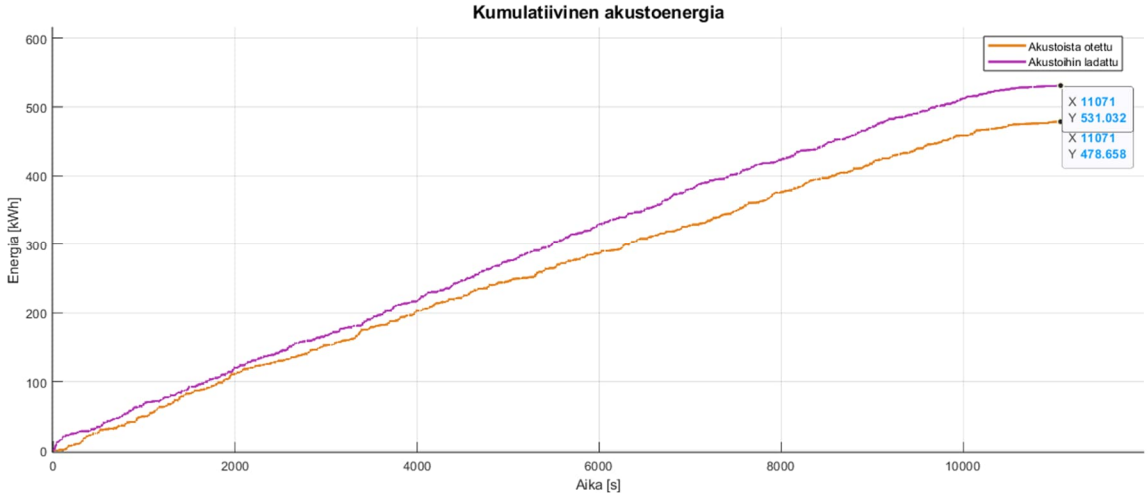
Simulointiohjelman laskema huipputehoanalyysi antoi suurimman kokonaistehon 4443 kWh ajalle akustoista otetuksi tehoksi 1185 kWh, joka pienensi alkuperäistä verkosta otettua huipputehoa 100 × 1185 kWh / 4443 kWh % = 26,7 %, kuva 17.



Kuva 17 Terminaalin energialähteet simulaation aikana. Kuvasta havaitaan, että huipputehon aikana akustot pienensivät energiankulutusta 26.7 %

Kymmenen suurimman huipputehon aikainen analyysi paljastaa, että akustot pienensivät näitä huippuja jopa 23 %. Tätä voidaan pitää hyvin merkittävänä tuloksena, kun otetaan huomioon, että terminaali voi joutua maksamaan energiasta juuri huipputehojen mukaan.

Simuloinnin ajaksi on akuille asetettu nosturikohtainen raja, jonka ylittyessä akustoja käytetään päävirtalähteenä. Tämä raja asetettiin 430 kW:iin, sillä tätä rajaa käytettäessä saatiin akustojen lataus ja purkaussuhde positiiviseksi, niin että akustoihin ladattiin enemmän energiaa kuin niistä otettiin. Kuvasta 18. havaitaan että akustoihin ladattiin yhteensä 531 kWh ja niistä purettiin 479 kWh energiaa. Tämän lisäksi ulkoiseen verkkoon syötettiin yhteensä 17.2 kWh energiaa, johtuen akustojen latauksen rajoitteista.



Kuva 18 Kaikkien nostureiden akustoenergia esitettynä yhdellä kuvaajalla. Kuvasta havaitaan, että akustoihin on tuotettu enemmän energiaa kuin niistä on käytetty.

Yhteenvetona nosturikohtaiset akustot pienensivät terminaalin kokonaiskulutusta 7,9 % ja huipputehojen aikaista kulutusta 23 %. Taulukosta 4 havaitaan että 96,9 % kaikesta regeneroidusta energiasta on ladattu akustoihin ja 3,1 % energiasta on syötetty verkkoon.

Taulukko 4 Terminaalin energiataseet nosturikohtaisilla akustoilla

Kokonaiskulutus	6065 kWh
Verkosta otettu energia	5586 kWh (92.1 %)
Akustoista otettu energia	479 kWh (7.9 %)
Regenerointi	548 kWh
Verkkoon syötetty energia	17.2 kWh (3.1 %)
Akustoihin ladattu energia	531 kWh (96.9 %)

Taulukossa 5 esitetään nosturikohtaisten alustojen simuloinnin yhteenveto.

Taulukko 5 Nosturikohtaisten akustojen simuloinnin yhteenveto

Simulaation kesto	11072.0 s
Maksimiteho	4443 kW
Keskiteho	1811 kW
Tehon standardipoikkeama	875 kW
Huipputehon suhde keskitehoon (Peak-to-Average Ratio, PAR)	2.45

3.4 Energian talteenotto lohkokohtaiseen akustoon

Yksittäisten nosturien akustojen täyttyessä voidaan energiaa ottaa talteen useasta nosturista koostuvan lohkon yhteiseen keskitettyyn akustoon. Lohkokohtainen akusto voisi tässä tapauksessa palvella esimerkiksi 4–6 nosturia, jotka työskentelevät lähekkäisissä konttilohkoissa. Nosturikohtaisista akkuja tarvittaisiin silti sellaisissa tilanteissa, missä pääenergialähdettä, kuten kaapelikelaa, ei voida käyttää, ja muuta energiavarastoa tai tuotantotapaa ei ole saatavilla. Tällainen tilanne on esimerkiksi nosturin siirto blokista toiseen tai huoltotilanne. Siksi lohkokohtaisia akustoja voidaankin pitää parempana ratkaisuna muille nosturityypeille kuten RMG, jotka liikkuvat raiteilla vain yksittäisessä konttilohkossa.

Keskitettyä akustoa voitaisiin tosin käyttää myös nostureissa, joissa on regeneratiivinen jarrutus, mutta ei lainkaan akkua, jos nosturissa on hybridijärjestelmänä esimerkiksi

dieselgeneraattori nosturin liikuttelua varten. Koska nosturia liikutellaan pois blokista verrannollisen harvoin, olisi mahdollista käyttää samaa dieselgeneraattoria tai liikuteltavaa akustoa useammalle nosturille. Näin voitaisiin yksittäisten nosturien kustannuksissa säästää kalliiden akustojen hankinnassa.

