

# DIPLOMITYÖ

Jussi Karhunen

**LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO**

Sähkötekniikan osasto

**DIPLOMITYÖ**

**NOSTURIN TEHONSYÖTTÖ RINNANKYTKETYILLÄ VERKKOVAIHTOSUUNTAAJILLA**

Diplomityön aihe on hyväksytty sähkötekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa 12.10.2005.

Työn tarkastajat:                      Professori Juha Pyrhönen

DI Janne Martin

Työn ohjaaja:                            DI Juha Santala

Hyvinkäällä 23.8.2006

Jussi Karhunen

Puistokaari 7 A 5

00200 Helsinki

## TIIVISTELMÄ

**Tekijä:** Jussi Karhunen

**Työn nimi:** Nosturin tehonsyöttö rinnankytketyillä verkkovaihtosuuntaajilla

**Osasto:** Sähkötekniikka

**Vuosi:** 2006

**Paikka:** Lappeenranta

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 82 sivua, 58 kuvaa 11 taulukkoa ja 5 liitettä.

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen ja DI Janne Martin

**Hakusanat:** nosturi, verkkovaihtosuuntaaja, rinnankytkentä, moottorikäyttö

Taajuusmuuttajaohjatuissa nosturikäytöissä taakkaa laskettaessa syntyvä energia on muutettava lämmöksi jarruvastuksissa tai syötettävä takaisin sähköverkkoon esimerkiksi verkkovaihtosuuntaajalla. Verkkovaihtosuuntaajaa on tyypillisesti käytetty suurissa satamanostureissa, joiden tehontarve on yli 1000 kW.

Työssä tutkitaan useista yhteiseen välipiiriin rinnankytketyistä nimellisteholtaan 250 kW:n verkkovaihtosuuntaajista koostuvan verkkoonjarrutuslaitteiston soveltuvuutta nosturikäyttöön. Lisäksi johdetaan yhtälöt verkkoonjarrutuslaitteiston virran laskemiseksi, kun nosturin mekaaniset arvot tunnetaan. Viidestä erityyppisestä nosturista esitellään esimerkkitoteutus rinnankytketyillä verkkovaihtosuuntaajilla. Aiemmin vastusjarruttavina toteutettujen nostureiden kustannuksia verrataan verkkovaihtosuuntaajilla toteutettuihin ratkaisuihin. Esimerkinostureista esitetään nosturin työsykliin perustuva arvio verkkoonjarrutuksen tuomasta energian säästöstä.

Tehtyjen mittausten perusteella käytetty menetelmä verkkovaihtosuuntaajien rinnan kytkemiseksi osoittautui nosturikäytössä toimivaksi. Kustannuslaskelmien perusteella verkkovaihtosuuntaajalla toteutetusta nosturista tulee materiaalikustannuksiltaan vastusjarruttavaa kalliimpi, vaikka paljon tilaa vievät vastuskaapit voidaankin jättää pois.

## ABSTRACT

**Author:** Jussi Karhunen

**Title:** Use of Parallel Connected Converters in Crane Power Supply

**Department:** Electrical Engineering

**Year:** 2006

**Paikka:** Lappeenranta

Master's thesis. Lappeenranta University of Technology. 82 pages, 58 figures, 11 tables and 5 appendices.

Examiners: Professor Juha Pyrhönen and M.Sc Janne Martin

**Keywords:** crane, voltage source converter, parallel connection, AC motor drive

In cranes utilizing frequency converter controlled AC motor drives a great amount of energy is generated during the lowering phase of the load. This mechanical energy is converted into heat in the braking resistors or fed back to the electrical network by using a bidirectional power converter. Typically bidirectional power converters have been used in large harbour cranes with wattage over 1000 kW.

In this thesis the suitability of a network braking unit consisting of multiple parallel-connected PWM converters with a nominal power rating of 250 kW in crane applications is analyzed. The study provides equations for calculating the line current of the network braking unit based on the mechanical parameters of the crane. Examples for the use of parallel-connected voltage source converters in crane applications are introduced. The costs of cranes operating with network braking are compared to the costs of cranes equipped with a resistor braking. The energy savings that may be obtainable by using network braking are estimated based on the typical working cycle of the cranes.

The use of parallel-connected voltage source converters is proved to be suitable for crane applications. According to the cost calculations the use of network braking increases the material costs of the crane even if the massive braking resistor cubicles are omitted.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty KCI Konecranes Oyj:n tuotekehitysosastolla ja liittyy KCI:n D2V-taajuusmuuttajatuoteperheen tehoalueen laajennukseen. Työn tarkastajina ovat toimineen professori Juha Pyrhönen ja DI Janne Martin.

Kiitän professori Juha Pyrhöstä saamistani arvokkaista kommentteista, ohjauksesta ja työn tarkastamisesta. Samoin kiitokset Janne Martinille työn tarkastamisesta ja rakenteen hahmottelusta alkuvaiheessa. Erityiskiitos tunteikkaasta ja lennokkaasta työn ohjauksesta DI Juha Santalalle.

Kiitokset myös tuotekehitysosaston päällikölle Matti Kemppaiselle mahdollisuudesta tämän työn tekemiseen ja koko tuotekehitysosaston välle innosta vastailla nostureita koskeviin kysymyksiini.

Vanhemmilleni ja isovanhemmilleni haluan lausua kiitokset taloudellisesta tuesta opintojen alkuvaiheessa ja vaimolleni Olgalle motivoinnista opintojen loppuvaiheessa.

Hyvinkäällä 23.8.2006

Jussi Karhunen

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ .....	2
ABSTRACT .....	3
ALKUSANAT .....	4
SISÄLLYSLUETTELO.....	5
KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET.....	8
1 JOHDANTO .....	11
1.1 Nosturi .....	12
<i>1.1.1 Siltanosturi</i> .....	13
<i>1.1.2 Kiskoilla kulkeva konttipukkinosturi</i> .....	15
<i>1.1.3 Laiturikonttinosturi</i> .....	16
<i>1.1.4 Kahmaripukkinosturi</i> .....	17
1.2 Nosturin tehontarve .....	19
<i>1.2.1 Tehontarve nostoliikkeessä vakionopeudella</i> .....	19
<i>1.2.2 Tehontarve siirtoliikkeessä vakionopeudella</i> .....	20
1.3 Taajuusmuuttaja ja jarrutustehon käsittely taajuusmuuttajalla.....	21
<i>1.3.1 Sähköinen jarrutus oikosulkumoottorilla</i> .....	21
<i>1.3.2 Taajuusmuuttaja</i> .....	23
<i>1.3.3 Jarrukatkojalla varustettu taajuusmuuttaja</i> .....	25
<i>1.3.4 Aktiivisella verkkosillalla varustettu taajuusmuuttaja</i> .....	26
<i>1.3.5 Yhteiseen välipiiriin kytketty taajuusmuuttaja</i> .....	26
1.4 Pulssinleveysmoduloitu verkkosuuntaaja.....	27
<i>1.4.1 PWM-moduloidun verkkovaihtosuuntaajaan toiminta</i> .....	28
<i>1.4.2 PWM-verkkosuuntaajien suora rinnankytkentä ja nollavirta</i> .....	29
2 TEHONSYÖTÖN NYKYINEN TOTEUTUS VERTAILUNOSTUREISSA.....	33
2.1 WTE-nosturi .....	35

2.2	Panostusnosturi.....	36
2.3	RMG-nosturi.....	37
2.4	STS-nosturi.....	38
2.5	AGD-nosturi .....	39
3	KCI:N UUSI VERKKOONJARRUTUSKONSEPTI .....	41
3.1	Verkkoonjarrutuslaitteen mitoitus .....	44
	3.1.1 Nostokoneiston vaikutus verkkoonjarrutuslaitteen virtaan.....	45
	3.1.2 Siirtokoneiston vaikutus verkkoonjarrutuslaitteen virtaan .....	48
3.2	Verkkoonjarruttavan nosturin varakäyttö.....	49
4	TEHONSYÖTÖN TOTEUTUS UUDELLA VERKKOONJARRUTUSLAITTEELLA VERTAILUNOSTUREISSA.....	50
4.1	Verkkoonjarruttava WTE-nosturi.....	50
4.2	Verkkoonjarruttava panostusnosturi.....	51
	4.2.1 Mitoitus simuloitujen virtojen mukaan .....	51
	4.2.2 Mitoitus KCI:n laskentaohjelman invertterivirtojen mukaan .....	57
4.3	Verkkoonjarruttava RMG-nosturi .....	59
4.4	Uuden verkkoonjarrutuskonseptin mukainen STS-nosturi .....	66
4.5	Uuden verkkoonjarrutuskonseptin mukainen AGD -nosturi.....	66
5	HYÖTYJARRUTUKSELLA SAATAVA ENERGIANSAÄSTÖ .....	68
5.1	Energian säästö nostoliikkeessä verkkoonjarrutuksen ansiosta .....	68
	5.1.1 WTE-nosturin nostokoneiston energiansäästö.....	69
	5.1.2 Panostusnosturin nostokoneiston energiansäästö .....	69
	5.1.3 RMG-nosturin nostokoneiston energiansäästö.....	70
	5.1.4 STS-nosturin nostokoneiston energiansäästö .....	70
	5.1.5 AGD-nosturin nostokoneiston energiansäästö .....	71
5.2	Yhteenveto energiansäästölaskelmista .....	71
6	MITTAUKSET LABORATORIOLAITTEISTOLLA JA NOSTURISSA .....	73
6.1	Mittaukset laboratoriolaitteistolla.....	73
	6.1.1 Nollavirran säädön toiminta.....	74
	6.1.2 Kuorman jakaantuminen rinnankäyviin laitteiden kesken .....	76

6.2	Mittaukset RMG-nosturissa.....	76
7	YHTEENVETO.....	79
	LÄHDELUETTELO.....	81
	LIITTEET	



## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

$A$	tehollinen tuulipinta-ala
$C_f$	muotokerroin
$\cos(\varphi)$	perusaallon tehokerroin
$E_p$	potentiaalienergia
$E_{\text{verkko},1}$	sähköverkosta otettava energia
$E_{\text{verkko},2}$	sähköverkkoon palautuva energia
$F_{\text{tuuli}}$	tuulivoima
$f$	taajuus
$g$	maan vetovoiman kiihtyvyys
$h$	korkeus
$I$	virran tehollisarvo
$I_{\text{DynAReg}}, I_{\text{D2R}}$	verkkoonjarrutuslaitteen virta
$I_{\text{D2R,cont}}$	verkkoonjarrutuslaitteen jatkuva virta
$I_{\text{D2R,max}}$	verkkoonjarrutuslaitteen virran maksimiarvo
$I_F$	moottorin virta täydellä kuormituksella
$I_{\text{inv,cont}}$	taajuusmuuttajan jatkuva virta
$I_{\text{inv,max}}$	taajuusmuuttajan virran maksimiarvo
$I_{n,\text{D2R}}$	verkkoonjarrutuslaitteen nimellisvirta
$i_0$	kiertävä nollavirta
$i_1$	suuntaajan vaihevirta
$i_{\text{vaihde}}$	vaihteen välityssuhde
$i_{\text{köysistö}}$	köysitalja
$J$	hitausmomentti
$J_{\text{jarru}}$	jarrun hitausmomentti
$J_{\text{kuorma,nosto}}$	kuorman moottorin akselille redusoitu hitausmomentti
$J_{\text{kuorma,siirto}}$	kiihdytettävän massan siirtomoottorin akselille redusoitu hitausmomentti
$J_{\text{kytkin}}$	kytkimen hitausmomentti
$J_m$	moottorin hitausmomentti
$J_{m,\text{kok}}$	moottorin akselilla vaikuttava kokonaishitausmomentti

$J_{\text{tela}}$	köysitelan hitausmomentti
$J_{\text{vaihde}}$	vaihteen hitausmomentti
$L_1$	verkkosuodattimen induktanssi
$m$	massa
$m_0$	kuormauselimen massa
$m_L$	kuorman massa
$m_{\text{kok}}$	kokonaismassa
$n$	pyörimisnopeus, $\text{min}^{-1}$
$n_{\text{inv}}$	taajuusmuuttajien lukumäärä
$n_m$	moottorien lukumäärä
$P$	teho
$p$	napapariluku
$P_{\text{DC}}$	välipiirin sähköteho
$P_{\text{mek}}$	mekaaninen teho
$P_{\text{m,mek}}$	moottorin akseliteho
$q$	dynaaminen tuulen paine
$R$	resistanssi
$r_{\text{tela}}$	köysitelan säde
$r_{\text{kantopyörä}}$	kantopyörän säde
$s$	suhteellinen jättämä, kuljettu matka
$T$	vääntömomentti
$T_{\text{dynaaminen}}$	dynaaminen vääntömomentti
$T_{\text{dynaaminen,nosto}}$	nostomoottorin dynaaminen vääntömomentti
$T_{\text{dynaaminen,siirto}}$	siirtomoottorin dynaaminen vääntömomentti
$T_m$	moottorin vääntömomentti
$T_{\text{staattinen}}$	staattinen vääntömomentti
$T_{\text{staattinen,nosto}}$	nostomoottorin staattinen vääntömomentti
$T_{\text{staattinen,siirto}}$	siirtomoottorin staattinen vääntömomentti
$T_{\text{tuuli}}$	tuulivoiman vääntömomentti moottorin akselilla
$T_{\text{vierintävastus}}$	vierintävastuksen vääntömomentti moottorin akselilla
$t$	aika
$t_a$	kiihdytysaika

$t_{\min}$	liikkeen suorittamiseen kuluva minimiaika
$U$	jännitteen tehollisarvo
$U_1, U_{\text{verkko}}, u_1$	syöttöverkon jännite
$U_2, u_2$	suuntaajajännite
$u_0$	tähtipisteen potentiaali, nollajännite
$v_{\text{nosto}}$	nostonopeus, m/min
$v_s$	tuulen nopeus, m/s
$v_{\text{siirto}}$	siirtonopeus, m/min
$w_{\text{kantopyörä}}$	kantopyörän vierintävastuskerroin
$X$	induktiivinen reaktanssi
$\alpha$	kulmakiihtyvyys, nollajännitteen vaihesiirto
$\delta$	tehokulma
$\eta$	hyötysuhde
$\eta_{\text{inv}}$	taajuusmuuttajan hyötysuhde
$\eta_{\text{köysistö}}$	köysistön hyötysuhde
$\eta_{\text{m}}$	moottorin hyötysuhde
$\eta_{\text{nosto}}$	nostokoneiston hyötysuhde nostomoottoria lukuun ottamatta
$\eta_{\text{nosto,kok}}$	nostokoneiston kokonaishyötysuhde
$\eta_{\text{vaihde}}$	vaihteen hyötysuhde
$\varphi$	vaihesiirtokulma
$\omega$	kulmanopeus
$\omega_{\text{m}}$	moottorin kulmanopeus
$\omega_{\text{m,max}}$	moottorin maksimikulmanopeus
AGD	Advanced Grab Drive, sähköisesti synkronoitu neliköysikahmarinosturi
PWM	pulssinleveysmodulaatio
RMG	Rail Mounted Gantry Crane, kiskoilla kulkeva konttipukkinosturi
STS	Ship-to-Shore Gantry Crane, laiturikonttinosturi
WTE	Waste to Energy, jätteenkäsittely

## 1 JOHDANTO

Taajuusmuuttajilla ohjatut oikosulkumoottorit ovat nykyään yleisiä nostureissa. Pumpu- ja puhallinkäytöistä poiketen nosturikäytössä moottorit toimivat suuren osan käyttöajastaan generaattoreina kuormaa laskettaessa ja vaakatasoista liikettä pysäytettäessä. Teollisuudessa yleisesti käytetty diodisillalla varustettu taajuusmuuttaja pystyy siirtämään tehoa vain sähköverkosta moottorikäytölle päin. Moottorin generaattorina toimiessaan synnyttämä sähköteho joudutaan diodisiltaa käytettäessä ohjaamaan jarruvastukseen, jossa se muutetaan lämmöksi. Jarruvastukset vievät suhteellisen paljon tilaa ja soveltuvat huonosti vaativiin olosuhteisiin.

Jarruvastuksia ei tarvita, mikäli taajuusmuuttajan diodisilta korvataan verkkovaihtosuuntaajalla. Tämä voidaan tehdä käyttämällä erillistä taajuusmuuttajan välipiirin kytkettävää verkkovaihtosuuntaajaa. Yhden tällaisen verkkoonjarrutuslaitteen kautta voidaan tuoda tehonsyöttö yhteisen jännitevälipiirin kautta useille taajuusmuuttajille, jolloin yksittäisen taajuusmuuttajan jarrutusteho kuluu toisessa yhteiseen välipiirin kytkeytyssä taajuusmuuttajassa tai menee takaisin sähköverkkoon.

Tässä työssä tarkastellaan verkkoonjarrituksen soveltuvuutta erityyppisiin nostureihin ja analysoidaan verkkoonjarrutuslaitteiston mitoitusta. Verkkoonjarrutuksella varustetun nosturin kustannuksia vertaillaan vastaavan vastusjarruttavan nosturin kustannuksiin ja arvioidaan verkkoon palautuvan energian määrää nostoliikkeen osalta.

## 1.1 Nosturi

Yhteistä kaikille KCI:n nostureille on se, että kaikki liikkeet toteutetaan sähkömekaanisesti ilman hydraulikkaa. Nykyään kaikki käytettävät moottorit ovat pienimpiä nostimia lukuun ottamatta taajuusmuuttajaohjattuja oikosulkumoottoreita. DC-käytöistä ja liukurengasmootoreista on joitakin poikkeustapauksia lukuun ottamatta luovuttu kokonaan.

Nostokoneistolla liikutetaan kuormaa pystysuunnassa. Nostaminen tapahtuu kelaamalla nostoköyttä köysitelalle. Nostonopeus riippuu köysitelan kulmanopeudesta, halkaisijasta ja köysipyörien määrästä. Kaikissa KCI:n nostureissa nostomoottori pyörittää köysitelaa vaihdelaatikon välityksellä. Tyypillinen nostokoneiston vaihdelaatikon välityssuhde on nosturista riippuen 40–120. Myös mahdolliselta suoravetoiselta nostomoottorilta edellytettäisiin täten hyvin suurta vääntömomenttia ja matalaa pyörimisnopeutta. Köysitelan pyörimisnopeus ja halkaisija määräytyvät nosturin mekaanisten vaatimusten perusteella. Nostoköysien on mahdollista kelautumaan köysitelalle yhteen kerrokseen kuorman ollessa maksiminostokorkeudessa. Nostoköysien lukumäärään vaikuttaa nostettavan taakan paino ja nostoköyden vetolujuus.

Samalla akselilla moottorin kanssa sijaitsee mekaaninen kuormajarru. Jarru voi olla rakennettu moottorin yhteyteen tai sitten käytetään erillistä ulkoista levy- tai kenkäjarrua. Lisäksi voidaan asentaa ylimääräinen turvajarru suoraan köysitelalle, mikäli asiakkaan turvamääräykset sitä edellyttävät.

Siirtokoneistoilla liikutetaan kuormaa pitkittäis- ja poikittaissuunnassa. Siirtokoneiston pääosat ovat moottori, vaihteisto ja vetävät kantopyörät. Siirtokoneiston kuormitus koostuu massan kiihdyttämisestä levosta vaakasuoraan liikkeeseen. Täyden siirtonopeuden saavuttamisen jälkeen siirtokoneiston tehon tarve riippuu liikekitkasta. Lisäksi ulkokäytössä tehon tarpeeseen vaikuttaa tuulikuorma.

Siltanosturi on nosturi, joka liikkuu rakennuksen katonrajaan rakennettua nosturirataa pitkin. Prosessiteollisuuden nosturit ovat pääasiassa siltanostureita. Pukkinosturi taas seisoo jalkojen varassa, jotka liikkuvat maahan asennettuja kiskoja pitkin. Erilaisia pukkinostureita käytetään lähinnä satamissa ja konttiterminaaleissa.

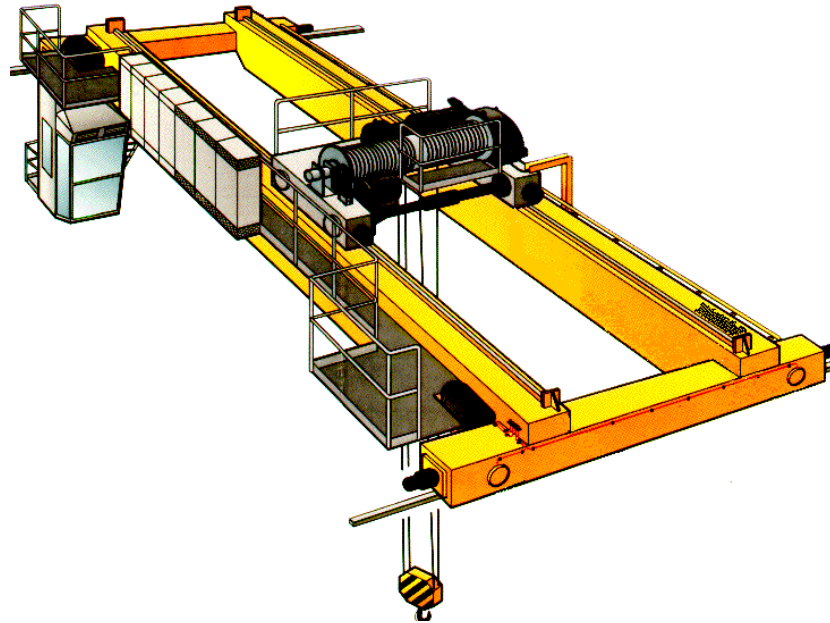
Tässä työssä käsitellään esimerkkitapauksina kahta erilaista siltanosturia ja kolmea pukkinosturia. KCI valmistaa lukuisia muunkin tyyppisiä nostureita, joita ei tässä työssä käsitellä.