Keskitetty akusto mahdollistaisi energian tehokkaamman hallinnan tasapainottamaan latausta ja purkua dynaamisesti koko sataman tarpeiden mukaan. Tämä voi vähentää kokonaisenergiankulutusta, optimoida latausinfrastruktuuria ja mahdollistaa uusiutuvan energian integroinnin nykyistä suuremmassa mittakaavassa. Lisäksi keskitetyn järjestelmän avulla voidaan mahdollisesti vähentää ylläpitokustannuksia ja parantaa järjestelmän luotettavuutta. Kuitenkin tällaisen ratkaisun toteutettavuus riippuu monista tekijöistä, kuten alueellisesta energiainfrastruktuurista, investointikustannuksista ja sataman erityisistä operatiivisista vaatimuksista.

Blokkikohtainen keskitetty akusto voisi olla varteenotettava vaihtoehto etenkin sellaisille nosturityypeille, jotka on suunniteltu syötettäviksi pääasiassa kaapelikelalla ja blokista siirroissa tai huoltotilanteissa akustolla. Blokkikohtainen keskitetty akusto voi olla sen mallinen, että se voidaan asentaa siirtotapauksissa nosturin rungolle ja täten käyttää yksittäistä akkua huoltotilanteissa nostureiden siirtoon ja normaalikäytössä useamman nosturin energian talteenottoon.

Nykyisin jo käytössä olevien tyyppisen nosturin rungolle nostettavan akun käyttö useamman nosturin potentiaalienergian varastointiin mahdollistaisi regeneratiivisen energian talteenoton usealta nosturilta. Yhtä akustoa voitaisiin käyttää esimerkiksi kahden tai kolmen blokin nosturien energiavarastona, jolloin yksittäinen akusto palvelisi kuutta nosturia.

Yksittäisen akuston käyttö usean nosturin jatkuvaan tarpeeseen luo akustolle kuitenkin enemmän käyttöä, joka voi vaikuttaa akuston kestävyyteen ja elinikään. On kuitenkin tärkeää arvioida huolellisesti investointikustannuksia, infrastruktuurin vaatimuksia ja sataman operatiivisia tarpeita.

Keskitetty akusto vaatii nostureilta verkkovaihtosuuntaajaa (Active Front End, AFE), joka mahdollistaa sähköenergian tehokkaamman hallinnan ja takaisinsyötön nosturilta terminaalin sähköverkon suuntaan. Keskitetyn akuston ongelmana ovat useat AC-DC-AC muunnokset energiaketjussa ja muunnoksista sekä akuston käytöstä johtuvat häviöt.

Esimerkkitapauksia, joissa lohkoakusto voi olla hyödyllinen:

- Terminaali, jossa useat nosturit työskentelevät pysyvästi tietyissä konttilohkoissa ilman tarvetta konttilohkojen väliseen liikkumiseen, esimerkiksi RMG terminaali.
- Tilanne, jossa regeneroitua energiaa syntyy epäsäännöllisesti, mutta yhteinen akusto mahdollistaa energian hyödyntämisen esimerkiksi viiveellä.
- Tilanne, jossa nosturikohtaisille akustoille ei ole tilaa, mutta keskitetylle akustolle on tilaa konttilohkon läheisyydessä.
- Terminaali, jossa on regenerointiin kykeneviä nostureita, mutta nostureihin ei ole mahdollista asentaa akustoja. Esimerkiksi jälkiasennus projekti, jossa nykyaikaistetaan olemassa olevia nostureita ja infrastruktuuria, mutta nosturin rungolla ei ole tilaa akustolle.

3.4.1 Simulointi

Lohkokohtaisen akuston simulointia varten on simulointiohjelmaan rakennettu toiminto, jolla voidaan tarkkailla yksittäisen suuremman akuston toimintaa terminaalissa. Akusto on määritelty kapasiteetiltaan terminaalin nostureiden määrän mukaan, samoin akuston lataus- ja purkauskapasiteetti on kasvatettu niin että sillä voidaan kuvata terminaalissa sijaitsevia akustoja.

Terminaalikohtaiseksi tehorajaksi, jonka ylittyessä akustoa priorisoidaan, on määritelty 4300 kW:iin. Akuston kapasiteetti Q_{tot} määräytyy kokemusperäisesti nosturikohtaisten akustojen kapasiteetin Q_{RMG} ja nosturien lukumäärän N_{RMG} mukaan seuraavasti:

$$Q_{\mathrm{tot}} = 0{,}4 N_{\mathrm{RMG}}\, Q_{\mathrm{RMG}}\,, \tag{2}$$

$$Q_{\mathrm{tot}} = 0{,}4 \times 40 \times 296\ \mathrm{kWh} = 4736\ \mathrm{kWh}.$$

Akustojen purkaus ja lataustehot P_{tot} on myös määritelty nostureiden määrän mukaan:

$$P_{\mathrm{tot}} = 0{,}4 N_{\mathrm{RMG}} P_{\mathrm{RTG}}, \quad (3)$$

$$P_{\mathrm{tot}} = 0{,}4 N_{\mathrm{RMG}} \times 40 \times 300\ \mathrm{kW} = 4800\ \mathrm{kW}.$$

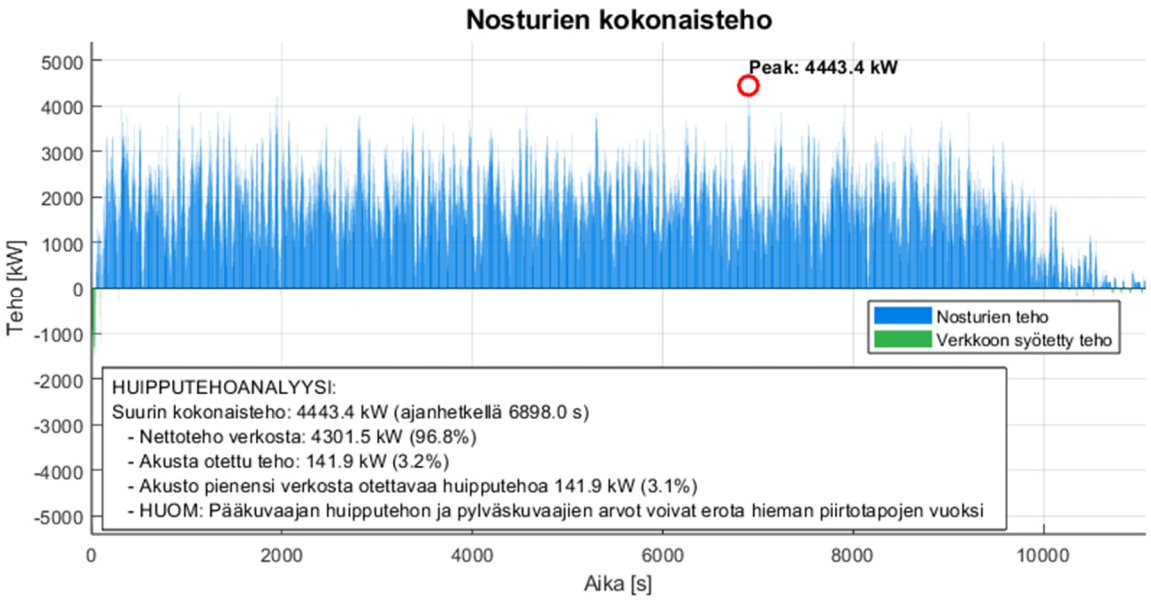
Tähän työhön tehdyllä simulaattorilla ei määritelty rajoitteita sille, mikä nosturi voi akustosta ottaa energiaa. Tarkempi analyysi konttilohkokohtaisista tai esimerkiksi pelkästään tietyille kolmelle konttilohkolle varatusta akustosta vaatisi lisää tutkimusta.

Konttiterminaalin tehonjakauma pysyy terminaaliakkua käytettäessä samana kuin vertailusimuloinnissa. Kokonaiskulutus, huipputeho, ja huipputehon suhde keskitehoon PAR pysyvät myös samana.

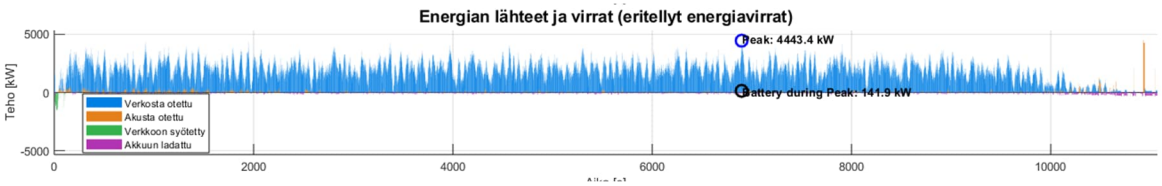
Simulaatiossa on ajettu terminaaliakustolla kaksi eri testiä. Ensimmäisessä testissä on käytetty nosturikohtaista tehorajaa, jolloin akusto otetaan käyttöön koko terminaalin pääjännitelähteenä. Tämä raja on pidetty samana kuin nosturikohtaisilla akustoilla ajettaessa, eli 430 kW. Tämä tarkoittaa sitä, että kun yksittäinen nosturi on huippukuormassaan, syötetään koko terminaalia akustolta.

Tällaisilla parametreilla on saavutettu huipputehon (4443 kW) aikaan yhteensä 142 kW syöttöteho akustolta. Tämä tarkoittaa huipputehon kannalta 3,1 % pienempää kuormaa terminaalille, kuvat 19–21.

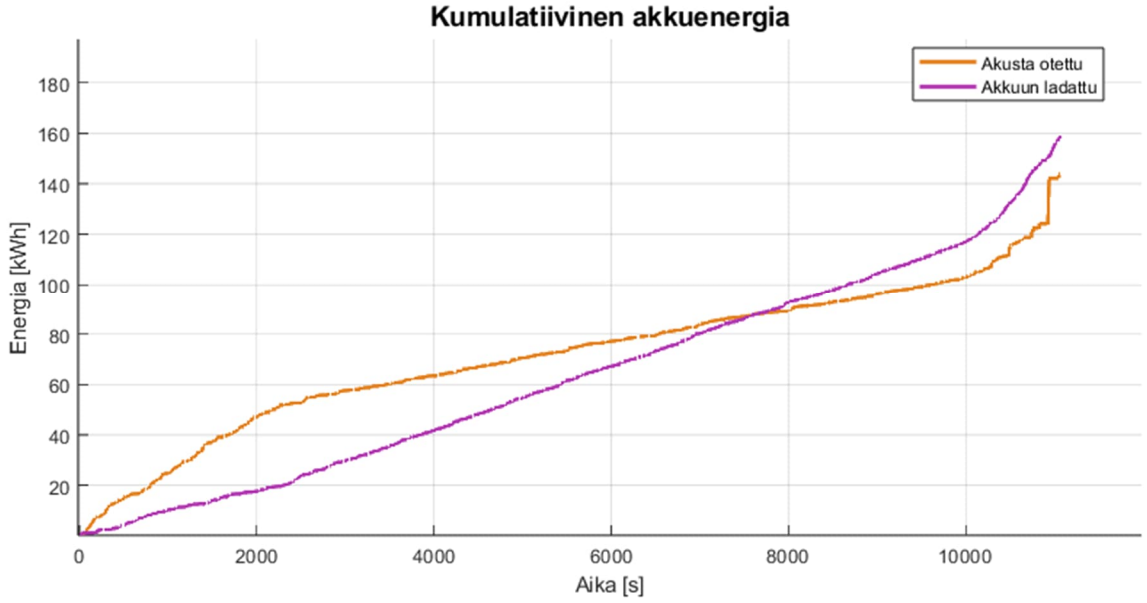
Kymmentä suurinta huipputehoa tarkkaillessa on terminaaliakustosta saatu nosturikohtaisella tehorajalla ajettaessa 4,3 % tehosta.