### **1.1.1 Siltanosturi**

Siltanosturin pääosat ovat päädyt, pääkannattajat, vaunu ja nostin. Pääkannattajista ja päädyistä koostuva silta liikkuu rakennuksen katonrajassa olevia kiskoja, nosturirataa, pitkin. Moottorista, vaihteistosta ja vetävistä kantopyörästä koostuva siirtokoneisto liikuttaa siltaa pitkin nosturirataa. Kantopyöriä on yhteensä vähintään neljä eli yksi jokaisessa sillan neljästä nurkasta. Nosturin koon kasvaessa kantopyörien määrä lisääntyy. Kantopyöriä lisätään yleensä kaksipyöräisinä teleinä, joten sillan nurkissa voi olla 1, 2, 4 tai 8 kantopyörää.

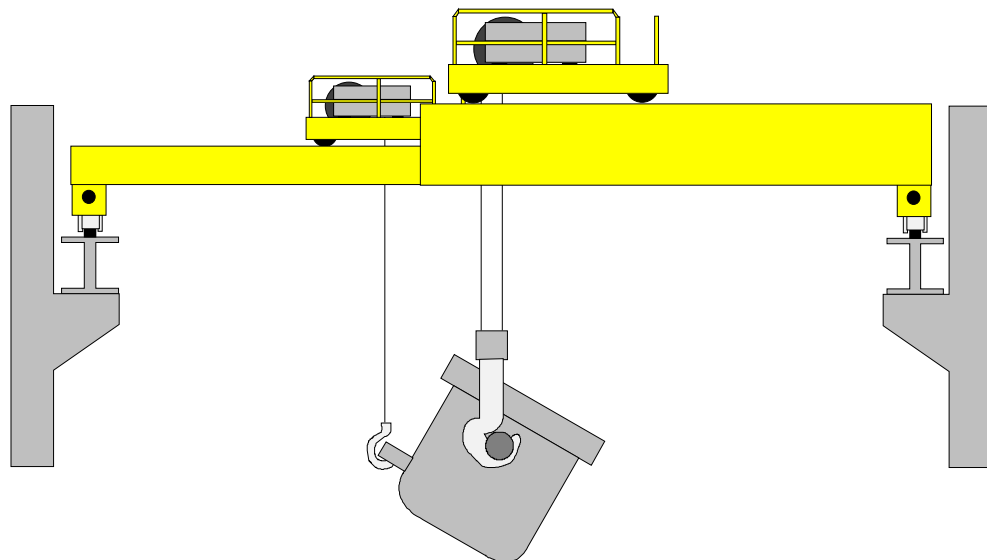
Sillassa on vähintään kaksi vetävää kantopyörää, yksi kummallakin sivulla. Tyypillisesti jokaisella vetävällä kantopyörällä on oma moottorinsa ja vaihteistonsa. Kun vetäviä kantopyöriä on enemmän kuin kaksi, sijoitetaan ne sillan neljään nurkkaan. Kuvan 1 siltanosturissa on neljä kantopyörää, joista ohjaamon puoleiset pyörät ovat vetäviä. Pyörien lukumäärää suurentamalla pyörän halkaisijaa voidaan pienentää, mikä mahdollistaa pienempien vaihteiden käytön [Hämäläinen 2004].

Nostokoneisto on sijoitettu vaunuun, joka liikkuu sillan päällä poikittain sillan kulkuunsa nähden. Moottorin, vaihdelaatikon ja köysitelan muodostamia nostokoneistoja voi olla samassa vaunuissa useita. Näin on esimerkiksi terästehtaan senkanostureissa, joissa tarvitaan varsinaisen nostokoneiston lisäksi apunostokoneisto senkan kaatoa varten.



Kuva 1. Siltanosturin rakenne. [Hämäläinen 2004]

Haluttaessa kaatokoneiston toimivan kummallakin puolella päänostoa, sijoitetaan se erilliseen apuvaunuun. Apuvaunulla on tällöin omat pääkannattajansa, jotta se mahtuu kulkemaan varsinaisen nostovaunun alta. Kuvassa 2 on esitetty tällainen nelipääkannattajainen rakenne.



Kuva 2. Nelipääkannattajaisen senkanosturin rakenne. Pääkannattaja on kuvassa katkaistu, jotta apuvaunun pääkannattaja näkyisi. [Hämäläinen 2004]

Vaunun siirrossa on samantapainen siirtokoneisto kuin sillan siirrossa. Usein pienemmissä vaunuissa käytetään vain yhtä siirtokoneistoa, jolloin veto moottorittoman puolen kantopyörälle tuodaan akselin välityksellä, kuten kuvan 1 tapauksessa.

Noston, vaunun siirron ja sillan siirron yhdistelmällä voidaan kuorma siirtää mihin tahansa pisteeseen siltanosturin toiminta-alueella. Tämä toiminta-alue määräytyy nosturiradan pituuden, nosturin jännevälän ja nostokorkeuden mukaan.

### 1.1.2 Kiskoilla kulkeva konttipukkinosturi

Kiskoilla kulkevaa konttipukkinosturia (RMG, Rail Mounted Gantry Crane) käytetään konttien käsittelyyn konttiterminalleissa. RMG-nosturissa on oma muuntaja, jolle tuodaan sähkönsyöttö kaapelikelan avulla. Kaapelia rullautuu kelalle ja sieltä pois sitä mukaan, kun nosturin pukki liikkuu rataansa pitkin. Pääkannattajat voivat jatkaa nosturiradan yli ulokkeina. Ulokkeet voivat olla molemmissa päissä, vain toisessa päässä tai niitä ei ole lainkaan. Vaunu liikkuu pääkannattajien päällä siltanosturin tapaan. Nostokoneisto nostaa ja laskee nostoköysien avulla konttitarrainta, jolla konttiin tartutaan. Konehuone nostokoneistoinen on riippuvarakenteinen, mikä mahdollistaa nostokoneiston ja konttitarraimen käännön kääntökoneiston avulla. Kuvassa 3 on tyypillinen RMG-nosturi.

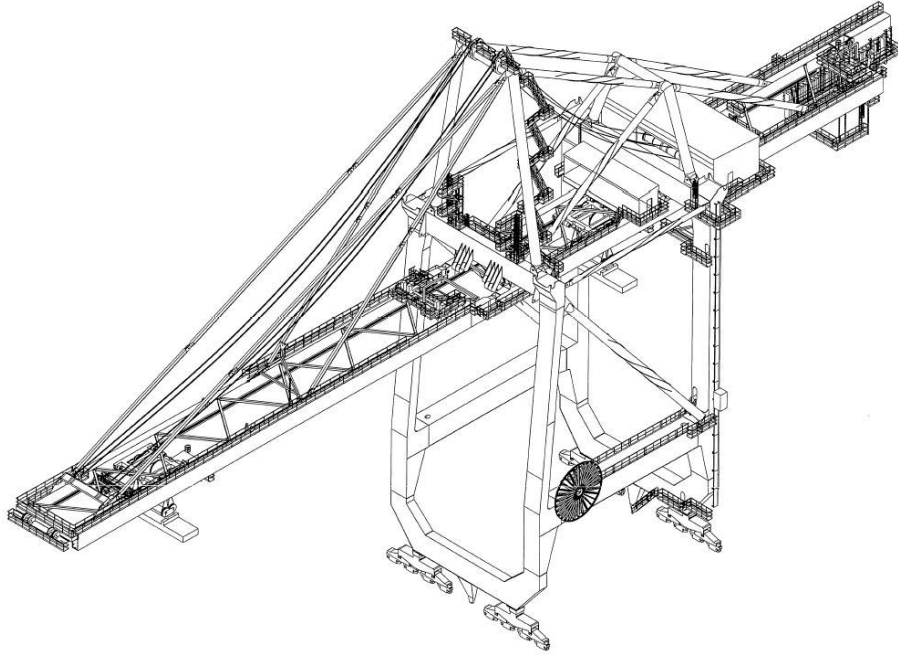


Kuva 3. RMG-nosturi.



### 1.1.3 Laiturikonttinosturi

Laiturikonttinosturi (STS, Ship-to-Shore Gantry Crane) on pukkinosturi, jolla siirretään kontteja satamassa laivan ja laiturin välillä. Kuvassa 4 näkyy laiturikonttinosturin rakenne.



Kuva 4. Laiturikonttinosturin rakenne.

Pukki toimii nosturin runkona ja siihen on kiinnitetty telit ja pääkannattaja. Pukin ajokoneistolla saadaan aikaan nosturin liike laivan pituussuunnassa. Pääkannattajan jatkeena meren puolella on puomi. Puomi on nivelöity pääkannattajaan siten, että se voidaan nostaa ylös nosturin ollessa lepoasennossa. Turvallisuussyistä puomi on alhaalla ainoastaan laivaa purettaessa tai lastattaessa. Vaunu liikkuu pääkannattajaan ja puomiin kiinnitettyjä kiskoja pitkin. Laivaa purettaessa konttiin tartutaan konttitarraimella ja siirretään kontti takaulokkeen alle. Koko nostokoneisto voi liikkua vaunussa pääkannattajaa pitkin kuten siltanosturissa. Tällöin kyseessä on koneistovaunu. Koneistovaunu voidaan varustaa kääntölaakerilla, jolloin konttitarrainta voidaan kääntää 360 astetta vaakatasossa.

Toinen vaihtoehto on sijoittaa nostokoneisto kiinteästi konehuoneeseen pääkannattajan päälle ja tuoda nostoköydet takaulokkeen takaa kääntöpyörien avulla vaunulle. Vaunun siirto toteutetaan tällöin erillisillä köysillä ja konehuoneessa olevilla siirtokoneistoilla. Tällaista köysivetoista vaunua kutsutaan köysivaunuksi. Köysivaunua käytettäessä liik-

kuvan vaunun massa ja siirtokoneiston tehon tarve pienenevät. On myös olemassa koneisto- ja köysivaunun välimuoto, puoliköysivaunu. Puoliköysivaunussa vaunun siirto on toteutettu vaunussa sijaitsevilla siirtokoneistoilla, jolloin joustavia siirtoköysiä ei tarvita.

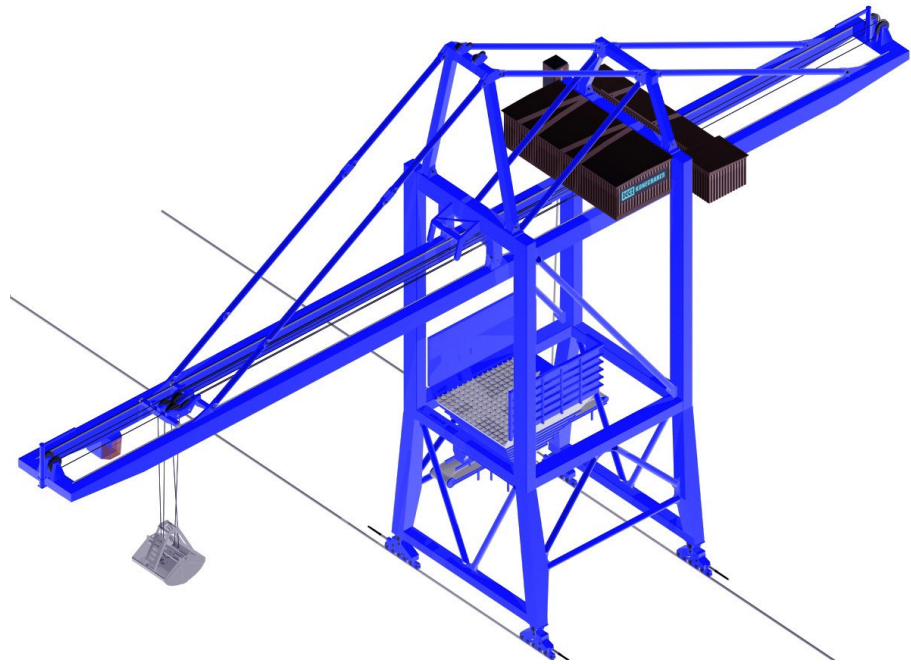
#### **1.1.4 Kahmaripukkinosturi**

Kahmaripukkinosturilla puretaan laivoista kiinteää massatavaraa, kuten kivihiihtä tai rautamalmia. KCI:n kahmaripukkinostureissa käytetään köysikahmariä, joka koostuu kauhasta ja köysitaljoista. Köysikahmariä vaatii kaksoiskoneiston, joka koostuu erillisistä nosto- ja sulkukoneistoista. Kahmariä nostettaessa molempia koneistoja ajetaan samalla nopeudella ylös-suuntaan eli nostoköyttä kelataan köysitelalle. Vastaavasti laskeminen tapahtuu ajamalla koneistoja alas-suuntaan samalla nopeudella. Köysikahmariä avataan ja suljetaan nosto- ja sulkukoneistojen välisellä nopeuserolla.

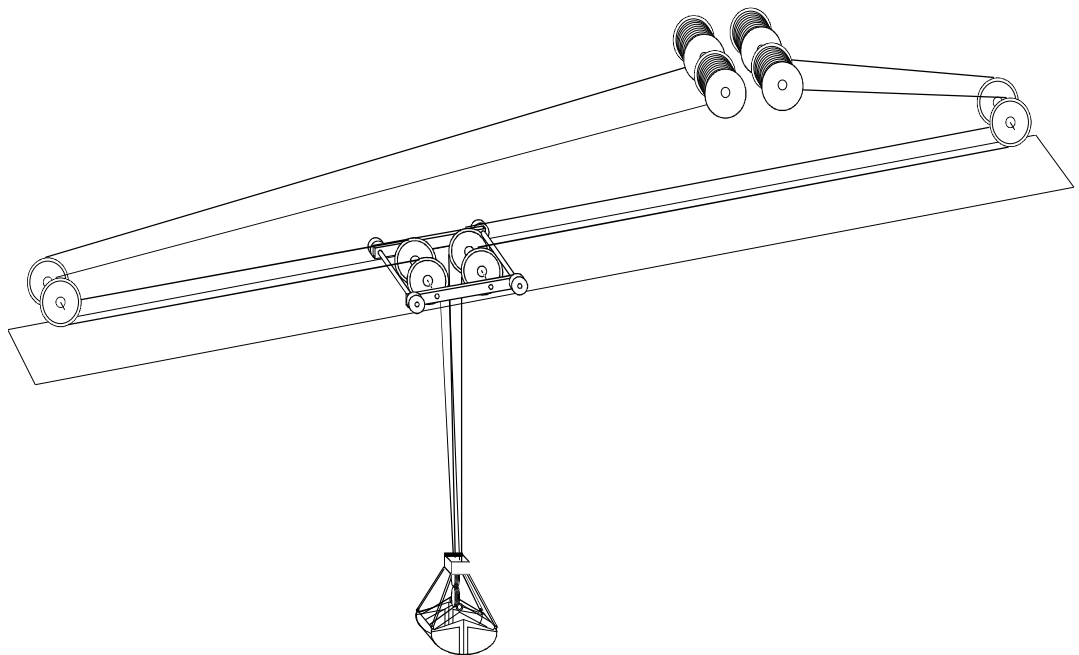
Kahmaripukkinosturin kahmarin siirtoliike on perinteisesti toteutettu STS-nosturin tapaan sijoittamalla nostokoneistot liikkuvaan vaunuun tai käyttämällä köysivaunua, jolloin nostokoneistot sijaitsevat pääkannattajan päällä olevassa konehuoneessa. Köysivaunua käytettäessä tarvitaan vielä erillinen apuvaunu, jotta kahmariä säilyttäisi korkeutensa siirtoliikkeessä.

KCI:n nykyiset kahmaripukkinosturit ovat sähköisesti synkronoituja neliköysikahmarinostureita (AGD, Advanced Grab Drive). Kuvassa 5 näkyy tällaisen AGD-nosturin rakenne. Niissä kahmarin siirtoliike on toteutettu kuvan 6 mukaisesti kahdella noston kaksoiskoneistolla, eikä erillistä siirtokoneistoa apuvaunuineen tarvita. Vaunusta tulee tällöin hyvin yksinkertainen ja kevyt, mikä mahdollistaa suuret siirtonopeudet. Myös köysien määrä vähenee perinteiseen ratkaisuun verrattuna.

Köysikahmarin sulkuvoima on riippuvainen kahmarin omasta painosta. Jotta auki oleva nostettavaan materiaalin osittain uponnut kahmariä saataisiin sulkeutumaan, täytyy kahmarin olla riittävän painava. Tämä johtaa siihen, että kahmarin omapaino on suuri verrattuna nostettavaan hyötykuormaan. Tyypillisesti tyhjän kahmarin paino on 30–40 % nosturin nimellisnostokyvystä.

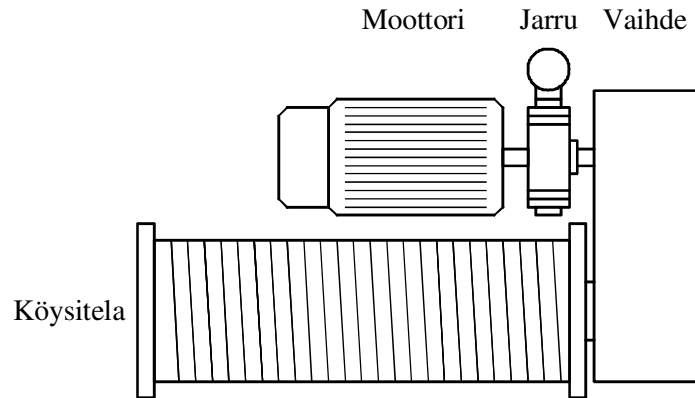


Kuva 5. AGD-nosturin rakenne.



Kuva 6. AGD-nosturin yhdistetty nosto- ja siirtokoneisto. [Lüthje 1998]



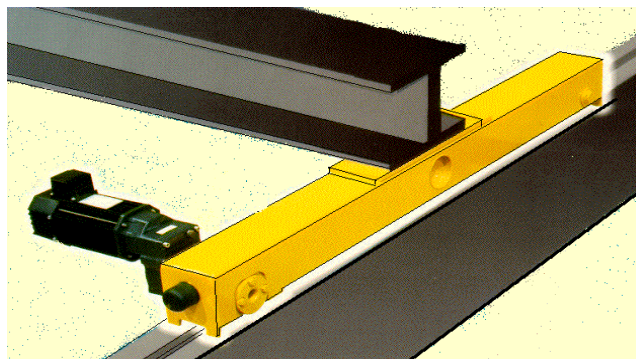


Kuva 7. Nostokoneisto. Nostomoottori pyörittää vaihteen välityksellä köysitelaa. Jarru sijaitsee vaihteen ensiöpuolella. [Hämäläinen 2004]

### 1.2.2 Tehontarve siirtoliikkeessä vakionopeudella

Siirtoliikkeessä massa kiihdytetään levosta vaakasuoraan liikkeeseen. Kiihdytettävä massa koostuu poikittaisessa siirtoliikkeessä eli vaunun siirrossa vaunun omasta painosta ja nostettavasta kuormasta. Pitkittäisessä siirtoliikkeessä vaikuttaa vielä tämän lisäksi nosturityypistä riippuen joko sillan tai pukin massa eli koko nosturin omamassa kuormineen. Tyypillinen kokonaismassa esimerkiksi suurehkolle terästehtaan panostusnosturille kuorman kanssa on 800 tonnia.

Ulkonostureissa on lisäksi otettava huomioon tuulikuorma. Kuvassa 8 näkyy tyypillinen siirtokoneisto, jossa laippakiinnitteinen moottori pyörittää kantopyörää vaihteiston kautta.



Kuva 8. Siirtokoneisto. [Hämäläinen 2004]

Siirtokoneiston jatkuvan tilan akseliteho on vierintävastuksen ja tuulikuorman summa

$$P_f = \frac{(m_0 + m_L)g w v_{\text{siirto}}}{\eta_{\text{siirto}}} + \frac{F_{\text{tuuli}} v_{\text{siirto}}}{\eta_{\text{siirto}}}, \quad (1.3)$$

missä  $m_0$  on kiinteä massa,  $m_L$  nostettavan taakan paino,  $v_{\text{siirto}}$  siirtonopeus,  $w$  vierintävastuskerroin,  $\eta_{\text{siirto}}$  siirtokoneiston hyötysuhde siirtomoottoria lukuun ottamatta ja  $F_{\text{tuuli}}$  tuulivoima [Kemppainen 1992].

### 1.3 Taajuusmuuttaja ja jarrutustehon käsittely taajuusmuuttajalla

Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa johdosta lähes huoltovapaa ja edullinen ja on siksi suosittu moottorityyppi teollisuudessa. Taajuusmuuttaja mahdollistaa oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden ja vääntömomentin säädön, jolloin dynamiikaltaan vaativiakin käyttäjä voidaan toteuttaa oikosulkumoottorilla.

#### 1.3.1 Sähköinen jarrutus oikosulkumoottorilla

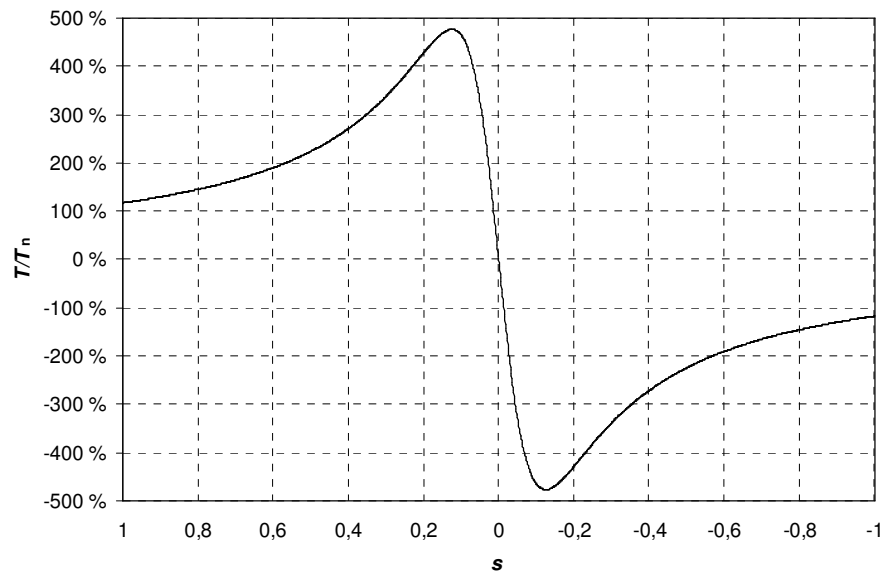
Oikosulkumoottorin pyörimisnopeus riippuu syöttötaajuudesta ja moottorin kuormitus-tilasta. Rakenteensa takia oikosulkumoottori pyörii aina syöttötaajuudesta ja moottorin napapariluvusta riippuvaa synkroninopeutta hitaammin moottorina toimiessaan. Synkroninopeuden ja koneen todellisen pyörimisnopeuden välinen ero on jättämä. Synkroninopeus  $n_s$  [ $\text{min}^{-1}$ ] määritetään yhtälöllä

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1.4)$$

ja suhteellinen jättämä yhtälöllä

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Delta n}{n_s}, \quad (1.5)$$

missä  $f$  on syöttötaajuus,  $p$  koneen napapariluku ja  $n$  koneen pyörimisnopeus. Oikosulkumoottorin vääntömomentti riippuu jättämästä. Kuvassa 9 on esitetty periaatteellinen oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyrä nosturikäytössä.