Kuva 19 Nosturien kokonaisteho nosturikohtaisia rajoja käyttäen.



Kuva 20 Koko terminaalin energiavirrat nosturikohtaisia rajoja käyttäen.



Kuva 21 Terminaaliakuston kumulatiivinen energia, nosturikohtaisia rajoja käyttäen

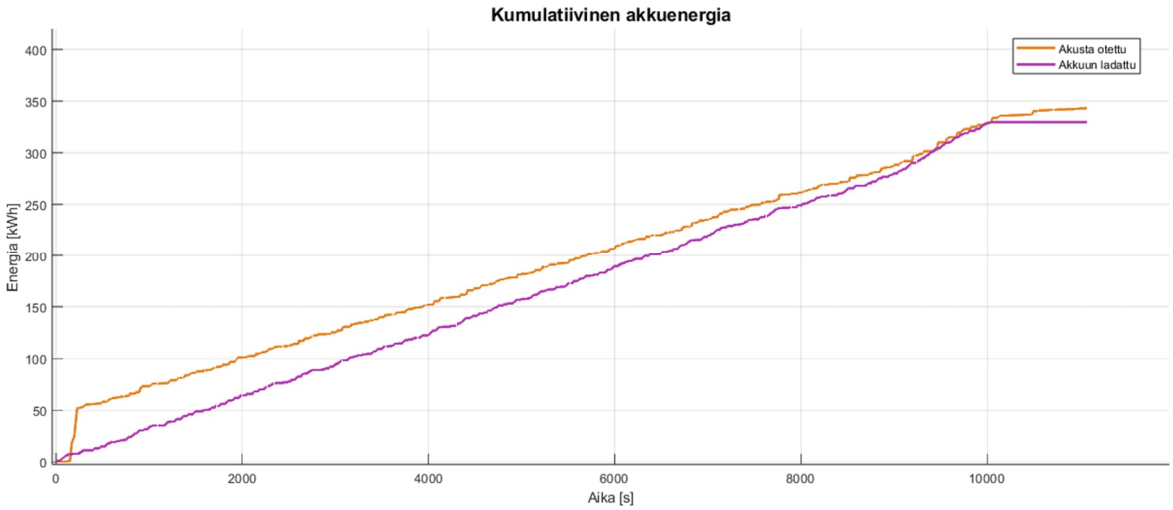
Jos terminaaliakkua käytetään nosturikohtaisten rajojen sijaan terminaalikohtaisella tehorajalla, esimerkiksi yhteisrajalla 4300 kW, saadaan tuloksista erilaisia. Tällainen tilanne tarkoittaa sitä, että terminaaliakut syöttävät kaikkia nostureita vain, jos koko terminaalin tehoraja ylittyy, sen sijaan että käytettäisiin nosturikohtaista rajaa.

Tässä tilanteessa saadaan terminaalin tehonkulutusta huomattavasti pienemmäksi, kuva 22.

Kuva 22 Koko terminaalin energiavirrat terminaalikohtaista rajaa käyttäen.

Huipputehoanalyysista saadaan selville, että terminaalikohtaista rajaa käyttämällä, saadaan akustoa pääjännitelähteenä käyttämällä huipputehoa pienennettyä 29,4 %. Samoin kymmentä suurinta huipputehoa saadaan pienennettyä 24,3 %. Akustoon ladattu energia on myös hyvin tasoissa akustosta käytetyn energian kanssa. Hieman paremmalla säädöllä saataisiin akuston käyttämän ja lataaman energian suhde tasoihin. Kuvaajassa 23 on esitetty terminaaliakun kumulatiivinen akkuenergia. Alussa näkyvä korkea hyppäys akustosta otetussa energiassa selittyy pitkälti käytetyistä parametreista. Simulaation asetuksien mukaisesti akuston varaus on alussa 80 %, ja akustoa priorisoidaan suuremmalla todennäköisyydellä, kun akuston varaus on korkealla. Tämän jälkeen akustoon kuitenkin ladataan enemmän energiaa kuin sieltä käytetään akuston menemättä koskaan alle 50 % varauksen.

Akustoa on myös mahdollista ladata, kun terminaalin yhteisteho on alle määritellyn rajan, jolloin terminaalin kokonaiskuormaa voidaan tasoittaa ja PAR arvoa pienentää. Simuloinnissa on havaittavissa, että koko simulaatiokierron aikana esiintyy useita hetkiä, kun koko terminaalin teho on esimerkiksi alle 3000 kW yli minuutin ajan. Tällaisina aikoina akustoa voitaisiin ladata, jotta akustossa olisi enemmän energiaa huipputehojen paikkaamiseen. Näin koko terminaaliin kohdistuva ulkoisen energian tarve saataisiin tasoitettua ja PAR arvo lähemmäs yhtä (1). Tämä tarkoittaisi terminaalin kannalta, että mahdollisiin huipputehoihin pohjautuva energian hinnoittelu saataisiin kestävämmälle tasolle. Nopeat lataushetket tai ikkunat, joissa akkua voidaan ladata, voivat kuitenkin vaatia toisenlaista energian talteenottojärjestelmää, kuten superkondensaattoria tai vauhtipyörää. Muut energian talteenottojärjestelmät kuin akustot, on kuitenkin rajattu tämän työn ulkopuolelle.



Kuva 23 Terminaaliakun kumulatiivinen energia, terminaalikohtaista tehorajaa käytettäessä. Kuvasta havaitaan, että alun piikkiä lukuun ottamatta, akustoihin on ladattu enemmän energiaa kuin niistä on käytetty.

Taulukkoon 6 on koottu vertailutuloksia eri järjestelmien simulaatioista.

Taulukko 6 Simulaatiotulosten vertailu

Simulaatiotyyppi	***Kokonaiskulutus* (kWh)**	***Kulutus akustosta* (kWh)**	***Huipputeho verkosta* (kW)**	***PAR-arvo***	***Vaikutus huipputehoon* (%)**	***Vaikutus energiankulutukseen* (%)**
Vertailu, ilman akustoa	5569	0	4443	2.45	0	0
Nosturikohtainen akusto	5569	440	3259	2.45	26.7 %	7.9 %
Lohkokohtainen akusto	5569	323	2591	2.45	29.4 %	5.8 %

Tuloksista havaitaan, että lohkokohtainen akusto saavuttaa parhaimmillaan lähes saman kokonaiskulutuksen ja akuston käyttöasteen kuin nosturikohtainen ratkaisu. Huipputeho laskee 29,4

%, mikä on hieman parempi kuin nosturikohtaisella akustolla (26,7 %). Suurempi kokonaiskulutus selittyy osittain muunnoksissa ja siirroissa esiintyvällä häviöllä.

3.4.2 Kustannukset

Terminaaliakkujen vaatima pienempi kapasiteetti huomioon ottaen voi akustojen hankintahinta olla pienempi kuin yksittäisillä nostureissa sijaitsevilla akustoilla. Tämä vähentäisi olennaisesti itse nostureiden hintaa ja siirtäisi mahdollisesti kustannuksia nosturivalmistajalta terminaalille. Akustojen vaatima tila on kuitenkin pois terminaalin varastointi- ja operointitilasta, mutta tälle ei voida tässä työssä määrittää hintaa. Akustot voitaisiin mahdollisesti sijoittaa itse konttilohkoihin, jolloin käytetty tila pienenisi, jos esimerkiksi akkuhuone rakennettaisiin niin, että sen päälle voi pinota kontteja. Akustojen vaatima huoltoaika siirtyisi myös tässä tapauksessa pois nostureiden huoltoajasta. Akustojen huolto voitaisiin siis tehdä nostureiden operaatiota keskeyttämättä. Koska jotkin RTG nosturit vaativat nosturikohtaisia akustoja lohkoista siirtymiseen, ei pelkkä lohkokohtainen akusto ole tällaisille nostureille kuitenkaan riittävä ratkaisu. Lohkokohtaisia akustoja voitaisiin kuitenkin pitää tällaisten nostureiden kanssa nosturikohtaisen akuston rinnalla. Lisäksi lohkokohtaiset akustot voivat olla merkittävämpiä muille nostureille, kuten RMG-nostureille, jotka eivät liiku lohkojen välillä.

3.4.3 Energian kustannussäästöt

Kaiken kaikkiaan energian kustannussäästöt ovat hyvin samankaltaisia kuin nosturikohtaisia akustoja käytettäessä. Pienempi akustokapasiteetti tarkoittaa kuitenkin, että akustoja ei tarvita niin monta kuin nosturikohtaisia akustoja käytettäessä.

3.4.4 Hyödyt ja haitat

Hyödyt:

- Mahdollistaa energian jakamisen usean nosturin välillä.
- Alentaa nosturikohtaisia investointikustannuksia.
- Huolto voidaan toteuttaa ilman käyttökatkoja nostureissa.
- Mahdollistaa suuremman lataus- ja purkutehon dynaamisen hallinnan.

Haitat:

- Akuston siirto siirtotilanteisiin ei aina ole mahdollinen → tarvitaan rinnalle nosturikohtainen ratkaisu.
- Lisää kaapelointia ja ohjauslogiikkaa: tarvitaan automaatiota priorisointiin.
- Akustojen sijoittelu konttialueella voi vaatia rakenteellisia muutoksia.

3.5 Energian talteenotto verkkoon

Energian talteenotto suoraan terminaalia syöttävään verkkoon, käytännössä energian myynti verkkoon. Jos terminaalilla on muuttuva sähkön hinta, voidaan halvan sähkön hinnan aikana tuotettua energiaa myydä takaisin verkkoon.

Kuten kohdassa 3.1.1. on havaittavissa, on verkkoon syötetyn energian määrä kuitenkin hyvin pieni, jos terminaalissa on useita nostureita. Eri aikaan ja erisuuntaisilla tehoilla samanaikaisesti tehtävät liikkeet tasaavat verkon kulutusta niin ettei energian syöttäminen verkkoon ole merkittävää. Energian talteenottoa verkkoon tai regeneroidun energian myymistä voidaan pitää siis tämän työn osalta lähes merkityksettömänä.

3.5.1 Energian talteenoton haitat

Haittana tuotetun energian myymisessä on myynnin vähäinen määrä ja siitä tulevat vähäiset tuotot. Vielä suurempana haittana on menetetty energiakapasiteetti, jota voitaisiin käyttää

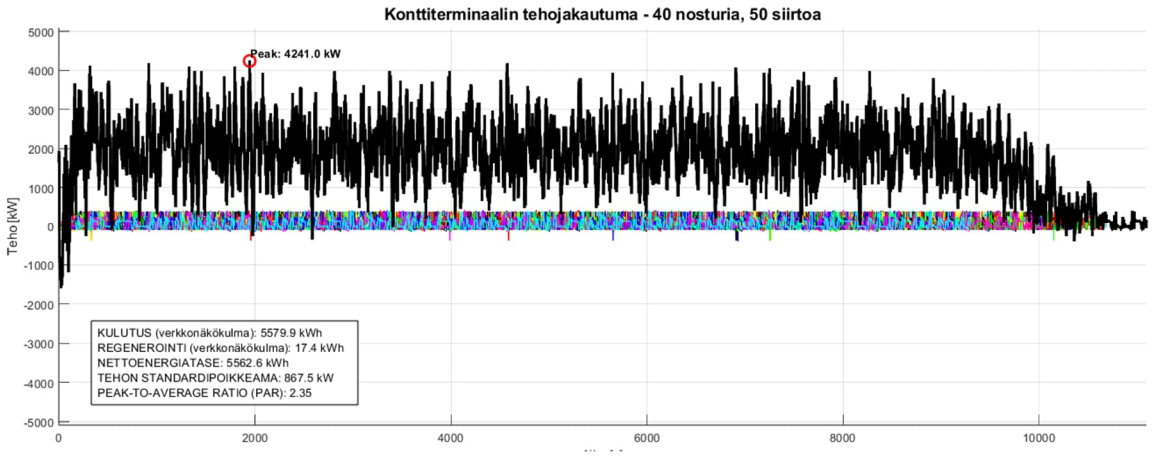
tasaamaan terminaalilla esiintyviä tehohuippuja, kun sähkön hinta on korkeammalla kuin myyntihinta.