Kuva 9. Periaatteellinen oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyrä nosturikäytössä.

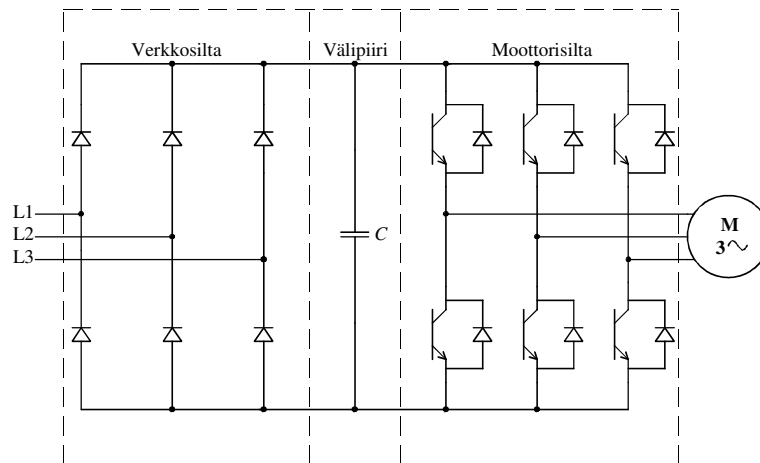
Jättämän arvo nolla vastaa synkronista pyörimisnopeutta. Kuormittamattoman tyhjäkäynnissä olevan oikosulkumoottorin jättämä on lähes nolla. Kun moottoria kuormitetaan, alkaa jättämä kasvaa. Tällöin liikutaan kuvan 9 käyrää pitkin vasemmalle pisteestä  $s = 0$ . Jättämän kasvaessa saavutetaan lopulta oikosulkumoottorin maksimivääntömomentti eli kippivääntömomentti. Nostureissa käytettävien moottoreiden kippivääntömomentti nimellisivääntömomenttiin nähden on suuri. Tyypillinen nostomoottorin kippivääntömomentti on 400-500 % nimellisivääntömomenttiin nähden.

Oikosulkumoottori toimii jarruna, kun jättämä on suurempi tai yhtä suuri kuin yksi. Tällöin on kyseessä vastakäyntijarrutus. Vastakäyntijarrutuksessa jarrutusenergia muuttuu lämmöksi pääasiassa moottorin roottorissa. Oikosulkumoottorin kannalta jarrualueella ei ole käytännön merkitystä, sillä koneen ottama virta on oikosulkuvirtaa suurempi, siis aivan liian suuri. Lisäksi koneen toiminta tällä alueella on labiili, koska vääntömomentti pienenee jättämän kasvaessa [Aura 1986].

Negatiivisilla jättämän arvoilla eli pyörimisnopeuden ollessa yli synkroninopeuden, oikosulkumoottori toimii generaattorina. Kuten kuvasta 9 nähdään, saavutetaan suurin jarrutusvääntömomentti generaattorialueella. Suoraan verkkoon kytketyn moottorin tapauksessa jarrutusenergia menee sähköverkkoon.

### 1.3.2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajan avulla saadaan kiinteätaajuisesta verkkosähköstä muokattua amplitudiltaan ja taajuudeltaan säädettävää kolmivaiheista vaihtojännitettä. Yleisesti käytetty ratkaisu on jännitevälipiirillinen kaksitasoinen taajuusmuuttaja. Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu kuvan 10 mukaisesti verkkosillasta, välipiiristä ja moottorisillasta.

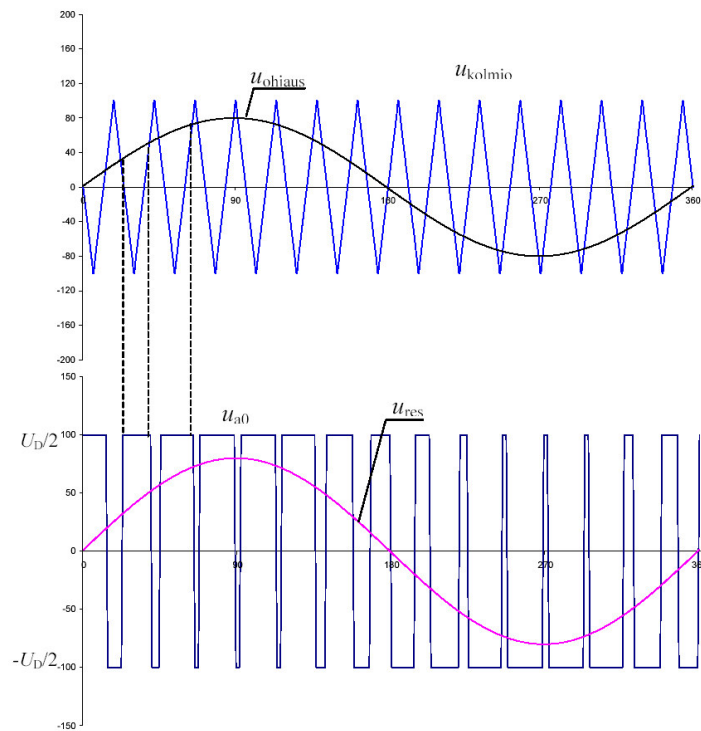


Kuva 10. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan pääpiirikaavio.

Verkkosilta tasasuuntaa verkon kolmivaihejännitteen välipiiriin tasajännitteeksi. Välipiirin kondensaattori tasaa diodisillan tuottaman jännitteen värein. Käytännön taajuusmuuttajassa välipiirin kondensaattoreita on jännitekestoisuuden vuoksi vähintään kaksi sarjassa. Lisäksi kondensaattorien rinnalla ovat tasausvastukset, joilla varmistetaan välipiirin jännitteen jako sarjaan kytkettyjen kondensaattorien kesken.

Moottorisilta vaihtosuuntaa välipiirin tasajännitteen kolmivaiheiseksi vaihtojännitteeksi moottorille pulssinleveysmoduloinnin (PWM, Pulse Width Modulation) avulla. Moottorille menevät vaihejohtimet kytketään vaihtosuuntaussillan tehokytkimillä joko positiiviseen tai negatiiviseen välipiirin jännitteeseen. Kuvassa 11 näkyy PWM-moduloinnin periaate analogiasignaalein toteutettuna.





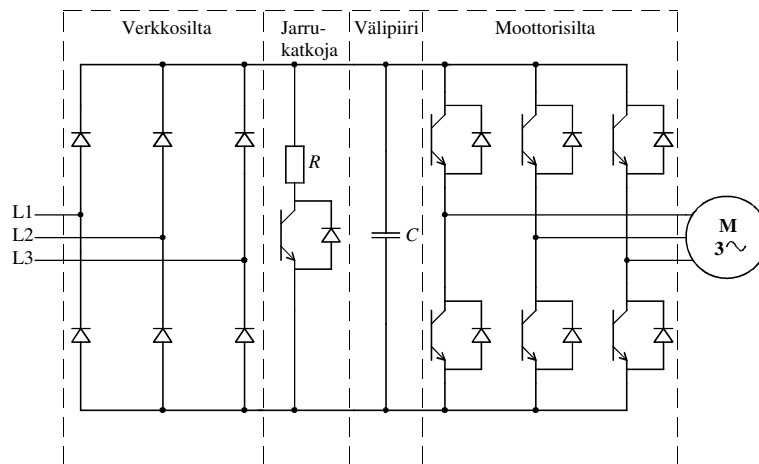
Kuva 11. Pulssinleveysmoduloinnin periaate. Kolmioaaltoa  $u_{kolmio}$  ja ohjausjännitettä  $u_{ohjaus}$  vertailemalla saadaan puolijohdekytkimille ohjauspulssit. Näillä ohjauspulsseilla nollapotentiaalia vasten syntyvä jännite  $u_{a0}$  saa aikaan lähes sinimuotoisen virran moottorin käämityksissä. Tehollisarvoltaan perusaallon taajuinen resultoiva jännitteen komponentti  $u_{res}$  on myös esitetty kuvassa. [Valjus 2005]

Nosturin nosto- ja siirtomoottoreiden käyttötapa on tyypillisesti jaksollinen ajoittaiskäyttö ajoittaiskäyttökertoimen ollessa yleensä 40 % tai 60 %. Taajuusmuuttajan nimellisvirta nosturikäytössä on tyypillisesti moottorin ajoittaiskäyttökertoimen mukaisen nimellisvirran suuruinen. Tietyissä suuren volyymin standardisoiduissa erityistapauksissa taajuusmuuttajan nimellisvirta voi olla lähes kaksinkertainen nostomoottorin nimellisvirtaan nähden. Näissä tapauksissa nostomoottorin koko on optimoitu juuri kyseistä sovellusta varten ja nosturin työsykli tunnetaan tarkasti, jolloin moottorin riittävästä jäähtymisestä voidaan olla varmoja.

### 1.3.3 Jarrukatkojalla varustettu taajuusmuuttaja

Jos taajuusmuuttajaohjatun moottorin syöttötaajuutta lasketaan nopeasti, alkaa moottori toimia generaattoripuolella ja syöttää tehoa välipiiriin. Käytettäessä verkkosiltana diodisiltaa, ei välipiirin generoituva teho pääse siirtymään sähköverkkoon. Tällöin välipiiriin tuleva teho varastoituu välipiirin kondensaattoriin ja välipiirin jännite alkaa kasvaa. Tämä johtaa välipiirin ylijännitteeseen, jos moottorin syöttötaajuutta ei nosteta tai tehoa muuten siirretä pois välipiiristä.

Välipiiriin generoituva jarrutusteho voidaan muuttaa lämmöksi kytkemällä kuvan 12 mukaisesti välipiirin rinnalle jarruvastus ja jarrukatkoja. Välipiirin jännitteen noustessa yli sallitun tason ohjataan jarrukatkoja johtavaksi, jolloin jarrutusteho muuttuu lämmöksi jarruvastuksessa. Tätä menetelmää kutsutaan vastusjarrutukseksi. Vastusjarrutuksella saadaan hyvät jarrutusominaisuudet. Vastusjarrutuksen huonoja puolia ovat jarruvastusten tilantarve ja se, että jarrutusenergia menee hukkaan.

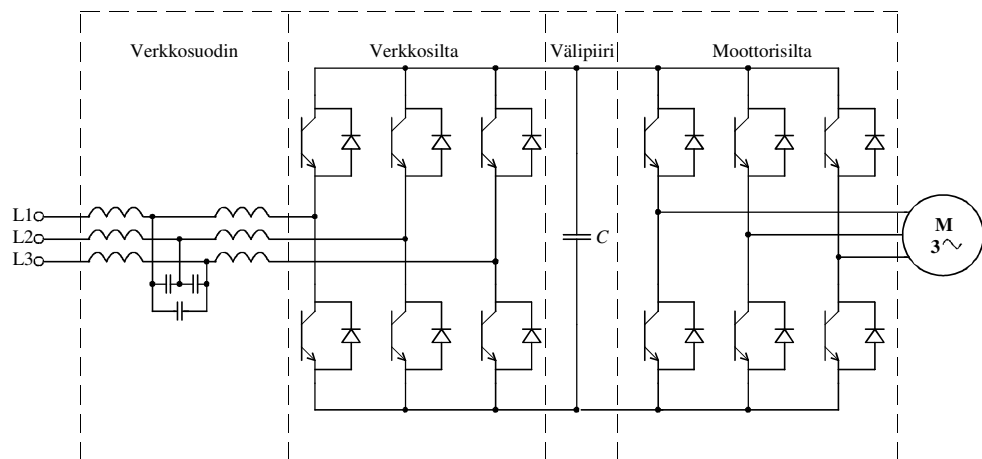


Kuva 12. Jarrukatkojalla varustetun taajuusmuuttajan pääpiirikaavio.

Jarruvastus on pienissä laitteissa yleensä integroitu laitteen sisään. Suuremmissa laitteissa se on ulkoinen komponentti. Laitteen tehon kasvaessa myös jarruvastusten määrä kasvaa samassa suhteessa. Suurilla tehoilla vastusjarrutus ei ole enää järkevää sen vaatiman suuren tilantarpeen vuoksi.

### 1.3.4 Aktiivisella verkkosillalla varustettu taajuusmuuttaja

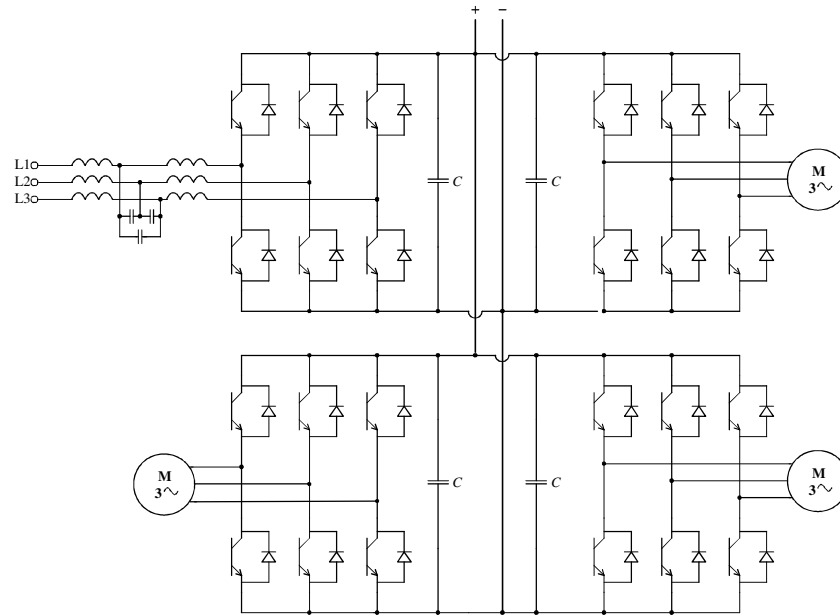
Verkköjännitteen tasasuuntaava diodisilta voidaan korvata kuvan 13 mukaisesti ohjattavalla aktiivisillalla. Tällöin teho pääsee virtaamaan kahteen suuntaan sekä verkosta moottorille että moottorilta verkkoon. Jarrukatkojaa ei tällöin tarvita ja moottori-invertterin jarrutusteho saadaan syötettyä takaisin sähköverkkoon. Verkkosiltana käytetään samanlaista IGBT-siltaa, kuin tavallisessa moottori-invertterissä moottorisiltana. PWM-moduloitu verkkosilta vaatii sähköverkon ja verkkosillan väliin verkkosuodattimen. Ohjattava IGBT-silta on myös tavallista diodisiltaa kalliimpi. Näin ollen aktiivisella verkkosillalla varustettu taajuusmuuttaja on huomattavasti kalliimpi, kuin vastaava diodisillalla varustettu malli.



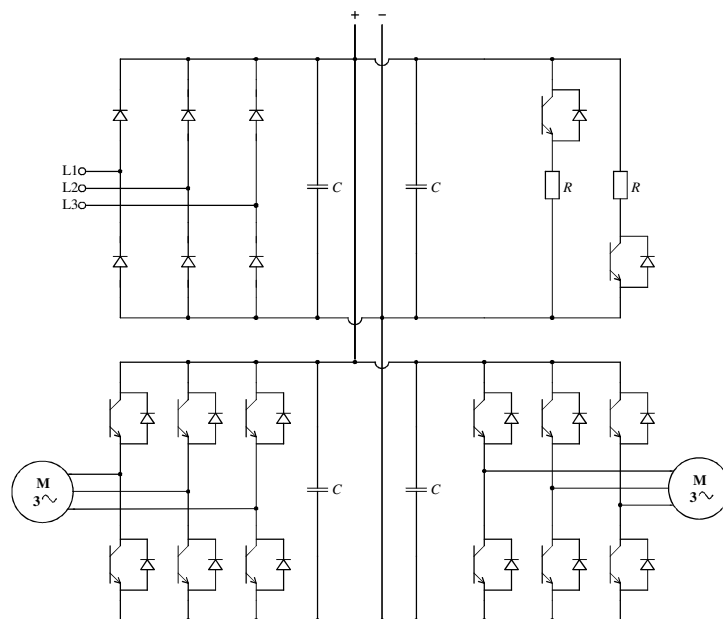
Kuva 13. Aktiivisella verkkosillalla varustetun taajuusmuuttajan pääpiirikaavio.

### 1.3.5 Yhteiseen välipiiriin kytketty taajuusmuuttaja

Usean taajuusmuuttajan sovelluksessa voidaan verkkosilta toteuttaa keskitetysti yhdellä tai useammalla erillisellä verkkosillalla. Tällöin käytetään yhteistä DC-välipiiriä, johon järjestelmän kaikkien taajuusmuuttajien välipiirit on kytketty kiinteästi. Yksittäisillä taajuusmuuttajilla ei ole tällöin lainkaan verkkosiltaa, vaan ne saavat syöttönsä yhteisestä välipiiristä. Yhteinen välipiiri tekee järjestelmän suunnittelusta joustavaa. Samoilla taajuusmuuttajilla voidaan kuvien 14 ja 15 mukaisesti tehdä sekä vastus- että verkkoon-jarruttava sovellus, koska vain yhteisen välipiirin syöttölaite vaihtelee.



Kuva 14. Yhteinen välipiiri verkkonjarrutuslaitteella.



Kuva 15. Yhteinen välipiiri diodisillalla ja jarrukatkojalla.

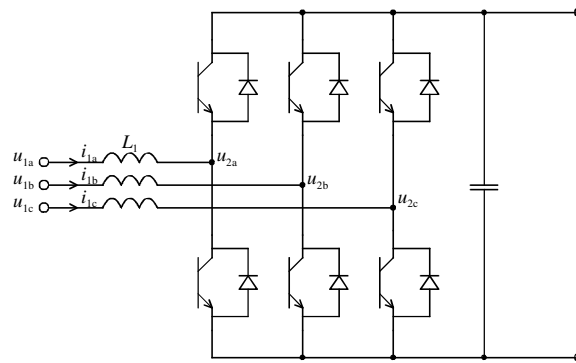
#### 1.4 Pulssinleveysmoduloitu verkkosuuntaaja

Pulssinleveysmoduloitu verkkosuuntaaja on aktiivinen verkkosilta, jonka ohjauksessa käytetään PWM-modulointia. PWM-verkkosuuntaajan avulla välipiirin tasajännite saadaan nostettua diodisillan tuottamaa tasajännitettä korkeammaksi. Virran käyrämuoto on hyvin sinimuotoinen ja tehokerroin on säädettävissä. PWM-verkkosuuntaaja vaatii

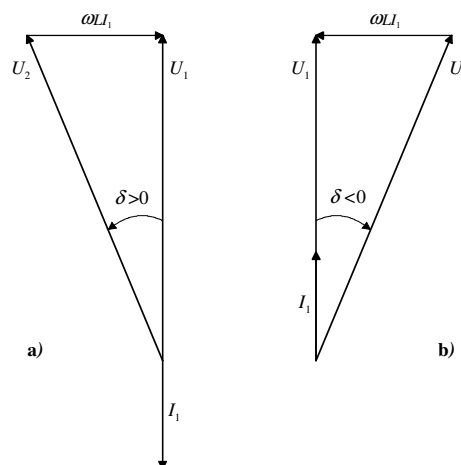
verkkosuodattimen, joka vaimentaa kytkentätaajuuden väreiden ja samalla toimii energia-  
varastona jännitteen nostoa varten [Pöllänen 2003].

### 1.4.1 PWM-moduloidun verkkovaihtosuuntaajan toiminta

Kuvassa 16 on  $L$ -tyyppisellä suotimella varustetun jännitevälipiirillisen verkkovaihtosuuntaajan pääpiirikaavio. Suuntaajan vaihevirtaa  $i_1$  säädetään muuttamalla induktanssin  $L_1$  yli vaikuttavaa jännitettä. Verkojännitteen  $u_1$  ollessa vakio, tehdään tämä suuntaajajännitettä  $u_2$  säätämällä. Kuvassa 17 ovat stationäärisen tilan osoitindiagrammit verkon vaihejännitteelle, vaihevirralle ja suuntaajajännitteelle vaihto- ja tasasuuntauksessa. Tehokulma  $\delta$  on verkon jännitteen  $U_1$  ja suuntaajajännitteen  $U_2$  välinen kulma.



Kuva 16.  $L$ -tyyppisellä suotimella varustetun jännitevälipiirillisen verkkosuuntaajan pääpiirikaavio. Kuvassa  $u_1$  on verkon jännite,  $i_1$  virta ja  $u_2$  suuntaajajännite.



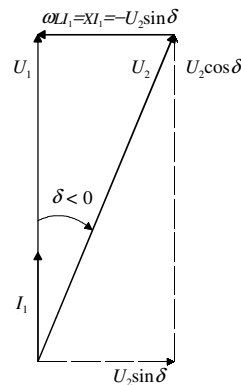
Kuva 17. Häviöttömän  $L$ -verkkosuotimen osoitindiagrammi perusaallolle, kun loisteho on nolla ja tehon virtaussuunta on a) suuntaajasta verkkoon (vaihtosuuntaus) ja b) verkosta suuntaajaan (tasasuuntaus).

[Ollila 1993]

Jos suodin oletetaan puhtaaksi induktanssiksi, saadaan verkon virran perusaallon tehollisarvoksi  $I_1$  kuvan 18 mukaisesti

$$I_1 = -\frac{U_2 \sin \delta}{X}, \quad (1.6)$$

missä  $X$  on verkkosuotimen induktiivinen reaktanssi verkkotaajuudella.



Kuva 18. Suuntaajajännitteen perusaallon päto- ja loiskomponentit häviöttömän  $L$ -verkkosuotimen osoitindiagrammissa.

Verkon vaihevirran ja vaihejännitteen ollessa samanvaiheiset on tehokerroin yksi, jolloin sähköverkosta välipiiriin virtaava teho on

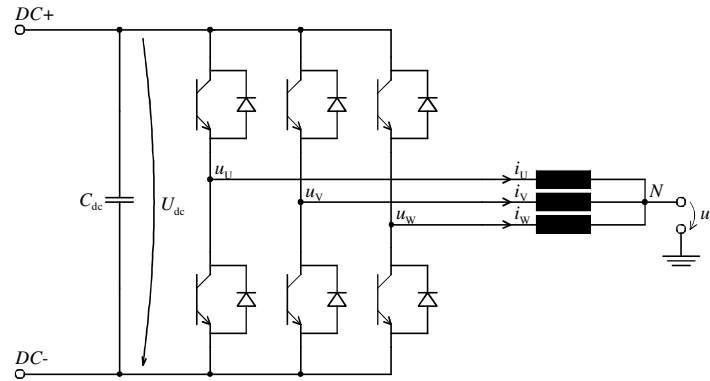
$$P = 3U_1 I_1 = -3 \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta. \quad (1.7)$$

Edellä esitetyt osoitindiagrammit pätevät nimenomaan stationäärisessä tilassa, kun virrat ja jännitteet oletetaan sinimuotoisiksi. Dynaamisessa tilassa tilanne ei ole näin yksinkertainen, koska suodininduktansseihin varastoitunut kokonaisenergia muuttuu. Verkkovaihtosuuntaajan säädössä käytetään avaruusvektoriesitystä, joka pystyy mallintamaan tätä muutostilaa. Avaruusvektoriteoriaa ei tässä työssä esitellä, koska verkkosuuntaajan vektorisäädön analysointi ei kuulu työn aihepiiriin.

#### 1.4.2 PWM-verkkosuuntaajien suora rinnankytkentä ja nollavirta

Pulssileveysmoduloidujen verkkosuuntaajien rinnankytkennässä on otettava huomioon laitteiden välillä kiertävä nollavirta. Nollavirta on seurausta suuntaajasiltojen aiheuttamista yhteismuotoisista jännitekomponenteista [Pöllänen 2003]. Yhteismuotoisen nolla-

jännitteen syntyä taajuusmuuttajaohjatun moottorin tapauksessa on havainnollistettu kuvissa 19 ja 20. Tähteen kytketyn moottorin vaihejohtimet on kytketty moottorisillan lähtöihin  $u_U$ ,  $u_V$  ja  $u_W$ , joten ne ovat joka ajanhetkellä kytkettynä joko positiiviseen tai negatiiviseen välipiirin jännitteeseen.



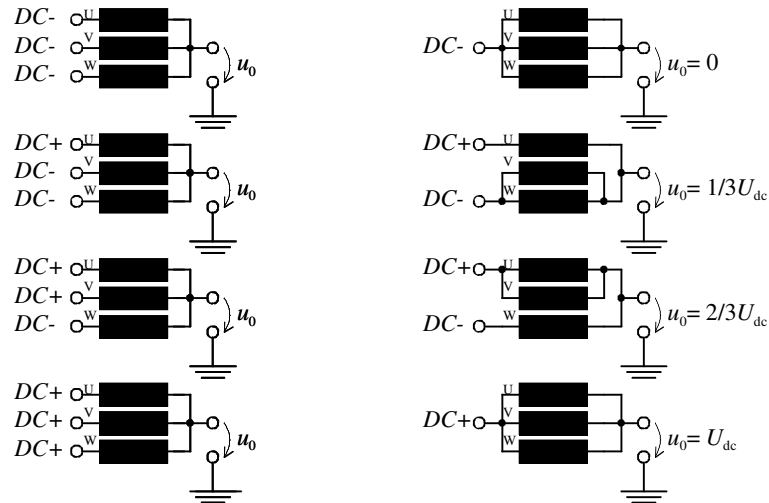
Kuva 19. Taajuusmuuttajaohjatun tähteen kytketyn oikosulkumoottorin tähtipisteen potentiaali.

Kaksitasoisessa kolmivaiheinverterissä on 8 eri kytkinasentokombinaatiota taulukon 1 mukaisesti. Varsinaisia jännitevektoreita on kuusi ja nollavektoreita kaksi. Nollavektoreita ovat ne kombinaatiot, joissa kaikilla vaihekytkimillä on sama arvo eli ne ovat kaikki positiivisia tai negatiivisia [Pyrhönen 2001].

Taulukko 1. Kaksitasoisen kolmivaiheinverterin tehokytkimien asentokombinaatiot. [Pyrhönen 2001]

kytkin	asentokombinaatiot							
$S_U$	+	+	-	-	-	+	+	-
$S_V$	+	+	+	+	-	-	-	-
$S_W$	+	-	-	+	+	+	-	-

Tarkasteltaessa kuvan 19 tähteen kytketyn tähtipisteen potentiaalia, huomataan sen vaihtelevan tehokytkinten asennon mukaan. Kuvassa 20 on esitetty neljä erilaista invertterin kytkinkombinaatiota moottorin vaiheiden kannalta. Tähtipisteen potentiaali saa neljä eri jännitetasoa tehokytkinten asennosta riippuen.



Kuva 20. Tähtipisteen potentiaali erilaisilla taajuusmuuttajan kytkinkombinaatioilla.

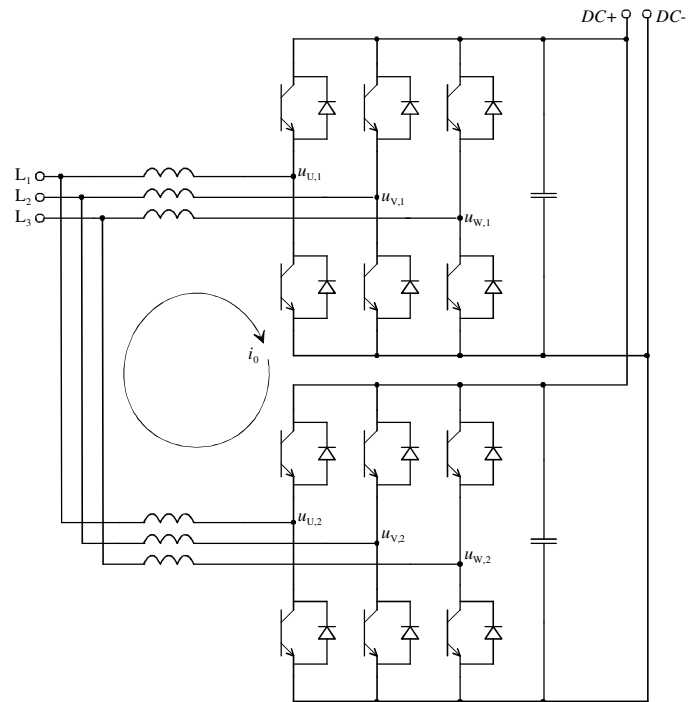
Jos esimerkiksi U- ja V-vaiheet on kytketty positiiviseen välipiiriin jännitteeseen ja W-vaihe negatiiviseen, kytkeytyvät U- ja V-vaiheiden käämit rinnan, jolloin niiden impedanssi puolittuu. Tämän seurauksena tähtipisteen potentiaaliksi negatiivisen DC-jännitteen suhteen tulee  $2/3U_{dc}$  [Pyrhönen 2001].

Vastaavalla tavalla myös verkkosuuntaajan virtuaalinen tähtipisteen potentiaali eli nolajännite vaihtelee. Nollajännitteen taajuus on sama kuin PWM-suuntaajaan kytkentätaajuus ja amplitudi puolet välipiiriin jännitteestä. Yhden suuntaajan tapauksessa nolajännite ei aiheuta kiertävää nollavirtaa, koska nollavirralla ei ole kulkureittiä. Jos kaksi PWM-suuntaajaa kytketään suoraan rinnan kuvan 21 mukaisesti, muodostuu nollavirralle kulkureitti välipiiriin kautta. Kuvassa 22 on havainnollistettu nollavirran synty kahden rinnan kytketyn verkkovaihtosuuntaajan tapauksessa. Kiertävä nollavirta aiheuttaa ylimääräisiä rasituksia tehokytkimille, joten se pitää jollakin tavalla eliminoida.

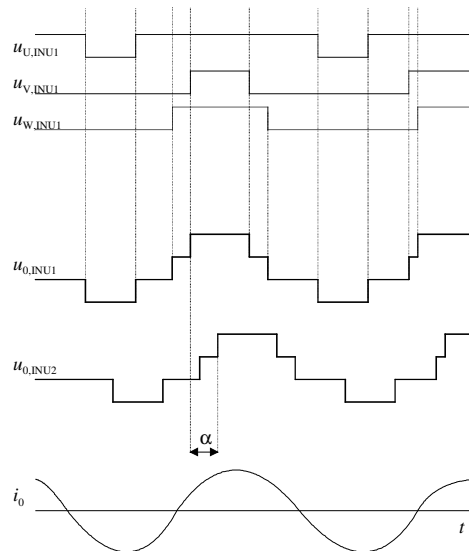
Eräs tapa nollavirran poistamiseksi on käyttää suuntaajakohtaisia erotusmuuntajia, jotka katkaisevat nollavirran kulkureitin poistamalla galvaanisen yhteyden verkon puolelta. Tämä on kuitenkin kallis ja ylimääräistä tilaa vievä ratkaisu [Ollila 2006].

Toinen tapa eliminoida nollavirta on rinnankäyvien laitteiden PWM-pulssien synkronoiminen. Tällöin nolajännitteet saadaan samanvaiheisiksi. Kun vaihesiirtoa nolajännitteiden kesken ei ole, ei myöskään synny kiertävää nollavirtaa.





Kuva 21. Suuntaajien suora rinnankytkentä. Kuvassa  $i_0$  on kiertävä nollavirta.

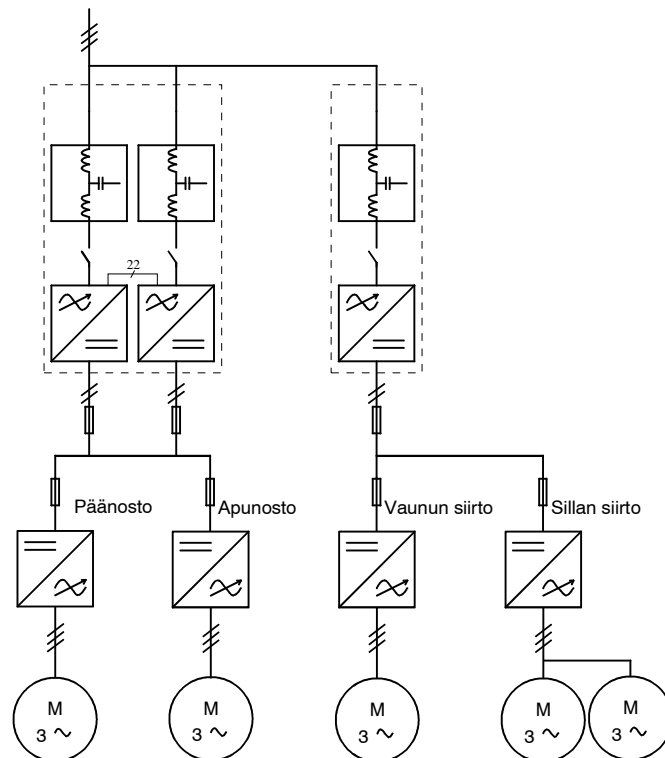


Kuva 22. Kahden rinnankytketyn synkronoimattoman suuntaajan nollajännitteet. Kuvassa ylhäällä on esitetty suuntaajan INU1 vaihekytkinten asennot. Alhaalla on näiden vaihekytkinten asennoista muodostuva nollajännite  $u_{0,INU1}$  ja suuntaajaan INU2 nollajännite  $u_{0,INU2}$ . Vaihesiirto  $\alpha$  nollajännitteiden kesken aiheuttaa kytkentätaajuisen kiertovirran  $i_0$ . [Ollila 2006]

## 2 TEHONSYÖTÖN NYKYINEN TOTEUTUS VERTAILUNOSTUREISSA

Tällä hetkellä KCI:n nostureissa on käytössä vuonna 1996 käyttöön otettu taajuusmuuttajasukupolvi, joka on nyt vaihtumassa uudempaan mallisarjaan. Sekä vanhan, että uuden sukupolven taajuusmuuttajat ovat vektorisäädettyjä jännitevälipiirillisiä taajuusmuuttajia.

Vanhan taajuusmuuttajasukupolven verkkoonjarrutuslaite kattaa tehoalueen 400–800 kW. 400 kW:n laite koostuu yhdestä teho-osasta ja verkkosuodattimesta. Tätä suuremmat laitteet koostuvat kahdesta verkkosuodattimesta ja kahdesta teho-osasta, joiden välillä on tiedonsiirtoa varten optinen kuitulinkki. Kuitulinkki tarvitaan, jotta samaan välipiirin rinnan kytkettyjen laitteiden kytkinohjeet saadaan samoiksi. Tällöin kiertävää nollavirtaa ei synny. Tällä laitteistolla yli 800 kW:n sovelluksissa joudutaan välipiiri jakamaan osiin kuvan 23 mukaisesti.



Kuva 23. KCI:n edellisen sukupolven verkkoonjarrutuskonsepti.

Moniosaisen välipiirin johdosta vaativissa prosessinostureissa tarvittava varakäyttömahdollisuus on syötön osalta vaikea toteuttaa. Esimerkiksi kuvan 23 järjestelmän syötön varakäyttö vaatisi noston verkkoonjarrutuslaitteen kahdentamisen. Varalaite kytkettäisiin tilanteesta riippuen noston tai siirron välipiiriin laiterikon tapahtuessa. Tällainen ratkaisu tulisi liian kalliiksi toteuttaa, eikä sen johdosta verkkoon jarruttavia varakäyttöjä ole tehty vanhan sukupolven verkkoonjarrutuslaitteella.

Vastusjarruttavissa sovelluksissa käytetään ulkoista levyvastusvarrasta. Yksi vastusvarras pystyy muuttamaan lämmöksi 8 kW:n jatkuvan tehon. Jarruvastuksen ylikuormitettavuus nostoliikkeessä määritetään pitkäkestoisimman alaspäin ajon perusteella ja siirto-liikkeessä pitkäkestoisimman mahdollisen myötätuulen ajon perusteella. Suurin sallittu ylikuormitettavuuskerroin on 3,8, kun ylikuormitus kestää enintään 30 sekuntia. Huipputeho kyseiselle vastusvartaalle on tällöin 30 kW. Vastusvartaat asennetaan vastuskaappiin kuvan 24 mukaisesti. Vastuskaapin leveys on 1 m, korkeus 1,5 m ja syvyys 0,5 m. Yksittäinen vastuskaappi kestää 32 kW:n jatkuvan lämpötehon.



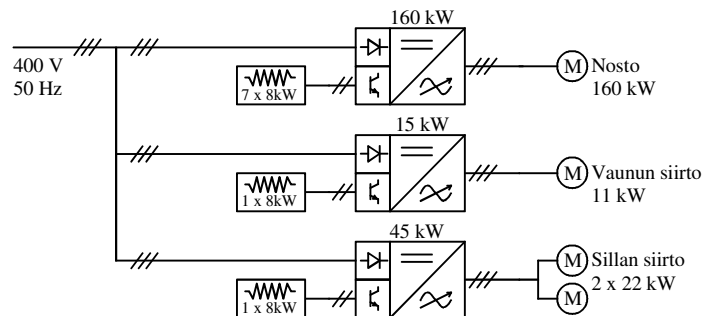
Kuva 24. Vastuskaappi.

Jarrutustehon kasvaessa myös jarruvastuskaappien tilantarve kasvaa. Suurilla tehoilla käytettävissä oleva tila alkaa asettaa rajoituksia vastusjarrutukselle. Yhteen vastuskaappiin mahtuu neljä 8 kW:n vastusta, joten esimerkiksi 600 kW:n jarruvastustusteho vaatii 19 jarruvastuskaappia. Vastuskaappiletkan pituudeksi tulee tällöin 19 metriä ja tilavuudeksi tulee 14 m<sup>3</sup>.

Tilantarpeen lisäksi ympäristöolosuhteet vaikuttavat vastusjarrutuksen käyttökelpoisuuteen. Esimerkiksi terästehtaissa vastuksiin kertyy hienojakoista metallipölyä, joten vastukset on puhdistettava säännöllisesti. Vastusjarrutus terästehtaassa aiheuttaa siten jatkuvan huollon tarpeen.

## 2.1 WTE-nosturi

Jätteenkäsittelylaitoksen nosturi (WTE, Waste To Energy) on sähkönsyötön suhteen siltanostureiden erikoistapaus. Normaalisti siltanosturin sähkökaapit sijaitsevat nosturin sillalla. WTE-nostureissa sähkökaapit on poikkeuksellisesti sijoitettu muualla rakennuksessa sijaitsevaan sähköhuoneeseen. WTE-nostureita on toimitettu pääasiassa vastusjarruttavina. Kuvassa 25 on vastusjarruttavan WTE-nosturin 1-tiekaavio.

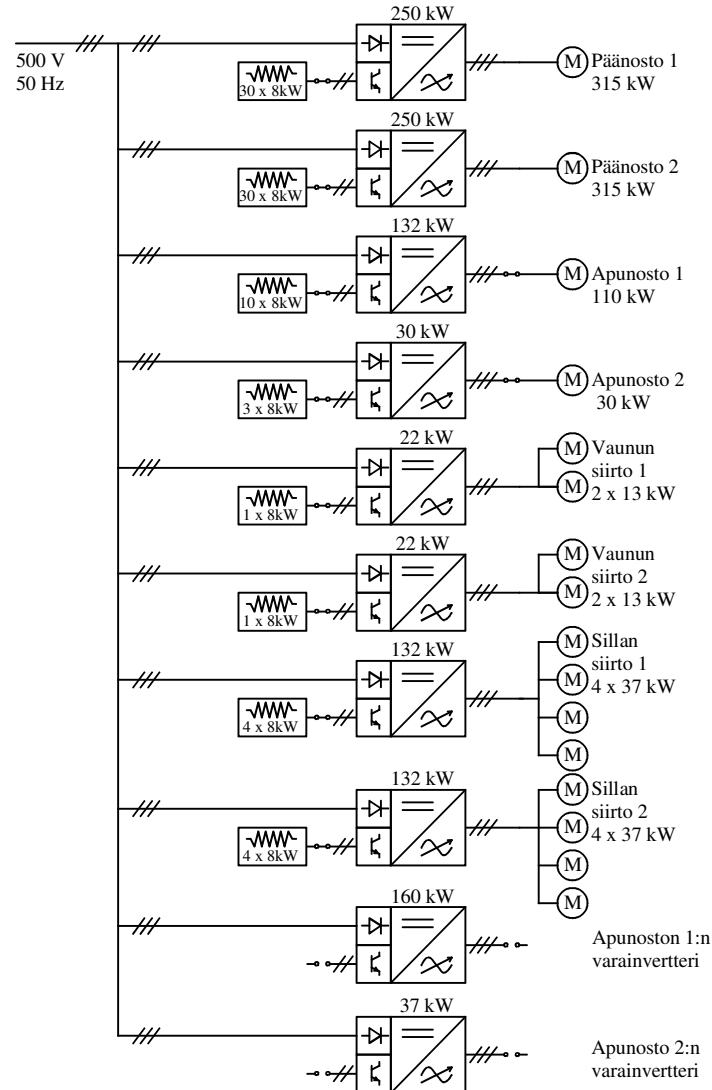


Kuva 25. Vastusjarruttavan WTE-nosturin 1-tiekaavio.

Vastusjarruttavan WTE-nosturin tapauksessa jarruvastuskaapit sijaitsevat erillisessä jarruvastushuoneessa. Kuvan 25 nosturi edustaa jätteenkäsittelynostureiden suurinta kokoluokkaa. Jarruvastusten määrä on tässä suhteellisen pieni ja vaatii vastuskaappitilaa 2-3 metriä yhtä nosturia kohden. WTE-nostureita on tyypillisesti aina kaksi kappaletta, toisen nosturin ollessa varalla.

## 2.2 Panostusnosturi

Vuoteen 2006 mennessä KCI:n toimittamat taajuusmuuttajaohjatut terästehtaan nosturit ovat kaikki olleet vastusjarruttavia. Kuvassa 26 on tyypillisen terästehtaan panostusnosturin 1-tiekaavio.



Kuva 26. Terästehtaanosturi.

Päänosto on toteutettu kahdella invertterillä ja moottorilla, jotka kytkeytyvät köysitelalle differentiaalivaihteiston kautta. Differentiaalivaihteiston ansiosta säilyy toisen moottorin vääntömomentti ja pyörimisnopeus samana vaikka toinen moottoreista pysähtyisi. Tällöin mekaaninen teho ja köysitelan nopeus puolittuvat mutta ajoa voidaan silti jatkaa nimelliskuormalla puolella nimellisuopeudella. Mikäli moottorit olisivat kytketyt samal-

le akselille ilman differentiaalivaihteistoa, ei yhden moottorin vääntömomentti riittäisi nostamaan eikä kannattelemaan nimelliskuormaa.