3.6 Hidastetut liikkeet hyötysuhteiden varmentamiseksi kiireettömissä nostoissa

Simulaattorissa on mahdollisuus määritellä terminaalille tehoraja, jonka ylittyessä nosturit tai nosturi käyttävät hidastettuja liikkeitä, Vertailua varten on valittu tehorajaksi 3900 kW ja maksimaaliseksi hidastukseksi 10 % moottoreiden nopeudesta. Näillä parametreilla saavutetaan simulaation kokonaiskestoksi hieman vertailuarvoa suurempi 11093 sekuntia, eli hieman alle 185 minuuttia.

Siirtonopeudeksi saadaan siis 3,69 siirtoa tunnissa, mikä ei poikkea vertailuarvosta. PAR arvoa on hidastuksilla saatu pudotettua 2.35:een, ja tehohuippua 4241 kW:iin. Tehohuippu pieneni siis 4,5 % vaikka kaikkien nostureiden käyttämä kokonaisaika pidentyi vain 21 sekuntia, tai 0,002 %.

Kuva 24 esittää tehon käytöstä, kun toimintoja hidastetaan hallitusti.



Kuva 24 Terminaalin tehonjakauma 10 % maksimihidastuksia käyttäen.

3.6.1 Kustannukset

Liikkeiden hidastuksella voi olla terminaalin kannalta merkittävimpänä kustannuksena ja rajoitteena hidastuksista johtuva liikkeiden keston venyminen. Jotta liikkeiden hidastuksesta saataisiin merkittävää hyötyä energiatehokkuuden kannalta, täytyy hidastuksia tehdä usein, joka aiheuttaa myös hitaampaa terminaalin toimintaa. Jos kuitenkin toimitaan terminaalissa, jossa ei joko hetkellisesti ole kiireistä, tai jossa ei yleisesti ole ruuhkaa, voidaan hidastuksilla saada sekä energian kulutusta että tehohuippuja pienennettyä. Simuloinnilla on osoitettu, että pienellä liikkeiden hidastuksella ja oikealla raja-arvojen määrittelyllä koska hidastuksia käytetään, voidaan terminaalin yhteistehoa ja huippukuormaa pienentää kuitenkin merkityksellisesti, ilman vaikutusta terminaalin toimintaan. Simulointitapauksessa terminaalin huipputehoa pienennettiin 4,5 %, ilman että terminaalin ja nostureiden toiminta hidastui lähes ollenkaan.

3.6.2 Energian kustannussäästöt

Simulointituloksia tarkastelemalla voidaan havaita, että liikkeitä hidastamalla voidaan energiankulutusta pienentää merkittävästi.

3.6.3 Simulointi

Simulointiin on valittu testaamalla hyväksi havaittu asetus, jossa liikkeitä hidastetaan maksimissaan 10 % jos koko terminaalin hetkellinen huipputeho on ylittämässä 3900 kW.

Näillä asetuksilla on saatu verkosta otettavan energian kulutus (taulukko 7) pudotettua vertailuarvosta 4443 kW, 4241 kW:iin, ja keskiteho pudotettua arvosta 1811 kW, 1805 kW:iin.

Taulukko 7 Hidastettujen liikkeiden simuloinnin yhteenveto

Simulaation kesto	11093 s
Maksimiteho	4241 kW
Kokonaiskulutus	5580 kWh
Keskiteho	1805 kW
Tehon standardipoikkeama	868 kW
Regenerointi	17.4 kWh
Peak-to-Average Ratio (PAR)	2.35

3.7 Kulutuksen ja käytön ennustaminen ja tasaaminen

RTG nosturien kuormanennustuksesta on tehty kirjoittajan tietojen mukaan verrattain vähän tutkimusta. Vaikka kuormanennustuksesta on tehty paljon tutkimusta muihin järjestelmiin liittyen, on se nosturitoiminnassa rajoitetumpaa ja monimutkaisempaa verrattuna tyypillisiin jakelukuormiin. Kuormanennustuksen haasteet voidaan jakaa lyhyesti kolmeen tekijään.

1. Historiallisista kuormatiedoista ei ole tarpeeksi selkeitä kausiluonteisia trendejä tai kuvioita.
2. Korrelaation ulkopuoliset arvot eksogeenisten muuttujien ja nosturin kysynnän välillä johtuvat inhimillisistä tekijöistä.
3. Vaihteleva ja epätasainen kuormakäyttäytyminen erityisesti matalien kuorma-arvojen osalta.

Yhtenä tärkeimpänä tekijänä toimivan kuormanennustuksen hallintaan vaikuttaisi olevan konttien painojen mahdollisimman tarkka kirjaaminen ennen niiden siirtämistä, mitä SOLAS-vaatimuksia noudattavat satamat tekevät. [2] Terminaalien operointijärjestelmän (TOS) tulisi välittää nostettavien konttien painot mahdollisimman tarkasti nostureiden operointijärjestelmälle (CMS) jotta konttien paino voitaisiin huomioida nostojen yhteydessä tarkasti.

Koska kuormien ennustettavuus ei ole tarkkaa, tai toisin sanoen ennusteet harvoin käyvät täysin toteen, tulisi energiavirtojen ja akkukapasiteettien hallintaan käyttää mahdollisuuksien mukaan sumeaa säätöä (Fuzzy control).