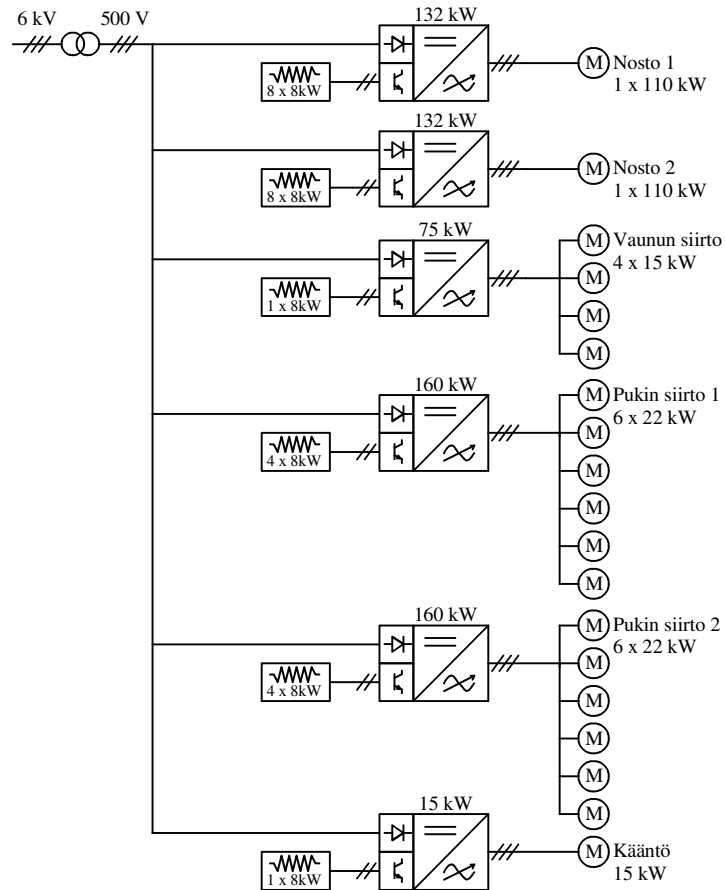
Vaunun ja sillan siirrossa on kummassakin kaksi invertteriä liikettä kohden. Siirtoliikkeitä voidaan ajaa hitaammilla kiihdytysrampeilla, jos vain toinen invertteri on käytössä.

Kummallakin apunostokoneistolla on oma varainvertterinsä. Varainvertterin kytkentä voidaan tehdä kontaktorilla, vaihtokytkimellä tai riviliittimen oikosulkupalojen paikkaa muuttamalla. Varainverttereillä ei ole omia jarruvastuksia, vaan siihen kytketään korvattavan invertterin jarruvastukset. Nosturin 83 jarruvastusta vaativat 21 vastuskaappia ja 21 metriä tilaa. Vastuskaappiletka on sijoitettu nosturin sillan päällä sijaitsevan sähköhuoneen katolle kahteen riviin.

### **2.3 RMG-nosturi**

RMG-nostureita on toimitettu sekä vastus- että verkkoonjarruttavina. Kuvassa 27 on vastusjarruttavan RMG-nosturin 1-tiekaavio.

Nostokoneisto koostuu kahdesta köysitelasta, joilla kummallakin on oma moottori ja invertteri. Vaunun siirrossa on yksi invertteri, joka ohjaa neljää siirtokoneistoa. Suuritehoisimmat invertterit ovat pukin siirrossa, koska pukin kiihdytyksen aikana siirtomoottorien virta on suurehko. Pukin siirtokoneiston mitoituksessa on otettava huomioon tuulikuorma, koska kyseessä on ulkonosturi. Nosturin 26 jarruvastusta vaativat 7 vastuskaappia ja 7 metriä tilaa.

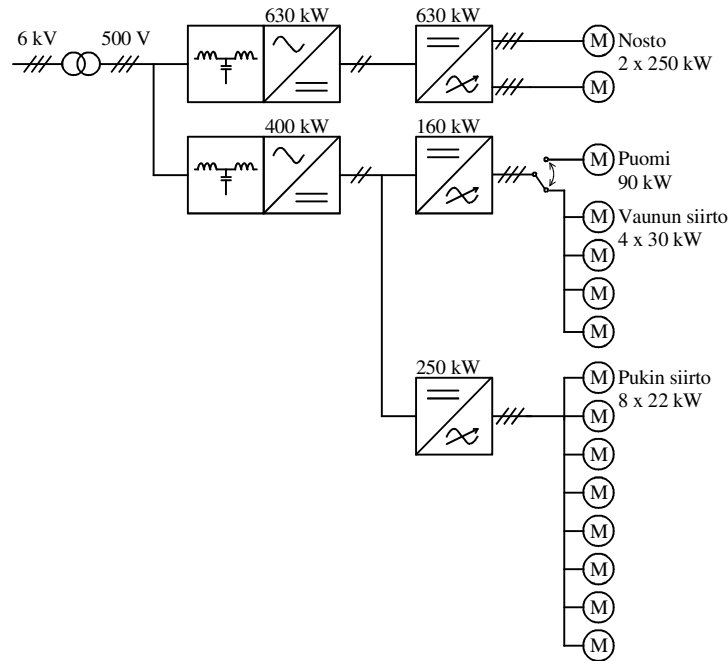


Kuva 27. RMG-nosturin 1-tiekaavio.

## 2.4 STS-nosturi

STS-nostureissa jarrutusteho on sen verran suuri, ettei jarruvastusten käyttö ole järkevää niiden vaatiman suuren tilantarpeen vuoksi. Satamanostureissa ei ole myöskään yhtä tiukkoja vaatimuksia varakäyttöjen suhteen kuin terästehdasnostureissa, joten verkkoonjarrituksen toteutus edellisen sukupolven verkkoonjarrutuslaitteistolla on ollut taloudellisesti mahdollista. KCI:n taajuusmuuttajaohjatut STS-nosturit ovatkin olleet pääasiassa verkkoonjarruttavia.

Kuvassa 28 on tyypillisen STS-nosturin 1-tiekaavio. Verkkoonjarrutuslaitteita on kaksi, joista toinen on kytketty samaan välipiiriin noston invertterin kanssa ja toinen samaan välipiiriin vaunun ja pukin siirron kanssa. Kahta nostomoottoria ohjaa yksi suurempitehoinen invertteri. Puomin nostolle ei ole omaa invertteriä, vaan siinä käytetään vaunun siirron invertteriä vaihtokontaktorin avulla.



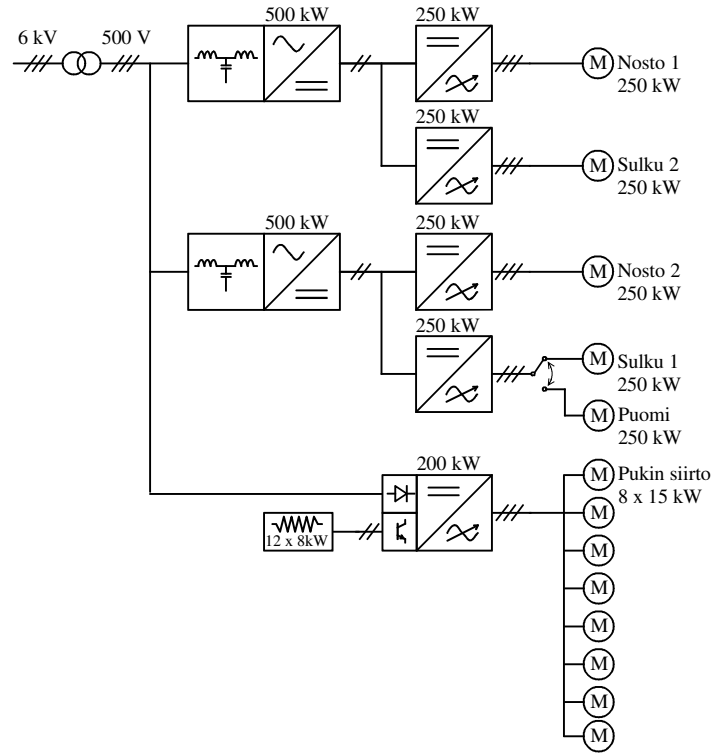
Kuva 28. STS-nosturin 1-tiekaavio.

## 2.5 AGD-nosturi

AGD-nosturit ovat suurehkon tehonsa johdosta verkkoonjarruttavia. Kuvassa 29 on tyyppillisen AGD-nosturin 1-tiekaavio. Neljän nostokoneiston jarrutusteho syötetään verkkoon kahdella saman tehoisella verkkoonjarrutuslaitteella, joilla on omat välipiirinsä.

Puomin nostolle ei ole omaa invertteriä, vaan siinä käytetään yhtä noston neljästä invertteristä vaihtokontaktorin avulla. Pukin siirto on toteutettu vastusjarruttavana, koska kaksiosaisen välipiirin takia verkkoonjarruttava pukin siirto voitaisiin kytkeä vain toiseen verkkoonjarrutuslaitteeseen. Tällöin verkkoonjarrutuslaitteen tehomarginaali ei riittäisi tilanteessa, jossa sekä nostokoneistoa että pukin siirtoa kuormitettaisiin maksimiteholla. Toisen verkkoonjarrutuslaitteen vaihtaminen 800 kW:n yksikköön tulisi 80 % kalliimmaksi, kuin jarruvastusten käyttö pukin siirrossa. Tämän vuoksi verkkoonjarruttava pukin siirto ei ole tällä laitteistolla taloudellisesti järkevä ratkaisu. Pukin siirron 12 jarruvastusta tarvitsevat 3 m vastuskaappitilaa.

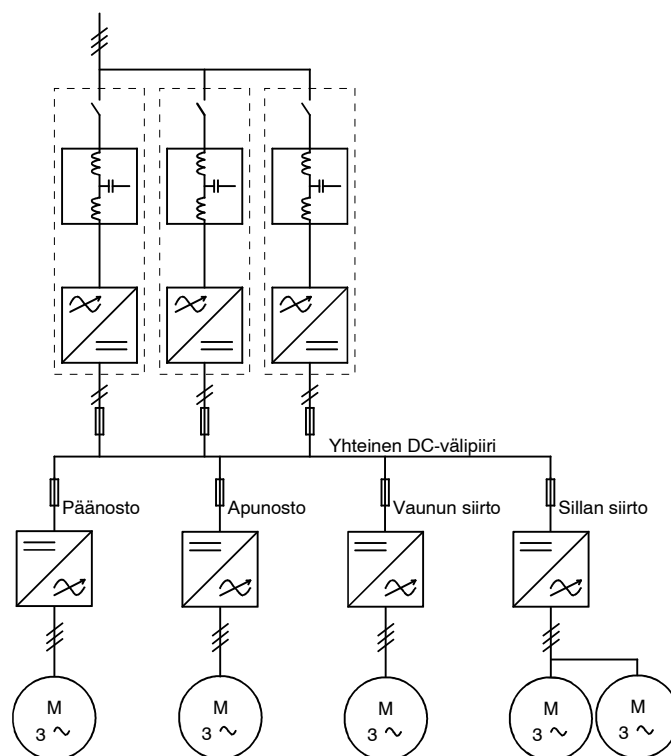




Kuva 29. AGD-nosturin 1-tiekaavio.

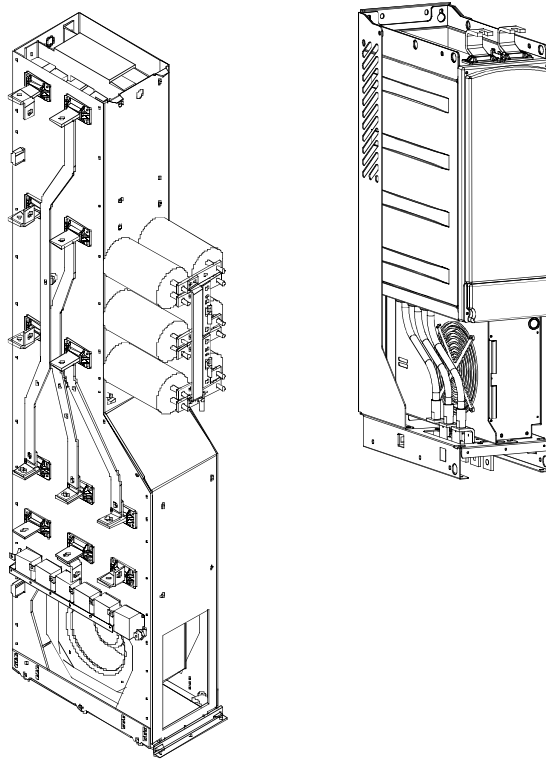
### 3 KCI:N UUSI VERKKOONJARRUTUSKONSEPTI

DynAReg Vector II on KCI:n uuden sukupolven verkkoonjarrutuslaite. Sen suurin etu edellisen sukupolven laitteeseen verrattuna on mahdollisuus kytkeä useita itsenäisiä yksiköitä samaan välipiiriin. Modulaarinen rakenne tekee verkkoonjarrutuslaitteen mitoittamisen helpoksi ja mahdollistaa kustannustehokkaan varakäyttöominaisuuden. Kuvassa 30 näkyy lohkokaavio uuden sukupolven konseptista.



Kuva 30. KCI:n uusi verkkoonjarrutuskonsepti.

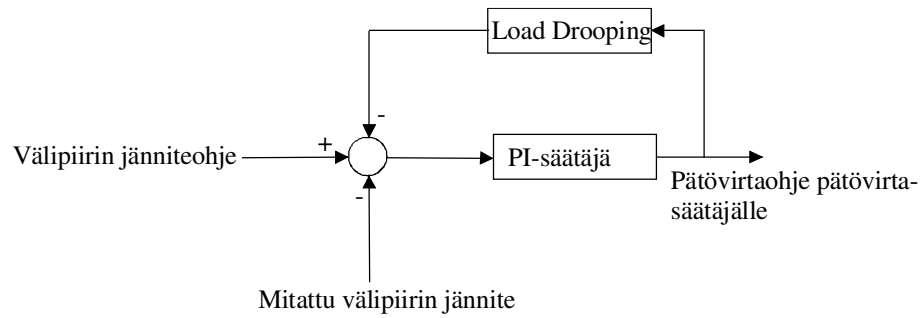
Verkkoonjarrutuslaite koostuu *LCL*-suotimesta ja teho-osasta. Kuvassa 31 näkyvät nämä verkkoonjarrutuslaitteen pääkomponentit. *LCL*-suodin, teho-osa ja tarvittavat kontaktorit on sijoitettu laitekaappiin, jonka leveys on 1 metriä ja korkeus 2 metriä. Erillinen ohjausyksikkö ohjauspaneelieineen yhdistetään valokuidulla suuntaajan teho-osaan. Ohjausyksiköt sijaitsevat kootusti omassa laitekaapissaan. Näin laitteiden parametrien muuttaminen on helppoa, koska ohjauspaneelit sijaitsevat vierekkäin.



Kuva 31. Verkkosuodatin ja verkkovaihtosuuntaajan teho-osa.

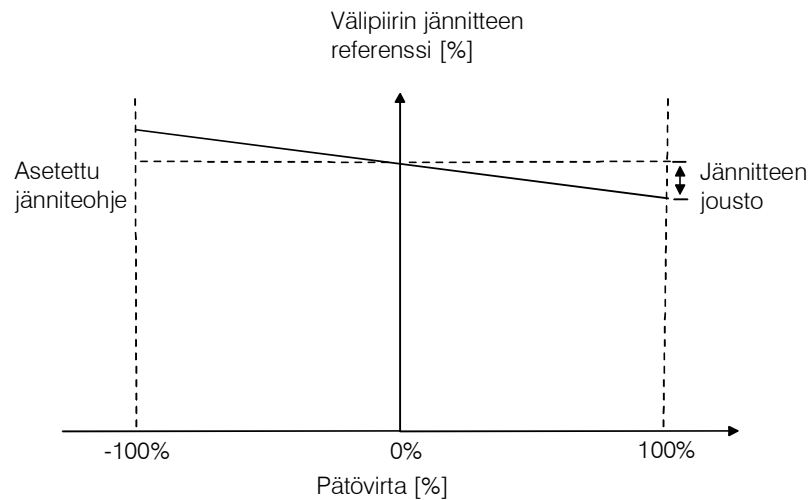
Laitteiden rinnankytkentä ei vaadi erillistä kaapelointia kommunikointiin laitteiden välillä. Tässä uudessa ratkaisussa PWM-pulssit synkronoidaan mittaamalla kiertävä nollavirta laitekohtaisesti ja säätämällä rinnankäyvien laitteiden nollajännitteiden vaihekulmat samoiksi. Nollajännitteen vaihekulmaa säädetään muuttamalla hetkellisesti kytkentätaajuutta.

Tehon tasainen jakautuminen eri laitteiden kesken on toteutettu välipiirin jouston (Load Drooping) avulla. Jokainen laite muuttaa välipiirin jännitteen ohjearvoansa lineaarisesti kuormituksensa mukaan. Yksittäisen laitteen läpi virtaavan tehon kasvaessa sen välipiirin jännitteen ohjearvo pienenee, jolloin osa kuormasta siirtyy muille laitteille. Tehon pienentyessä välipiirin jännitteen ohjearvo puolestaan kasvaa. Kuvassa 32 on esitetty säädön periaate.



Kuva 32. Välipiirin jännitteen jouston periaate.

Välipiirin jännitteen jousto johtaa siihen, että välipiirin jännite ei ole vakio, vaan muuttuu kuormitustilan mukaan. Verkosta tehoa otettaessa laskee välipiirin jännite ennalta asetellun parametrin ja kuormitustilan mukaisesti. Tehoa verkkoon syötettäessä välipiirin jännite nousee vastaavasti. Kuvassa 33 näkyy jänniteohjeen riippuvuus laitteen kuormitustilasta.



Kuva 33. Jänniteohjeen riippuvuus laitteen kuormituksesta.

### 3.1 Verkkoonjarrutuslaitteen mitoitus

Yhden verkkoonjarrutusyksikön nimellisteho on 250 kW, joten esimerkiksi 1000 kW:n kokonaisnimellisteho saavutetaan kytkemällä neljä yksikköä rinnan. On huomattava, että verkkoonjarrutuslaitteen nimellisteho ei täysin vastaa todellista sähkötehoa. Kolmi-vaiheverkon sähköteho on

$$P = \sqrt{3}UI \cos(\varphi), \quad (3.1)$$

missä  $U$  on pääjännite,  $I$  vaihevirta ja  $\cos(\varphi)$  perusaallon tehokerroin. Laitteen nimellisvirta on 460 A, joten tehokertoimella  $\cos(\varphi)=1$  400 voltin verkossa todelliseksi sähkötehoksi tulee 319 kW ja 500 voltin verkossa 398 kW.

Verkkoonjarrutuslaitteen virta voidaan arvioida yhtä aikaa ajettavien liikkeiden mukaan. KCI:n mitoitusohje edellisen sukupolven verkkoonjarrutuslaitteen virralle  $I_{\text{DynAreg}}$  on ollut

$$I_{\text{DynAreg}} = 1,04 \frac{U_{\text{motors}}}{U_{\text{supply}}} \sum_{i=1}^n I_{\text{Fi}} \cos(\varphi_i), \quad (3.2)$$

missä  $U_{\text{motors}}$  on moottorin syöttöjännite,  $U_{\text{supply}}$  verkon jännite,  $I_{\text{Fi}}$  yksittäisen moottorin ottama virta täydellä kuormituksella ja  $\cos(\varphi_i)$  vastaavan moottorin tehokerroin. Kerroin 1,04 kuvaa verkkoonjarrutuslaitteessa ja taajuusmuuttajissa syntyviä häviöitä.

Laskennassa käytettävät moottorivirrat saadaan KCI:n sisäisestä sähkökäyttöjen mitoitusohjelmasta, jonka avulla valitaan käytettävät moottorit ja taajuusmuuttajat nosturin mekaanisten lähtötietojen perusteella. Mitoitusohjelma valitsee taajuusmuuttajat tarvittavan jatkuvan tilan virran ja kiihdytyksessä esiintyvän maksimivirran perusteella. Moottoreissa valintakriteereinä ovat riittävä marginaali moottorin kippivääntömomenttiin ja se, ettei moottorin sallittu terminen teho ylitä.

### 3.1.1 Nostokoneiston vaikutus verkkoonjarrutuslaitteen virtaan

Kuormaa nostettaessa ja laskettaessa osa mekaanisesta tehosta kuluu koneiston häviöihin. Koska mekaaninen teho on kulmanopeuden ja vääntömomentin tulo, vaikuttavat koneiston häviöt tarvittavaan vääntömomenttiin.

Kuormaa nostettaessa osa nostomoottorin vääntömomentista kuluu vaihteiston ja köysistön häviöihin, mikä lisää nostomoottorilta tarvittavaa vääntömomenttia. Kuormaa laskettaessa nostomoottori toimii generaattorina. Tällöin koneiston häviöiden vaikutuksesta nostomoottorilta tarvittava vääntömomentti on köysitelan vääntömomenttia pienempi. Pyörimisnopeuden ollessa nolla ei mekaanista tehoa siirry, joten tällöin ei synny mekaanisia häviöitäkään. Nostomoottorin staattinen vääntömomentti on siten

$$T_{\text{staattinen,nosto}} = \begin{cases} \frac{(m_L + m_0)gr_{\text{tela}}}{i_{\text{vaihde}} i_{\text{köysistö}} \eta_{\text{vaihde}} \eta_{\text{köysistö}} n_m} & , \text{kun } v_{\text{nosto}} > 0 \\ \frac{(m_L + m_0)gr_{\text{tela}} \eta_{\text{vaihde}} \eta_{\text{köysistö}}}{i_{\text{vaihde}} i_{\text{köysistö}} n_m} & , \text{kun } v_{\text{nosto}} < 0 \\ \frac{(m_L + m_0)gr_{\text{tela}}}{i_{\text{vaihde}} i_{\text{köysistö}} n_m} & , \text{kun } v_{\text{nosto}} = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

missä  $m_L$  on nostettavan kuorman massa,  $m_0$  koukun tai kuormauselimen massa,  $g$  maan vetovoiman kiihtyvyys,  $r_{\text{tela}}$  köysitelan säde,  $i_{\text{vaihde}}$  vaihteen välityssuhde,  $i_{\text{köysistö}}$  köysitalja,  $n_m$  moottoreiden lukumäärä,  $\eta_{\text{vaihde}}$  vaihteen hyötysuhde ja  $\eta_{\text{köysistö}}$  köysistön hyötysuhde.

Staattinen vääntömomentti riittää kuorman kannattelemiseen, sekä nostoon ja laskuun vakionopeudella. Pyörimisen liikeyhtälön mukaan vääntömomentti  $T$  on hitausmomentin  $J$  ja kulmakiihtyvyyden  $\alpha$  tulo

$$T = J\alpha . \quad (3.4)$$

Kuorman kiihdyttäminen ja hidastaminen vaatii siis staattisen vääntömomentin lisäksi dynaamisen vääntömomentin, joka riippuu nostokoneiston hitausmomenteista ja kulmakiihtyvyydestä. Kuorman ja kuormauselimen hitausmomentti moottorin akselille redusoituna yhtä nostomoottoria kohden on

$$J_{\text{kuorma,nosto}} = \frac{(m_L + m_0)r_{\text{tela}}^2}{i_{\text{köysistö}}^2 i_{\text{vaihde}}^2 n_m}. \quad (3.5)$$

Vaihteiston hitausmomentti ilmoitetaan yleensä vaihteiston ensiöakselille eli moottorin akselille redusoituna. Kun nostokoneiston kaikki moottorin akselille redusoidut hitausmassat tunnetaan, saadaan moottorin akselilla vaikuttavaksi kokonaishitausmomentiksi

$$J_{\text{m,kok}} = J_{\text{kuorma,nosto}} + J_{\text{tela}} + J_{\text{vaihde}} + J_{\text{jarru}} + J_{\text{kytkin}} + J_{\text{m}}, \quad (3.6)$$

missä  $J_{\text{tela}}$  on köysitelan hitausmomentti,  $J_{\text{vaihde}}$  vaihteen hitausmomentti,  $J_{\text{jarru}}$  jarrun hitausmomentti,  $J_{\text{kytkin}}$  kytkimen hitausmomentti ja  $J_{\text{m}}$  moottorin hitausmomentti.

Nostomoottorin kulmanopeus saadaan laskettua nostonopeuden, välityssuhteiden ja köysitelan halkaisijan avulla ja on

$$\omega_m = \frac{v_{\text{nosto}}}{60} \frac{i_{\text{köysistö}} i_{\text{vaihde}}}{r_{\text{tela}}}, \quad (3.7)$$

missä  $v_{\text{nosto}}$  on nosturin nostonopeus metreinä minuutissa. Kiihdytyksen ollessa tasainen kulmakiiktyvyudeksi tulee

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad (3.8)$$

missä  $\Delta\omega$  on kulmanopeuden muutos ja  $\Delta t$  kulmanopeuden muutokseen kuluva aika. Kiihdytettäessä nostokoneisto täyteen nopeuteen, on kulmakiiktyvyyden itseisarvo

$$|\alpha| = \frac{\omega_{\text{m,max}}}{t_a}, \quad (3.9)$$

missä  $\omega_{\text{m,max}}$  on moottorin kulmanopeus nimellisnostonopeudella ja  $t_a$  kiihdytysaika.

Koska kuorman hitausmomentti redusoidaan jakamalla köysitelalle kuormasta aiheutuva hitausmomentti mekaanisen välityssuhteen neliöllä, tulee siitä huomattavasti moottorin hitausmomenttia pienempi. Nostokoneiston hyötysuhteen merkitys kuormasta aiheutuvaan dynaamiseen vääntömomenttiin nostoliikkeessä on siten niin pieni, että se voidaan jättää tässä huomiotta. Dynaaminen vääntömomentti nostomoottorin akselilla on tällöin

$$T_{\text{dynaaminen,nosto}} = \alpha J_{\text{m,kok}}. \quad (3.10)$$

Noston kiihdytyksen ja laskun hidastuksen aikana kulmakiihtyvyys ja dynaaminen vääntömomentti ovat positiivisia ja kasvattavat tarvittavaa kokonaisvääntömomenttia. Noston hidastuksessa ja laskun kiihdytyksessä ne puolestaan ovat negatiivisia pienentäen tarvittavaa kokonaisvääntömomenttia.

Moottorin akselilla vaikuttava kokonaisvääntömomentti saadaan staattisen ja dynaamisen vääntömomentin summana

$$T_m = T_{\text{staattinen}} + T_{\text{dynaaminen}} . \quad (3.11)$$

Kun moottorin vääntömomentti ja kulmanopeus ajan funktioina tunnetaan, saadaan moottorin akseliteho näiden tulona yhtälöllä

$$P_{m,\text{mek}} = \omega_m T_m . \quad (3.12)$$

Ottamalla huomioon moottorin ja sitä ohjaavan taajuusmuuttajan hyötysuhteet, saadaan moottorin aiheuttamaksi välipiirin sähkötehoksi

$$P_{\text{DC}} = \begin{cases} \frac{P_{m,\text{mek}}}{\eta_m \eta_{\text{inv}}} & , \text{ kun } P_{m,\text{mek}} > 0 \\ P_{m,\text{mek}} \eta_m \eta_{\text{inv}} & , \text{ kun } P_{m,\text{mek}} < 0 \end{cases} . \quad (3.13)$$

Verkkoonjarrutuslaitteiston virraksi saadaan

$$I_{\text{D2R}} = \frac{P_{\text{DC}} n_m}{\sqrt{3} U_{\text{verkko}} \cos(\varphi)} , \quad (3.14)$$

missä  $U_{\text{verkko}}$  on syöttöverkon jännite ja  $\cos(\varphi)$  tehokerroin.



### 3.1.2 Siirtokoneiston vaikutus verkkoonjarrutuslaitteen virtaan

Siirtoliikkeessä jatkuvassa tilassa siirtomoottorien vääntömomentti kuluu vierintävastukseen ja mahdolliseen tuulikuormaan. Lisäksi kiihdytyksessä ja hidastuksessa tarvitaan dynaaminen vääntömomentti.

Vierintävastukseen vaikuttaa siirrettävä massa ja suhteellinen vierintävastus. Vierintävastuksen aiheuttama vääntömomentti siirtomoottorin akselilla on

$$T_{\text{vierintävastus}} = \frac{m_{\text{kok}} g w_{\text{kantopyörä}} r_{\text{kantopyörä}}}{i_{\text{vaihte}} \eta_{\text{vaihte}} n_{\text{m}}}, \quad (3.15)$$

missä  $m_{\text{kok}}$  on siirrettävä kokonaismassa ja  $w_{\text{kantopyörä}}$  kantopyörän vierintävastuskerroin.

Nosturiin kohdistuva dynaaminen tuulen paine  $q$  [ $\text{N/m}^2$ ] on

$$q = 0,613 v_s^2, \quad (3.16)$$

missä  $v_s$  on tuulen nopeus. Tuulen paine aiheuttaa nosturin pinta-alasta ja rakenteiden muotokertoimista riippuvan tuulivoiman

$$F_{\text{tuuli}} = A q C_f, \quad (3.17)$$

missä  $A$  on nosturin tehollinen tuulipinta-ala ja  $C_f$  muotokerroin [FEM 1987]. Tuulivoiman aiheuttama vääntömomentti siirtomoottorin akselilla riippuu tuuleen suunnasta.

Vastatuulen aiheuttama vääntömomentti siirtomoottorin akselilla on

$$T_{\text{tuuli,1}} = \frac{F_{\text{tuuli}} r_{\text{kantopyörä}}}{i_{\text{vaihte}} \eta_{\text{vaihte}} n_{\text{m}}}. \quad (3.18)$$

Mikäli myötätuuleen ajettaessa tuulivoima on vierintävastusta suurempi, toimivat siirtomoottorit generaattoripuolella. Tällöin siirtomoottorin akselille aiheutuva vääntömomentti on

$$T_{\text{tuuli,2}} = \frac{\eta_{\text{vaihte}} F_{\text{tuuli}} r_{\text{kantopyörä}}}{i_{\text{vaihte}} n_{\text{m}}}. \quad (3.19)$$

Kiihdytettävän massan siirtomoottorin akselille redusoitu hitausmomentti on

$$J_{\text{kuorma,siirto}} = \frac{m_{\text{kok}} r_{\text{kantopyörä}}^2}{i_{\text{vaihte}}^2 n_{\text{m}}}. \quad (3.20)$$

Siirtomoottorin kulmataajuus on

$$\omega_m = \frac{v_{\text{siirto}}}{60} \frac{i_{\text{vaihde}}}{r_{\text{kantopyörä}}}, \quad (3.21)$$

missä  $v_{\text{siirto}}$  on nosturin siirtonopeus metreinä minuutissa. Kulmakihtyvyys saadaan yhtälöllä 3.8 ja siitä aiheutuva dynaaminen vääntömomenti siirtomoottorin akselilla on

$$T_{\text{dynaaminen,siirto}} = \begin{cases} \alpha \left( \frac{J_{\text{kuorma,siirto}}}{\eta_{\text{vaihde}}} + J_m \right) & , \text{ kun } \alpha \geq 0 \\ \alpha (J_{\text{kuorma,siirto}} \eta_{\text{vaihde}} + J_m) & , \text{ kun } \alpha < 0 \end{cases} . \quad (3.22)$$

Olettamalla tuulen nopeus vakioksi on siirtomoottorin staattinen vääntömomenti

$$T_{\text{staattinen,siirto}} = T_{\text{vierintävastus}} + T_{\text{tuuli}} . \quad (3.23)$$

Yhtälön 3.11 mukaisesti saadaan siirtomoottorin kokonaisvääntömomenti staattisen ja dynaamisen vääntömomentin summana. Tästä saadaan yhtälöllä 3.12 siirtomoottorin mekaaninen teho, josta edelleen saadaan välipiriin teho ja verkkoonjarrutuslaitteiston virta yhtälöiden 3.13 ja 3.14 avulla.

### 3.2 Verkkoonjarruttavan nosturin varakäyttö

Yhteiseen välipiiriin kytketyt verkkoonjarrutuslaitteet muodostavat luonnostaan tehonsyötön varakäytön, koska rinnakkaiset laitteet toimivat itsenäisesti. Yhden laitteen viikaantuminen ei estä muiden laitteiden toimintaa. Nosturin maksimitehoa on tällöin kuitenkin rajoitettava, jotta välttyttäisiin verkkoonjarrutuslaitteiston ylikuormitukselta.

Mikäli nosturin toimintanopeuksia ei haluta yhden verkkoonjarrutusyksikön vikatilanteessa rajoittaa, kytketään yhteiseen välipiiriin varalle ylimääräinen verkkoonjarrutusyksikkö. Varalaitetta ei erikseen kytketä päälle vikatilanteessa, vaan se on käytössä jatkuvasti.

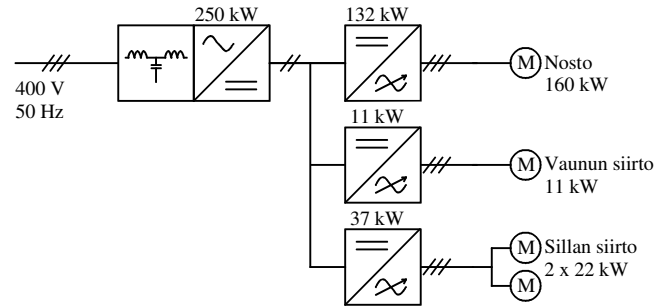
## **4 TEHONSYÖTÖN TOTEUTUS UUDELLA VERKKOONJARRUTUSLAITTEELLA VERTAILUNOSTUREISSA**

Kappaleessa 2 esitettyjen vertailunostureiden 1-tiekaavioiden pohjalta on muodostettu 1-tiekaaviot siitä, miten toteutettaisiin vastaava nosturi uuden sukupolven verkkoonjarrutuksella. Terästehdas- ja RMG-nosturin osalta on analysoitu verkkoonjarrutuslaitteiston mitoitusta nosturin mekaanisten ominaisuuksien perusteella. Saatuja tuloksia on vertailtu KCI:n sisäisen sähkökäyttöjen laskentaohjelman antamiin laskennallisiin taajuusmuuttajien virtoihin. WTE-, STS- ja AGD-nostureiden verkkoonjarrutuslaitteiston rinnankytkettävien yksiköiden määrä on karkeasti arvioitu vastaavien vastusjarruttavien nostureiden 1-tiekaavioiden pohjalta.

Materiaalikustannuksiltaan verkkoonjarrutus tulee kaikissa käsitellyissä esimerkkitapauksissa vastusjarrutusta kalliimmaksi. Kuljetus- ja asennuskustannuksia ei ole niiden monimutkaisuuden ja tulkinnanvaraisuuden vuoksi otettu huomioon kustannuksia analysoitaessa. Takaisinmaksuajat vastusjarrutuksen korvaamiselle verkkoonjarrutuksella esitetään kappaleessa 5 energiansäästölaskelmien yhteydessä.

### **4.1 Verkkoonjarruttava WTE-nosturi**

Kuvassa 34 on yhteiseen välipiiriin kytketyn verkkoonjarruttavan WTE-nosturin 1-tiekaavio. Moottoreiksi on voitu valita 500 voltin koneet, koska verkkoonjarrutuslaitteella välipiiriin jännite saadaan nostetuksi riittävän korkealle. Suuremmalla syöttöjännitteellä sama akseliteho vaatii pienemmän moottorivirran, joten pienempiä ja edullisempia taajuusmuuttajia voidaan käyttää. Vaikka taajuusmuuttajat on valittu nimellisvirraltaan pienemmiksi, on syöttöverkosta otettava virta silti samansuuruinen kuin 400 voltin koneillakin. Vastusjarruttavassa nosturissa käytettävien inverterien jatkuvan tilan maksimivirtojen summa on 447 A, mikä on yhden 250 kW:n verkkoonjarrutusyksikön jatkuvan tilan nimellisvirtaa pienempi.



Kuva 34. Verkkoonjarruttava WTE-nosturi.

Verkkoonjarruttavan ratkaisun etuna on mahdollisuus standardoida nosturi. Samaa moottoria ja vaihdelaatikkaa voidaan käyttää sekä 50:n että 60:n hertsin verkoissa ilman, että nosturin nosto- ja siirtonopeudet muuttuvat.

## 4.2 Verkkoonjarruttava panostusnosturi

Kappaleessa 2 esitellyn vastusjarruttavan panostusnosturin verkkoonjarruttavasta toteutuksesta on tehty kaksi eri laskelmaa. Toinen pohjautuu suoraan nosturin mekaanisiin ominaisuuksiin, joiden perusteella on tehty simulointi verkkoonjarrutuslaitteen virrasta. Toinen laskelma taas on tehty laskemalla verkkoonjarrutuslaitteen virta yhtälöllä 3.14 KCI:n laskentaohjelman antamien invertterivirtojen mukaan. Laskentaohjelma ilmoittaa jatkuvan tilan virran ja suurimman esiintyvän virran ottamatta kantaa virtojen kesto.

Koska kyseessä on panostusnosturi, apunosto ja sillan siirto eivät voi olla yhtä aikaa ajossa täydellä kuormalla. Apunostolla avataan romurautaa sisältävä romukori tai kaadetaan sulaa metallia sisältävä senkka. Tämä tapahtuu aina sillan ollessa pysähdyksissä. Toinen apunosto on huoltonostin, jolla ei ajeta normaalitilanteessa. Näin verkkoonjarrutuslaitteen virtaa voidaan tarkastella ottamalla huomioon vain päänosto ja sillan siirto.

### 4.2.1 Mitoitus simuloitujen virtojen mukaan

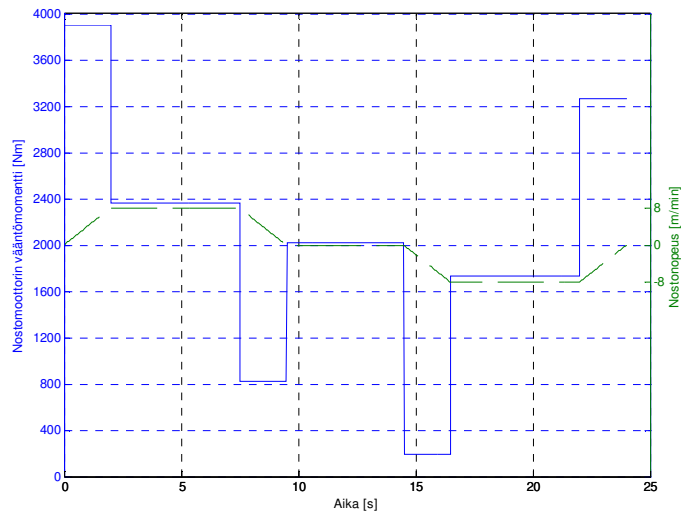
Taulukossa 2 näkyvät nosturin verkkoonjarrutuslaitteen mitoittamiseen vaikuttavat nostokoneiston tiedot. Näistä saadaan laskettua nostomoottoreiden vääntömomentit ajan funktiona kappaleen 3.1.1 yhtälöiden mukaisesti. Kun vääntömomentin lisäksi tunnetaan moottoreiden pyörimisnopeudet, voidaan laskea niiden mekaaninen teho. Tästä saadaan edelleen laskettua verkkoonjarrutuslaitteen virta yhtälöllä 3.14.

Taulukko 2. Panostusnosturin nostokoneiston tiedot.

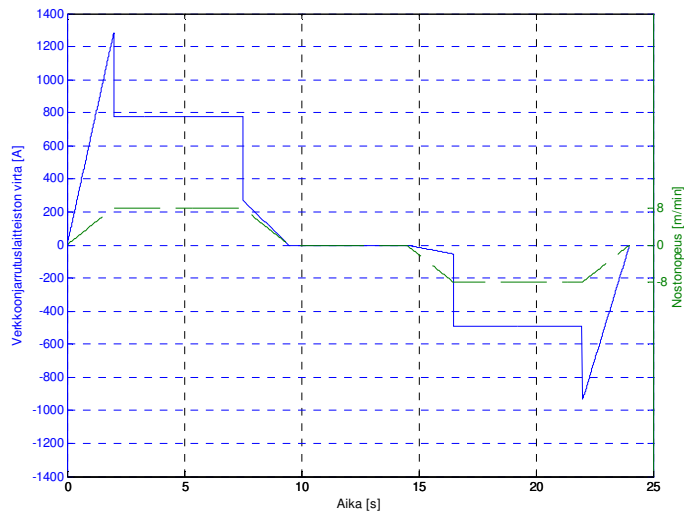
Nostettava taakka	375 t
Kuormauselimen paino	35 t
Nostonopeus	8 m/min
Kiihdytysaika	2 s
Vaihteiston välityssuhde	112
Köysitalja	8
Köysitelan säde	0,9 m
Nostomoottorin hitausmomentti	9,2 kgm <sup>2</sup>
Vaihteiston hitausmomentti	1,15 kgm <sup>2</sup>
Muut nostokoneiston hitausmomentit	12,6 kgm <sup>2</sup>
Köysistön hyötysuhde	0,882
Moottorin hyötysuhde	0,95
Moottori-invertterin hyötysuhde	0,98
Vaihteiston hyötysuhde	0,97
Nostomoottoreiden lukumäärä	2
Syöttöjännite	500 V
Nostomoottorin tehokerroin	0,84

Päänoston nostomoottorilla esiintyvät kuvan 35 mukaiset vääntömomenttitasot. Suurin vääntömomentti 3900 Nm esiintyy, kun taakkaa lähdetään kiihdyttämään levosta ylöspäin. Kuvassa 35 kiihdytys- ja hidastusvääntömomenttien ajalliset kestot ovat todellisia mutta ajoajat tasaisella nopeudella ovat huomattavasti todellista lyhyemmät kuvan selkeyden vuoksi.

Vääntömomentin ja kulmanopeuden tulona saadaan nostomoottoreiden akselitehot, joista edelleen saadaan laskettua verkkoonjarrutuslaitteen virta. Kuvassa 36 on nostokoneiston vaikutus verkkoonjarrutuslaitteen virtaan. Ennen nimellisnostonopeuden saavuttamista laskennallinen virta käy hetkellisesti arvossa 1280 A. Suurin jatkuvan tilan virta 777 A esiintyy ajettaessa nostokoneistoa ylöspäin. Alaspäin ajettaessa virran itseisarvo on koneiston häviöiden johdosta pienempi.



Kuva 35. Nostomoottorin vääntömomentti ja nostonopeus ajan funktiona. Kuvan nostokäytön sykli koostuu seuraavasti: 0...2 s taakan kiihdytys, 2...7,5 s vakionopeus, 7,5...9,5 s jarrutus, 9,5...14 s taakan pito paikallaan, 14...16,5 s taakan kiihdytys alaspäin, 16,5...22 s vakionopeus alaspäin ja 22...24 s taakan jarrutus nollanopeuteen. Ajoajat tasaisella nopeudella ovat kuvassa epärealistisen lyhyitä kuvan selkeyden vuoksi.

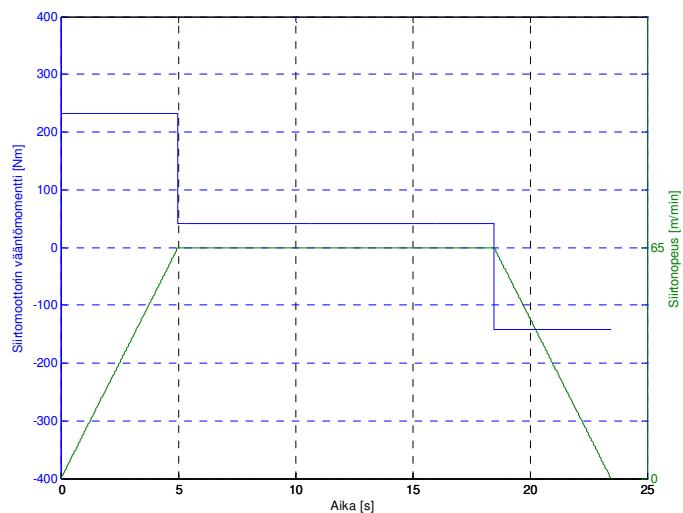


Kuva 36. Verkkosuuntaajan virran käyttäytyminen nostokoneistoa ajettaessa. Virta ylittää 0,5 sekunnin ajan jatkuvan tilan arvon 777 A ollen suurimmillaan 1280 A. Taakkaa laskettaessa verkkosuuntaajan virran ja jännitteen vaihe-ero muuttuu ja tehon suunta kääntyy. Kuvassa havainnollisuuden vuoksi on virran tehollisarvo esitetty negatiivisena taakan laskun aikana. Tässä koneiston häviöiden jälkeen noin 60 % verkosta otetusta energiasta palautuu takaisin verkkoon.

Vastaavalla tavalla saadaan laskettua sillan siirron aiheuttama verkkoonjarrutuslaitteen virta. Taulukon 3 arvoilla sillan siirtomoottoreiden vääntömomentin tasoista saadaan kappaleen 3.1.2 yhtälöillä kuvan 37 mukaiset.