3.8 Optimoidut liikkeet

Liikkeiden optimoinnilla voidaan STS nostureilla saavuttaa jopa 38 % nopeampia liikkeitä ja vähentää energiakulutusta 36 % verrattuna ei optimaalisiin käyttösuhteisiin. Voidaan siis todeta, että liikkeiden optimointimenetelmä tarjoaa merkittäviä parannuksia satamanostureiden tehokkuudessa ja energiankäytössä. [1]

Optimoituja liikkeitä ei kuitenkaan tähän työhän rakennetulla simulaatiolla voitu ajan puutteessa testaamaan. Simulaatiomallia voidaan tulevaisuudessa muuttaa, niin että jokaiselle nostolle käytetään joko terminaalin kokonaistehon tai nosturin hetkittäisen tehon mukaisesti optimaalisia moottorinopeuksia.

4 Toimenpiteitä energiatehokkuuden parantamiseen

Simulointitulosten mukaisesti energiakustannuksiin saataisiin suurimpia säästöjä akustojen käyttölogiikkaa parantamalla. Lisäksi liikkeiden hidastuksilla ja viivästyksillä voidaan saavuttaa joidenkin prosenttien energiasäästöjä, etenkin huipputehoja pienentämällä, ilman merkittäviä vaikutuksia terminaalin toimintaan. Parhaaksi toimenpiteeksi on kuitenkin paljastunut akustojen säädelty käyttö huippukuormien tasaamiseen. Nosturikohtaisia akustoja huippukuormien aikana käyttämällä, saadaan terminaalin kuluttama energia huomattavasti pienemmäksi. Akustojen avulla voidaan myös pienentää PAR arvoa, jolloin terminaalin teho lähenee vakiota. Oikealla parametrisoinnilla voidaan myös taata, että nostureiden akustojen varaus pysyy pidemmällä aikajaksolla tarkkailtuna tasaisena. Tämä kuormittaa kuitenkin akustoja, mutta akustojen kuormituksen vaikutuksia ei tässä työssä tarkkailla ja se vaatii lisätutkimusta. Akustojen sijaan jatkuvalle latauksella sopivampi ESS voi olla joko vauhtipyörä tai superkondensaattoreihin perustuva järjestelmä.

Taulukossa 8 on koottu eri toimenpiteiden vaikutus energiatehokkuuteen. Tuloksista voidaan havaita seuraavia huomioita:

- Viivästyksillä ei saavuteta verkosta otetun energian säästöä, vain huipputehon pienennystä.
- Nosturikohtaisilla akustoilla saadaan verkosta otettu huipputeho pienemmäksi käytön aikana. Kokonaisteho pysyy kuitenkin samana, sillä akustot pienentävät vain verkon kuormaa.

Tärkeimmät havainnot:

- Paras huipputehon muutos: Terminaaliakku (–29,4 %)
- Paras energiansäästö: Nosturikohtaiset akustot (8,6 %)
- Paras PAR-arvo: Hidastetut liikkeet (2,35)
- Helpoin toteutus: Hidastetut liikkeet eivät vaadi investointeja laitteisiin.

Taulukko 8 Eri energiansäästötoimenpiteiden vaikutukset

Skenaario	Terminaalin huipputeho (kW)	PAR	Terminaalin keskiteho (kW)	Energia verkosta (kWh)	Vaikutus huipputehoon (%)	Vaikutus energiankulutukseen (%)
Vertailu	4443	2,45	1811	5569		
Yhtäaikaiset vastakkaistehoiset käytöt	4340	2,40	1811	5569	–2,3	0
Nosturikohtaiset akustot	3259	2,45	1810,8	5091	–26,7	–8,6
Terminaaliakku	3138	2,45	1811	5246	–29,4	–5,8
Hidastetut liikkeet	4241	2,35	1805,2	5563	–4,5	–0,1

5 Johtopäätökset

Tämä diplomityö tutki kumipyöräkonttinostureiden energiatehokkuuden parantamista konttiterminaalin kokonaisnäkökulmasta. Työssä kehitetty MATLAB-pohjainen simulaatiomalli mahdollisti 40 nosturin samanaikaisen toiminnan analysoinnin erilaisissa energianhallintaskenaarioissa. Simuloinnit osoittivat, että merkittäviä energiasäästöjä ja huipputehojen pienennyksiä voidaan saavuttaa koordinoiduilla terminaalitason ratkaisuilla ilman, että nostureiden operatiivinen tehokkuus kärsii. Työssä analysoitiin erilaisia energiantehokkuustoimenpiteitä ja ratkaisuja, joista osa rajattiin työn ulkopuolelle ja osalle luotiin oma simulaatioskenaario, jonka tuloksia vertailtiin referenssitapaukseen, jossa ei käytetty energiantehokkuuden parannuskeinoja.

Tutkimustulokset vahvistavat, että energiatehokkuuden parantaminen vaatii järjestelmätason lähestymistapaa, jossa yksittäisten nostureiden optimoinnin sijaan keskitytään koko terminaalin energiavirtojen hallintaan. Erityisesti akustopohjaisten ratkaisujen ja älykkään liikkeiden hallinnan yhdistelmä tarjoaa lupaavia mahdollisuuksia sekä energiakustannusten vähentämiseen että ympäristövaikutusten pienentämiseen konttinostureita käytettäessä.

5.1 Työn tulokset

Simulointitulosten perusteella merkittävimmät vaikutukset terminaalin kokonaisenergiatehokkuuteen ja sähkönsyötön huipputehoihin saavutettiin seuraavilla toimenpiteillä:

- Nosturikohtaiset akustot vähensivät terminaaliverkosta otettavaa energiaa noin 8 %, vaikka huipputeho pysyi lähes samana kuin referenssissä. Akustoihin saatiin ladattua talteen jopa 97 % regeneroidusta energiasta.
- Terminaaliakusto mahdollisti regeneroidun energian tehokkaamman hyödyntämisen, ja laski huipputehoa merkittävästi. Terminaaliakuston havaittiin olevan jokseenkin varteenotettava ratkaisu nostureista ja terminaalista riippuen. Terminaaliakuston kustannussäästöt vaativat silti lisää tutkimusta.
- Hidastetut liikkeet osoittautuivat toimivaksi tavaksi pienentää hetkittäisiä tehopiikkejä jopa 4.5 % ilman että siirtonopeudet tai tehtävämäärät kärsivät.