Taulukko 3. Panostusnosturin siirtokoneiston tiedot.

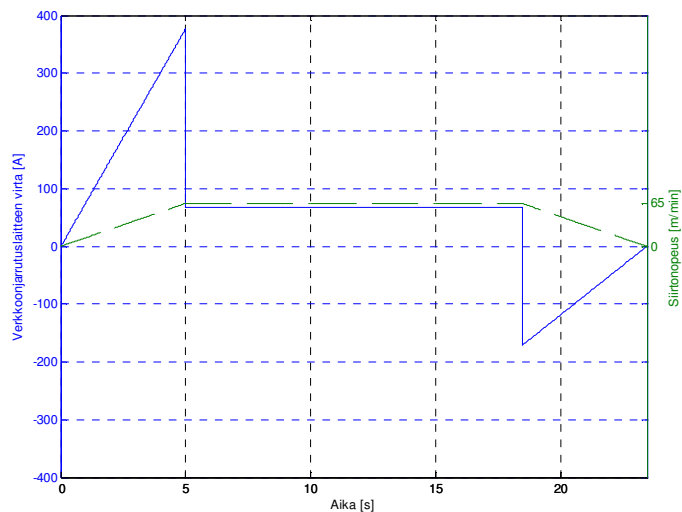
Sillan paino	375 t
Vaunun paino	162 t
Kuorma	375 t
Siirtonopeus	65 m/min
Kiihdytysaika	5 s
Kantopyörän säde	0,4 m
Siirtomoottorin hyötysuhde	0,88
Vaihteen hyötysuhde	0,98
Vaihteen välitys	55,9
Siirtokoneiston hitausmomentti	0,35 kgm <sup>2</sup>
Siirtokoneistojen määrä	8
Vierintävastuskerroin 800 mm kantopyörälle	0,0051



Kuva 37. Siirtomoottorin vääntömomentti ja siirtonopeus ajan funktiona.

Suurin siirtomoottorin vääntömomentti 230 Nm esiintyy sillan kiihdytyksen aikana. Ajo tasaisella nopeudella vaatii 42 Nm vääntömomentin. Hidastuksessa koneiston häviöiden ja vierintävastuksen vaikutuksesta tarvittava moottorin vääntömomentti on vain -142 Nm.

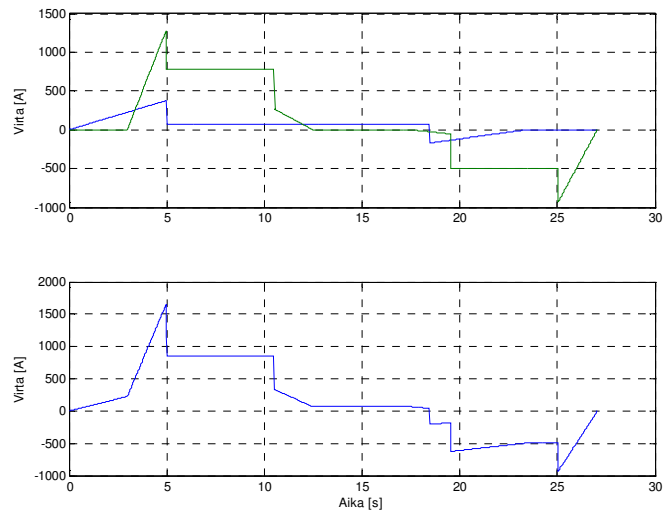
Kuvassa 38 on siirtokoneiston vaikutus verkkoonjarrutuslaitteen virtaan. Suurin virta 376 A esiintyy sillan kiihdytyksessä juuri ennen tasaisen nopeuden saavuttamista. Tasaisella nopeudella ajettaessa siirtokoneisto ottaa verkkoonjarrutuslaitteelta 67 A:n virran.



Kuva 38. Verkkosuuntaajan virta panostusnosturin sillan siirrosta. Virran suurin arvo 376 A esiintyy ennen tasaisen nopeuden saavuttamista. Tasaisella nopeudella virta on vain 67 A.

Päänoston ja sillan siirron aiheuttama verkkoonjarrutuslaitteen suurin mahdollinen kuormitusvirta esiintyy, mikäli liikkeiden maksimitehot osuvat päällekkäin. Kuvassa 39 on tilanne, jossa päänosto ja sillan siirto saavuttavan maksimitehonsa yhtä aikaa. Tämä tilanne tapahtuu kyseisellä nosturilla, kun nostokoneistolla lähdetään ajamaan ylöspäin 3 sekuntia sillan kiihdytyksen aloittamisesta. Tällöin verkkoonjarrutuslaitteen virta ylittää jatkuvan tilan virran 845 A sekunnin ajan virran maksimiarvon ollessa 1660 A.





Kuva 39. Panostusnosturin verkkoonjarrutuslaitteen maksimivirta. Kuvassa ylhäällä ovat erikseen nosto- ja siirtoliikkeen aiheuttamat verkkoonjarrutuslaitteiston virrat. Alemmassa kuvassa näkyy näiden virtojen summavirta, joka on maksimissaan 1660 A. Jatkuvan tilan virta 845 A ylittyy 1 sekunnin ajan.

Kahden sekunnin maksimivirta 250 kW:n verkkoonjarrutusyksikölle on kaksi kertaa laitteen nimellisvirta eli 920 A. Taulukon 4 mukaisesti tällöin kaksi rinnakkaista verkkoonjarrutusyksikköä olisi riittävä määrä. Mikäli kahden sekunnin ylikuormitettavuutta ei haluta käyttää mitoitusperusteena, tarvitaan vähintään kolme rinnakkaista verkkoonjarrutusyksikköä.

Taulukko 4. Tarvittava panostusnosturin verkkoonjarrutusyksiköiden lukumäärä simuloitujen virtojen mukaan.

	$I_{D2R}$ [A]	Kuormituksen kesto	$\frac{I_{D2R}}{I_{n,D2R}}$ , kun mitoitusperuste on		
			2 s virta $I_{n,D2R}=920$ A	1 min virta $I_{n,D2R}=690$ A	Jatkuva virta $I_{n,D2R}=460$ A
Maksimi	1660	Alle 1 s	1,8	2,4	
Jatkuva	845	ei rajoitusta			1,8

#### 4.2.2 Mitoitus KCI:n laskentaohjelman invertterivirtojen mukaan

KCI:n laskentaohjelma antaa taulukoiden 2 ja 3 mukaisilla lähtötiedoilla moottoriinvertterien virroiksi taulukon 5 mukaiset arvot. Yhtälöllä 3.2 saadaan laskentaohjelman invertterivirroista laskettua verkkoonjarrutuslaitteen virta kutakin liikettä kohti.

Taulukko 5. KCI:n laskentaohjelman antamista invertterivirroista lasketut verkkoonjarrutuslaitteiston virrat.

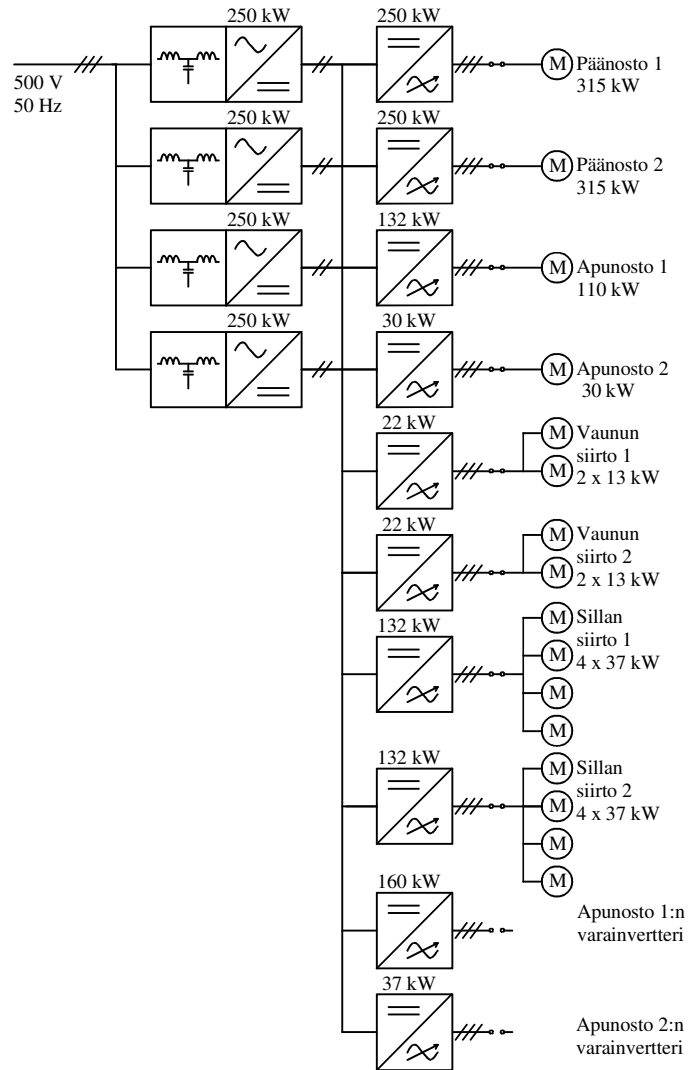
Liike	$I_{inv,max}$ [A]	$I_{inv,cont}$ [A]	$\cos(\varphi)$	$n_{inv}$	$I_{D2R,max}$ [A]	$I_{D2R,cont}$ [A]
Päänosto	678	427	0,84	2	1185	746
Apunosto 1	259	212	0,89	1	240	196
Apunosto 2	55	49	0,82	1	47	42
Silta	289	91	0,91	2	547	172

Taulukossa 6 näkyy tarvittava verkkoonjarrutusyksiköiden lukumäärä, kun otetaan huomioon päänosto ja sillan siirto. Tämän tarkastelun mukaan tarvitaan 3 verkkoonjarrutusyksikköä, jotta suurinta sallittua yhden minuutin kuormitettavuutta ei ylitetä. Maksimivirta esiintyy, kun koneistot kiihdyttävät yhtä aikaa. Koska sillan kiihdytysramppi on 5 s ja noston 2 s, ei maksimivirta voi olla kestoaltaan yli 5 s. Prosessin aikana käytettävän nostomatkan ajo 5,7 m nimellisuopeudella 8 m/s vie aikaa vähintään 40 s. Näin ollen sallittu yhden minuutin ylikuormitus 10 minuutin välein ei ylity.

Taulukko 6. Verkkoonjarrutusyksiköiden lukumäärä laskentaohjelman virtojen perusteella.

	$I_{D2R}$ [A]	Kuormituksen kesto	$\frac{I_{D2R}}{I_{n,D2R}}$ , kun mitoitusperuste on	
			1 min virta $I_{n,D2R}=690$ A	Jatkuva virta $I_{n,D2R}=460$ A
Maksimi	1732	alle 1 min	2,5	
Jatkuva	918	ei rajoitusta		2,0

Koska kyseessä on terästehdasnosturi, vaaditaan vielä neljäs verkkoonjarrutusyksikkö varalaitteeksi. Kuvassa 40 on verkkoonjarruttavan panostusnosturin 1-tiekaavio. Moottorit ovat samat kuin vastusjarruttavassa versiossa ja taajuusmuuttajat saman tehoisia yhteiseen välipiiriin kytkettäviä taajuusmuuttajia, joissa ei ole tulosiltaa eikä tulokuris-tinta.



Kuva 40. Verkkoonjarruttava panostusnosturi.

### 4.3 Verkkoonjarruttava RMG-nosturi

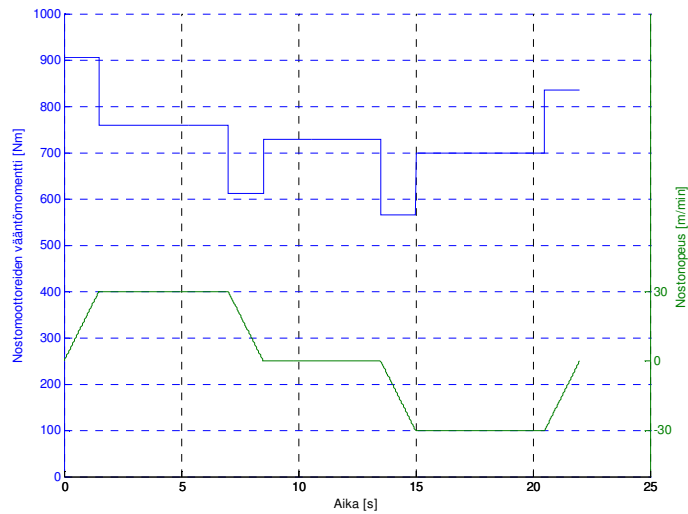
Aiemmin kappaleessa 2.3 esitellyn vastusjarruttavan RMG-nosturin mekaanisista tiedoista ja suoritusarvoista on laskettu mekaaniset tehot nosto- ja siirtoliikkeessä. Näistä on saatu laskennalliset verkkoonjarrutuslaitteiston virrat.

Taulukossa 7 näkyvät nosturin verkkoonjarrutuslaitteen mitoitusvaikuttavat nostokoneiston tiedot. Näistä saadaan laskettua nostomoottoreiden vääntömomentit ajan funktiona kappaleen 3.1.1 yhtälöiden mukaisesti. Kun vääntömomentin lisäksi tunnetaan moottoreiden pyörimisnopeudet, voidaan laskea niiden mekaaninen teho. Tästä saadaan edelleen laskettua verkkoonjarrutuslaitteen virta.

Taulukko 7. RMG-nosturin nostokoneiston tiedot.

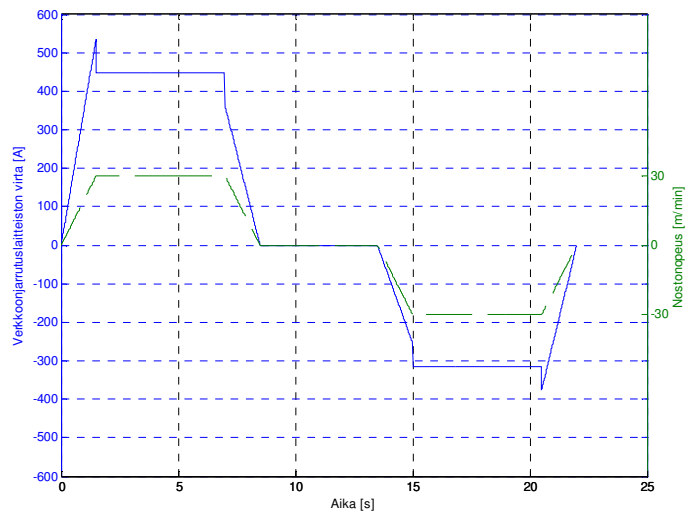
Nostettava taakka	40 t
Kuormauselimen paino	13 t
Nostonopeus	30 m/min
Kiihdytysaika	1,5 s
Vaihteiston välityssuhde	58,0
Köysitalja	2
Köysitelan säde	0,325 m
Nostomoottorin hitausmomentti	0,540 kgm <sup>2</sup>
Muut nostokoneiston hitausmomentit	0,432 kgm <sup>2</sup>
Köysistön hyötysuhde	0,99
Moottorin hyötysuhde	0,89
Moottori-invertterin hyötysuhde	0,98
Vaihteiston hyötysuhde	0,97
Nostokoneistojen lukumäärä	2
Syöttöverkon jännite	400 V

Nostomoottorien vääntömomentiksi ajan funktiona saadaan kuvan 41 mukainen kuvaaja. Suurin vääntömomentti 905 Nm esiintyy, kun taakkaa lähdetään kiihdyttämään ylöspäin.



Kuva 41. RMG-nosturin laskennallinen nostomoottorin vääntömomentti. Suurin vääntömomentti 905 Nm esiintyy kiihdytyksessä ylöspäin. Ajoajat tasaisella nopeudella ovat kuvassa epärealistisen lyhyitä kuvan selkeyden vuoksi.

Vääntömomentin ja kulmanopeuden tulona saadaan nostomoottoreiden akselitehot, joista edelleen saadaan laskettua verkkoonjarrutuslaitteen virta. Kuvassa 42 on nostokoneiston vaikutus verkkoonjarrutuslaitteen virtaan. Ennen nimellisnostonopeuden saavuttamista laskennallinen virta käy hetkellisesti arvossa 534 A. Suurin jatkuvan tilan virta 448 A esiintyy ajettaessa nostokoneistoa ylöspäin.

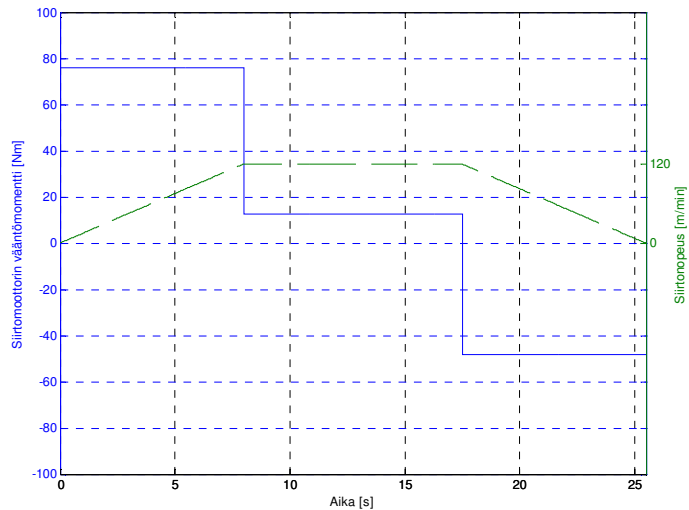


Kuva 42. RMG-nosturin nostokoneiston aiheuttama verkkoonjarrutuslaitteen laskennallinen virta. Suurin virta 534 A esiintyy nostossa juuri ennen maksiminostonopeuden saavuttamista. Noston jatkuvan tilan virta on 448 A.

Taulukossa 8 ovat nosturin siirtokoneiston tiedot, joiden perusteella saadaan kappaleen 3.1.2 yhtälöillä siirtomoottorien vääntömomenteiksi ilman tuulikuormaa kuvan 43 mukainen kuvaaja.

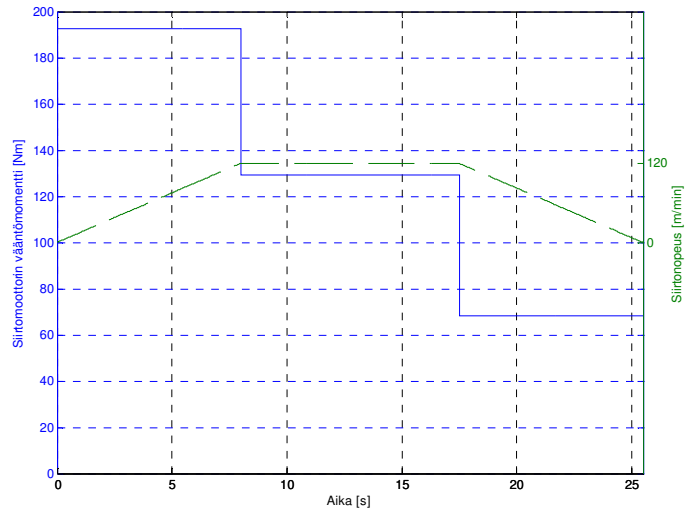
Taulukko 8. RMG-nosturin siirtokoneiston tiedot.

Pukin paino	155 t
Vaunun paino	65 t
Kuorma	53 t
Siirtonopeus	120 m/min
Kiihdytysaika	8 s
Kantopyörän säde	0,315 m
Siirtomoottorin hyötysuhde	0,85
Vaihteen hyötysuhde	0,97
Vaihteen välitys	29,33
Siirtokoneiston hitausmomentti	0,0477 kgm <sup>2</sup>
Siirtokoneistojen määrä	12
Vierintävastuskerroin 630 mm kantopyörälle	0,0051



Kuva 43. RMG-nosturin siirtomoottorin vääntömomentti ilman tuulikuormaa. Kiihdytyksessä vääntömomentti on 76 Nm, tasaisella nopeudella ajettaessa 12,6 Nm ja hidastuksessa -48 Nm.

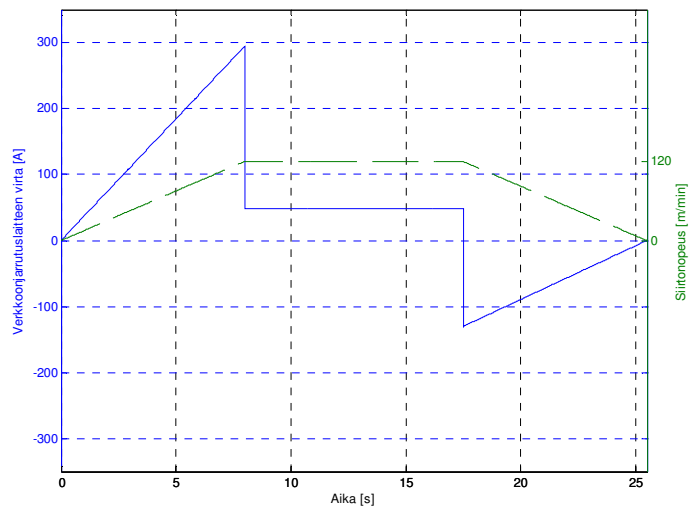
Kyseiselle nosturille on laskettu tuulikuorman tuulenopeudella 20 m/s olevan 127 kN. Tuulikuorman aiheuttamaksi vääntömomentiksi vastatuulen ajettaessa tulee yhtälön 3.18 mukaan 117 Nm. Pukin siirtomoottorien vääntömomentiksi tulee tällöin kuvan 44 mukainen.