Hidastetut liikkeet paransivat myös PAR-arvoa merkittävästä ja ovat pienimmällä lisätyöllä saavutettava ja siten kustannuksiltaan pienin ratkaisu terminaalin energiatehokkuuden ja huipputehojen parantamiseen.

- Vastakkaistehoisten liikkeiden ajoittaminen ja energian reitittäminen nosturien välillä edellyttävät AFE-laitteistoa ja älykästä ohjausta, mutta tarjoaa potentiaalia merkittäviin säästöihin tulevaisuudessa.
- Kulutuksen seuranta ja ennustaminen mahdollistavat tehokkaan ohjauksen ja tukevat muiden ratkaisuiden hyödyntämistä, mutteivat yksinään tuo merkittävää säästöä.

Simulointitapausten perusteella on myös havaittavissa, että tarkasteltavan terminaalin koko ja nosturimäärä vaikuttavat merkittävästi siihen, miten tasaisesti terminaalin kuormitus jakaantuu. Suuremmissa järjestelmissä huipputehojen suhteellinen vaikutus ja PAR-arvo pienenee luonnostaan, mutta ohjatuilla toimenpiteissä voidaan saada merkittävää optimointia.

5.2 Tulevaisuus

Tulevaisuudessa terminaalinostureiden energiantehokkuutta voidaan parantaa entisestään yhdistelemällä useita tässä työssä käsiteltyjä ratkaisuja. Erityisesti hybridimalliset nosturit, joissa on käytössä sekä akusto, että älykästä ohjausta (esimerkiksi CMS-ohjattu ajastettu nostojen ajoitus), voivat tarjota mahdollisuuksia parempaan kuormanhallintaan, hyödyntää energiaa tehokkaammin, ja vähentää riippuvuutta sähköverkosta, sekä pienentää huipputehojen tuomaa lisäkustannusta energian hinnassa.

Lisää tutkimusta voidaan työn perusteella kohdistaa muun muassa seuraavasti:

- Energianhallintajärjestelmien dynaamiseen optimointiin reaaliaikaisella datalla.
- Akustojen käytön vaikutus niiden elinkaareen (esimerkiksi kapasiteetin heikkeneminen, kun akustoja käytetään huipputehojen aikana tai paljon energiaa vaativien nostojen aikana useammin)

- Koko terminaaliverkon THD-tarkasteluun, kun useita nostureita syötetään samasta verkosta ja nosturit regeneroivat energiaa verkkoon.
- Investointi- ja takaisinmaksulaskelmiin yksittäisiä tai useampia energiatehokkuusratkaisuja käytettäessä.

Kokonaisuudessaan työ osoitti, että terminaalinostureiden energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa merkittävästi jo nykytekniikalla, kun ratkaisuja tarkastellaan terminaalin tasolla ja toteutetaan koordinoidusti. Työ osoittaa myös, että pienellä kustannuksella voidaan nostureiden siirto- ja nostonopeuksia hallitsemalla parantaa terminaalin energiantehokkuutta, ilman uusia laiteinvestointeja.

5.3 Työn rajoitteet ja jatkotutkimustarpeet

Tämän työn simulointimalli keskittyi teknisiin energiatehokkuusratkaisuihin, mutta jätti ulkopuolelle myös tärkeitä näkökulmia:

Taloudelliset tekijät:

- Eri akustovaihtoehtojen tarkat investointi- ja takaisinmaksulaskelmat
- Energian hinnanvaihtelun vaikutus akustojen kannattavuuteen
- Huoltokustannusten vertailu eri ratkaisujen välillä

Tekniset rajoitteet:

- Akustojen elinkaaren ja kapasiteetin heikkenemisen vaikutukset
- Harmonisten säröjen (THD) vaikutus sähköverkkoon
- Ympäristöolosuhteiden (lämpötila, kosteus) vaikutus akustojen toimintaan

Operatiiviset näkökohdat:

- Terminaalin liikennevirtojen satunnaisuuden vaikutus
- Nostureiden huolto- ja vikatilanteet

5.4 Suositukset terminaalioperaattoreille

Lyhyen aikavälin toimenpiteet:

1. Hidastettujen liikkeiden käyttöönotto – ei vaadi suuria laiteinvestointeja
2. Nosturien operointiprofiilien analysointi energiatehokkuuden optimoimiseksi
3. Konttien painotietojen tarkkuuden parantaminen kuormanennustusta varten

Keskipitkän aikavälin toimenpiteet:

1. Nosturikohtaisten akustojen pilottikokeilu valituilla nostureilla – akustojen käyttö huippukuormien aikana
2. Energianhallintajärjestelmän kehittäminen

Pitkän aikavälin toimenpiteet:

1. Terminaalikohtaisen energiavarastointijärjestelmän harkinta
2. Uusiutuvan energian integrointi akustojen lataukseen
3. Täysin autonomisten energianhallinnan ratkaisujen käyttöönotto

Lähteet

1. Rofhiwa Lutendo, Edward Takalani, Lesedi Masisi. (2021). "Optimal Load-Handling Trajectory for Port Cranes: Minimizing Cycle Time and Energy Consumption Using Particle Swarm Optimization". Energies, 16(7172). DOI: https://doi.org/10.3390/en16207172

2. Alasali, F., Haben, S., Becerra, V., & Holderbaum, W. (2018). Day-ahead industrial load forecasting for electric RTG cranes. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 6, 223-234. Day-ahead industrial load forecasting for electric RTG cranes

3. S. Pietrosanti, I. Harrison, A. Luque, W. Holderbaum, and V. M. Becerra, "Net Energy Savings in Rubber Tyred Gantry Cranes Equipped with an Active Front End," in Proceedings of the IEEE, 2016, doi: 978-1-5090-2320-2/16/$31.00 ©2016 IEEE.

4. Konecranes Battery RTG (B-RTG), https://www.konecranes.com/system/files/2024-03/7575_rtg_technical_document_new_brand_v2.pdf#:~:text=222KWH%20CAPACITY%2C%20SECOND%20TYPE%20IS,RTG%20work%20loadsisältö.