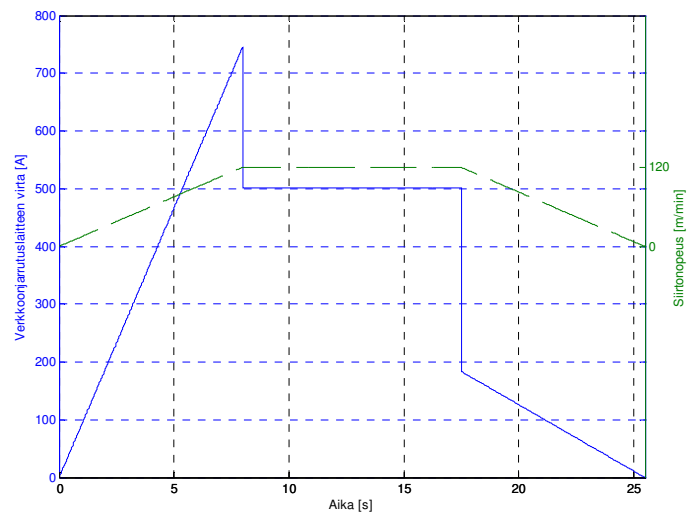
Kuva 44. RMG-nosturin siirtomoottorin vääntömomentti 20 m/s vastatuulella. Tuulikuorma aiheuttaa 117 Nm vääntömomentin yhtä siirtomoottoria kohden. Tällöin kiihdytyksessä vääntömomentti on 193 Nm, tasaisella nopeudella ajettaessa 130 Nm ja hidastuksessa 69 Nm. Tällä tuulikuormalla nosturi pysähtyisi itsestään määriteltyä hidastusrampia nopeammin, joten hidastuksenkin aikana siirtomoottorin vääntömomentti on positiivinen.

Kuvassa 45 on siirtokoneiston vaikutus verkkoonjarrutuslaitteen virtaan ilman tuulikuormaa. Verkkoonjarrutuslaitteiston virraksi tasaisella nopeudella tulee 48 A. Kiihdytyksen lopussa esiintyvä maksimivirta on 296 A.

Kuvassa 46 on verkkoonjarrutuslaitteiston virta ajettaessa pukkia vastatuuleen tuulenopeuden ollessa 20 m/s. Verkkoonjarrutuslaitteiston virraksi tasaisella nopeudella tulee 500 A ja kiihdytyksen lopussa esiintyväksi maksimivirraksi 745 A. Tuulikuorma kasvattaa täten pukin kiihdytyksen aiheuttaman verkkoonjarrutuslaitteen maksimivirran 2,5-kertaiseksi ja jatkuvan tilan virran 10-kertaiseksi.



Kuva 45. RMG-nosturin verkkoonjarrutuslaitteen laskennallinen virta pukin siirrossa ilman tuulikuormaa. Kiihdytyksessä verkkoonjarrutuslaitteiston virta on maksimissaan 296 A, tasaisella nopeudella ajettaessa 48 A ja hidastuksen alussa  $-128$  A.

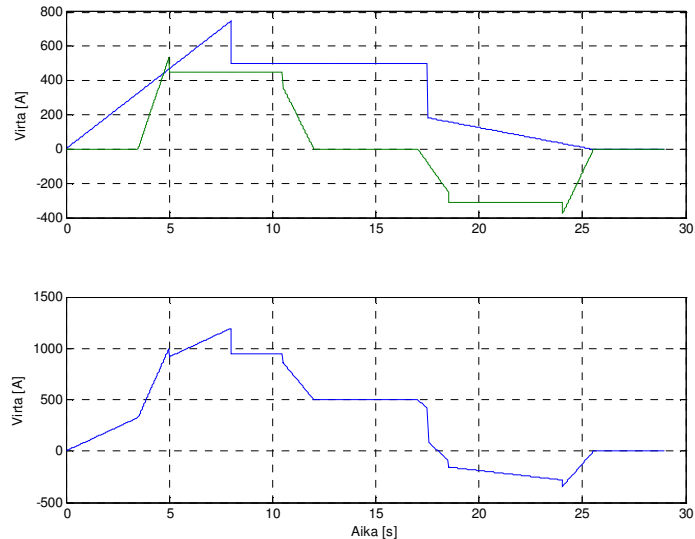


Kuva 46. RMG-nosturin verkkoonjarrutuslaitteen laskennallinen virta pukin siirrossa, kun vastatuulta on 20 m/s. Maksimivirta on 745 A ja jatkuvan tilan virta tasaisella nopeudella 500 A. Hidastuksessa tuulikuorman johdosta energiaa ei siirry lainkaan sähköverkkoon.

Tarkastellaan verkkoonjarrutuslaitteistoa mitoitettaessa pahinta mahdollista tilannetta, eli pukin ajoa kovaan vastatuuleen. Päänoston ja sillan siirron aiheuttama verkkoonjarrutuslaitteen suurin mahdollinen kuormitusvirta 1279 A esiintyy, mikäli liikkeiden mak-



simitehot osuvat päällekkäin. Pitkäkestoisin jatkuvan tilan arvon ylittävä kuormitus esiintyy, mikäli 3,5 sekunnin pukin kiihdytyksen jälkeen nostoa lähdetään ajamaan ylös täydellä nopeudella kuvan 47 mukaisesti. Tällöin virta ylittää jatkuvan tilan arvon kolmen sekunnin ajan käyden maksimissaan arvossa 1193 A.



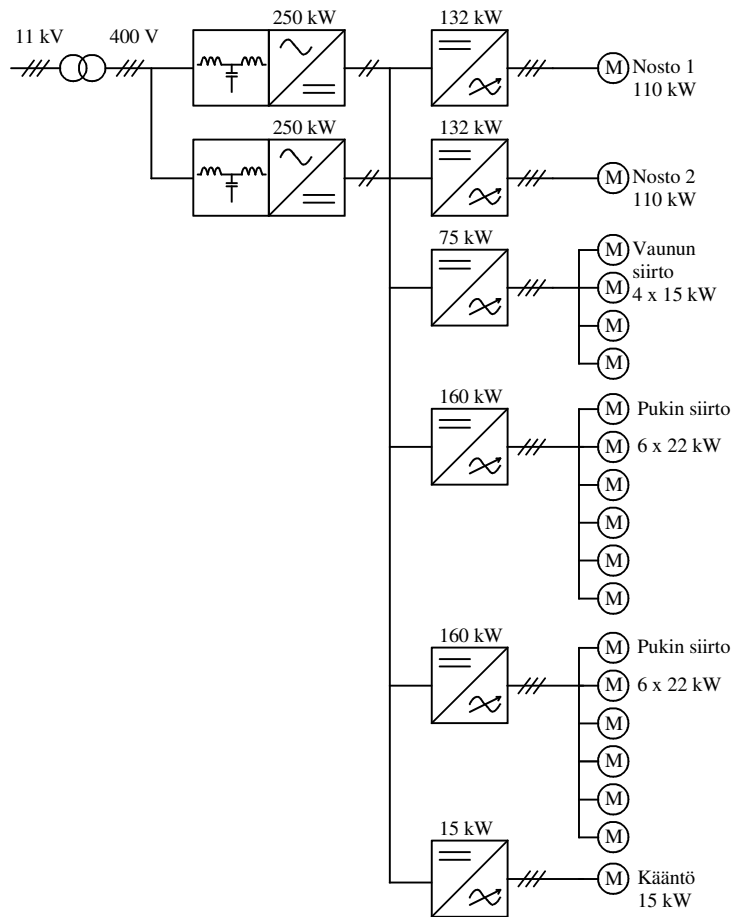
Kuva 47. RMG-nosturin verkkoonjarrutuslaitteiston pitkäkestoisin ylikuormitus. Kuvassa ylhäällä ovat erikseen nosto- ja siirtoliikkeen aiheuttamat verkkoonjarrutuslaitteiston virrat. Alemmassa kuvassa näkyvät näiden virtojen summa. Jatkuvan tilan summavirta voi ylittyä enintään kolmen sekunnin ajan.

Tällainen tilanne voi tulla kyseeseen, jos kontteja siirrellään nosturiradan suuntaisesti. Tilanne voi toistua aikaisintaan sen jälkeen, kun siirretty kontti on irrotettu tartuntaeliimestä ja uuteen konttiin on tartuttu. Pukin pysäytys maksiminopeudesta vie aikaa hidastusrampin verran eli 8 s. Nostokoneiston pitää samanaikaisesti vaihtaa suuntaa, ajaa takaisin alas 4,5 s ja hidastaa nollanopeuteen. Tähän kuluu aikaa kolmen 1,5 s hidastusrampin ja 4,5 s tasaisen ajon verran eli 9 s. Jos seuraava nostettava kontti sijaitsee aivan lasketun kontin vieressä, ajetaan pukkia kontin leveyden verran eli 2,6 metriä ajassa 6,5 s. Konttiin tarttuminen vie tyypillisesti 15 s. Seuraava 3 s ylikuormitus voi tällöin tapahtua aikaisintaan 34 s kuluttua, joten sallittua ylikuormitettavuutta ei voida ylittää.

Taulukon 9 mukaisesti rinnakkaisia verkkoonjarrutusyksiköitä tarvitaan kaksi kappaletta. Kuvassa 48 on verkkoonjarruttavan RMG-nosturin 1-tiekaavio.

Taulukko 9. Tarvittava RMG-nosturin verkkoonjarrutusyksiköiden lukumäärä simuloitujen virtojen mukaan.

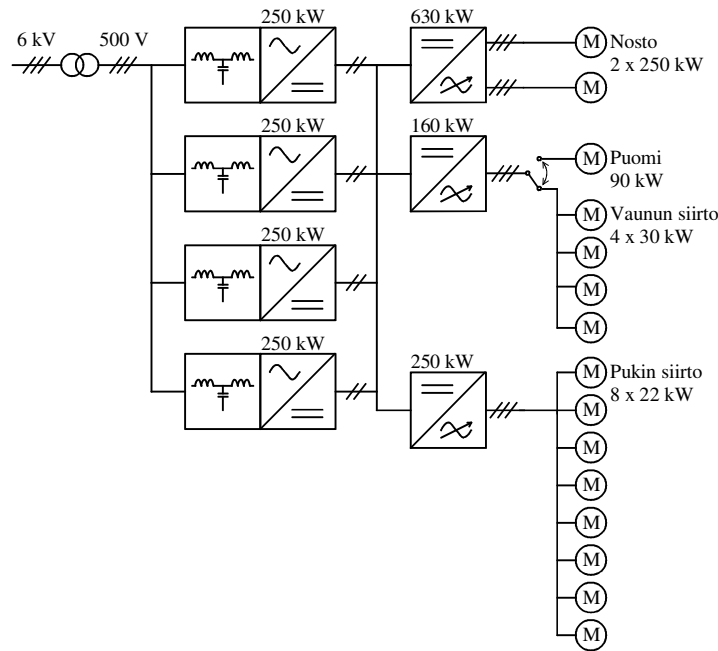
	$I_{D2R}$ [A]	Kuormituksen kesto	$\frac{I_{D2R}}{I_{n,D2R}}$ , kun mitoitusperuste on		
			2 s virta $I_{n,D2R}=920$ A	1 min virta $I_{n,D2R}=690$ A	Jatkuva virta $I_{n,D2R}=460$ A
Maksimi	1279	3 s	1,4	1,8	
Jatkuva	845	ei rajoitusta			2,06



Kuva 48. Verkkoonjarruttavan RMG-nosturin 1-tiekaavio.

#### 4.4 Uuden verkkoonjarrutuskonseptin mukainen STS-nosturi

Edellisen sukupolven verkkoonjarrutuslaitteella STS-nosturin tehonsyöttö on toteutettu 630:n ja 400 kW:n yksiköillä. Näitä vastaa virraltaan neljän uuden sukupolven yksikön rinnankytkentä. Kuvassa 49 on 1-tiekaavio STS-nosturista, jossa verkkoonjarrutus on toteutettu neljällä rinnakkaisella 250 kW:n yksiköllä.



Kuva 49. Uuden verkkoonjarrutuskonseptin mukaisen STS-nosturin 1-tiekaavio.

#### 4.5 Uuden verkkoonjarrutuskonseptin mukainen AGD -nosturi

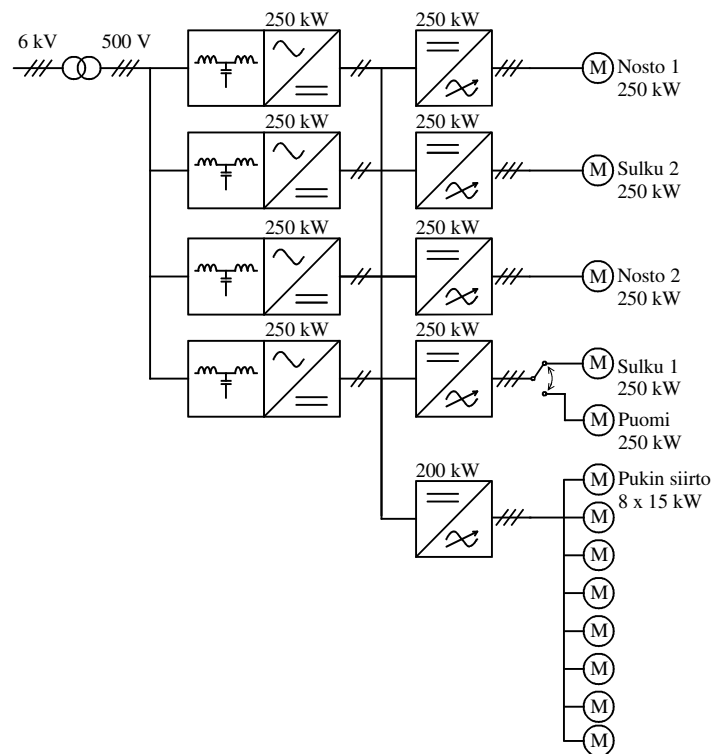
Edellisen sukupolven verkkoonjarrutuslaitteella toteutetussa AGD-nosturissa on kuvan 29 mukaisesti kaksi 500 kW:n verkkoonjarrutuslaitetta. Kyseisten verkkoonjarrutuslaitteiden nimellisvirtojen ollessa 840 A, on kahden laitteen kokonaisvirta 1680 A. Vastaa- van kokonaisvirran saavuttamiseksi on uuden sukupolven verkkoonjarrutusyksiköitä kytkettävä rinnan neljä kappaletta.

Koska uudella ratkaisulla kaikkien neljän nostokoneiston invertterit ovat samassa väli- piirissä kaikkien verkkoonjarrutusyksiköiden kanssa, voidaan tarkastella näiden koko- naistehoa. Taulukon 10 lähtötiedoilla saadaan yhtälöllä 1.2 nostomoottoreiden koko- naisakselitehoksi nimellisuopeudella ja nimelliskuormalla 1038 kW. Tästä saadaan yh-

tälöiden 3.13 ja 3.14 mukaisesti verkkoonjarrutuslaitteiston virraksi 1260 A. Pukin siirrossa on käytetty 200 kW:n taajuusmuuttajaa, jonka nimellisvirta on 410 A. Verkkoonjarrutuslaitteiston jatkuvan tilan virta on siten maksimissaan 1670 A, jolloin neljän rinnan kytketyn 250 kW:n verkkoonjarrutusyksikön yhdistelmä riittää myös pukin siirtoon. Kuvassa 50 on 1-tiekaavio uuden verkkoonjarrutuskonseptin mukaisesta AGD-nosturista.

Taulukko 10. AGD-nosturin nostokoneiston tietoja.

Nostettava taakka	19,3 t
Kuormauselimen paino	12,7 t
Nostonopeus	180 m/min
Kiihdytysaika	2,5 s
Köysistön hyötysuhde	0,936
Moottorin hyötysuhde	0,94
Moottori-invertterin hyötysuhde	0,98
Vaihteiston hyötysuhde	0,98
Syöttöjännite	500 V



Kuva 50. Uuden verkkoonjarrutuskonseptin mukaisen AGD-nosturin 1-tiekaavio.

## 5 HYÖTYJARRUTUKSELLA SAATAVA ENERGIANSÄÄSTÖ

Energiansäästö-laskelmissa on rajoitettu tarkastelemaan pelkkää nostoliikettä, koska siirtoliikkeen jarrutusenergia nostoliikkeen jarrutusenergiaan verrattuna on tyypillisesti vain noin kymmenesosa. Laskelmat perustuvat kunkin nosturin tyypillisen työsyklin mukaisiin nostomatkoihin ja kuormiin.

Prosessinostureissa työsyklin määrittäminen on helppoa, koska prosessinosturin ajo on yleensä jatkuvaa ja työsyklit ovat keskenään identtisiä. Tällaisia kiinteän työsyklin nostureista ovat tässä jätteenkäsittelynosturi ja terästehdasnosturi. RMG-, STS- ja AGD-nostureilla ei sitä vastoin ole mitään tiettyä ennalta määriteltyä työsykliä. Näiden nostureiden käyttöaste vaihtelee suuresti sataman tai terminaalin mukaan. Niinpä näille nostureille on laskettu energiansäästö tyypillisen työsyklin mukaan jatkuvalla käytöllä. Tämä antaa teoreettisen maksimiarvon saavutettavalle energiansäästölle. Tästä on edelleen arvioitu kunkin nosturin todellinen käyttöaste ja sen mukainen energian säästö. Nostokoneiston kokonaishyötysuhteena laskelmissa on käytetty arvoa 0,85.

### 5.1 Energian säästö nostoliikkeessä verkkoonjarrutuksen ansiosta

Potentiaalienergia  $E_p$  on

$$E_p = mgh, \quad (5.1)$$

missä  $m$  on massa,  $g$  putoamiskiihtyvyyden ja  $h$  korkeus. Nosturin nostoliikkeessä sähköverkosta otettu energia kuluu taakan potentiaalienergian muutokseen ja laitteiston häviöihin. Kun nosturin kokonaishyötysuhde noston osalta tunnetaan, saadaan sähköverkosta otetuksi energiaksi  $E_{\text{verkko},1}$  nostettavan massan ja nostokorkeuden avulla yhden työsyklin aikana

$$E_{\text{verkko},1} = \frac{g}{\eta_{\text{nosto,kok}}} \sum_{i=1}^n (m_i h_i), \quad (5.2)$$

missä  $m_i$  on nostettava kokonaismassa ja  $h_i$  nostomatka kyseisellä massalla. Yhteen työsykliin sisältyvät nostot jaetaan siis paloittain kuorman vaihteluiden mukaan.

Vastaavasti sähköverkkoon palautuva energia  $E_{\text{verkko},2}$  työsyklin aikana on

$$E_{\text{verkko},2} = \eta_{\text{nosto,kok}} g \sum_{i=1}^n (m_i h_i), \quad (5.3)$$

missä  $m_i$  on laskettava kokonaismassa ja  $h_i$  laskumatka kyseisellä massalla.

Jarrutuksen aikana nostokoneistossa syntyvä sähköteho ei kokonaan mene sähköverkkoon, vaan osa tehosta kuluu esimerkiksi siirtoliikkeen invertterien tyhjäkäyntihäviöiksi. Tyhjäkäyntihäviöteho otettaisiin kuitenkin joka tapauksessa sähköverkosta, joten nostokoneiston synnyttämän jarrutustehon voidaan katsoa olevan kokonaisuudessaan säästettyä tehoa. Vakiintunut yksikkö sähköenergialle on kilowattitunti ja massan yksikkö nosturien yhteydessä tonni. Yksi kilowattitunti on 3,6 megajoulea ja yksi tonni on 1000 kg.

### 5.1.1 WTE-nosturin nostokoneiston energiansäästö

WTE-nosturin työsykli koostuu neljästä osasta. Nämä ovat jätteen siirto purkualueelta siiloon, purkualueelta varastoon, varastosta siiloon ja sekoitus. Liitteen 1 mukaisen työsyklin perusteella saadaan nostokoneiston vuotuiseksi sähköverkosta ottamaksi energiaksi 206,8 MJ eli 57,4 MWh. Sähköverkkoon palautuva energia on 96,9 MJ eli 26,9 MWh. Vuotuisesti säästökseen sähkön hinnalla 50 €/MWh tulee 1345 euroa. Prosentuaalinen sähkön säästö nostokoneiston osalta on 47 %. Verkkovaihtosuuntaajan aiheuttaman nosturin hinnan nousun takaisinmaksuajaksi tulee 2,2 vuotta.

### 5.1.2 Panostusnosturin nostokoneiston energiansäästö

Erään nimellisnostokyvyltään 300 tonnin panostusnosturin työsyklin tiedot ovat liitteessä 2. Tällä työsyklillä nostokoneiston vuotuinen sähköverkosta ottama energia on 611,0 MJ eli 169,7 MWh. Sähköverkkoon palautuva energia on 126,3 MJ eli 35,1 MWh. Vuotuisesti säästökseen sähkön hinnalla 50 €/MWh tulee 1760 euroa. Prosentuaalinen sähkön säästö nostokoneiston osalta on noin 20 %. Verkkovaihtosuuntaajan aiheuttaman nosturin hinnan nousun takaisinmaksuajaksi tulee 2,8 vuotta.

### 5.1.3 RMG-nosturin nostokoneiston energiansäästö

RMG-nosturin tyypillinen työsykli on liitteessä 3. Olettamalla nosturin keskimääräiseksi kapasiteetiksi 25 konttia tunnissa, saadaan vuotuisesti työsykliä jatkuvalla ajolla 219000. Kontin keskimääräiseksi painoksi oletetaan 20 tonnia. Tällä työsyklillä nostokoneiston vuotuinen sähköverkosta ottama energia on 947,82 GJ eli 263,3 MWh. Sähköverkkoon palautuva energia on 684,8 GJ eli 190,2 MWh.

Vuotuisesti säästöksi sähkön hinnalla 50 €/MWh tulee 9510 euroa. Prosentuaalinen sähkösäästö nostokoneiston osalta on 72 %. Tyypillisesti RMG-nosturilla ajetaan kahdessa vuorossa, eli 16 h vuorokaudessa. Tällöin käyttötunteja vuodessa tulee 5800. Tällöin vuotuisesti energian säästöksi tulisi noin 125 MWh, mikä vastaa sähkön hinnalla 50 €/MWh 6250 euron säästöä. Verkkovaihtosuuntaajan aiheuttaman nosturin hinnan nousun takaisinmaksuajaksi tällä käyttöasteella tulee 1 vuosi.

### 5.1.4 STS-nosturin nostokoneiston energiansäästö

STS-nosturin työsyklin selvittämiseksi analysoitiin erään STS-nosturin tiedonkeruujärjestelmän dataa kahdeksan tuntia kestäneen laivan lastauksen ajalta. Tänä aikana siirrettiin laivaan 218 konttia, jolloin keskimääräiseksi kapasiteetiksi tuli 27,25 konttia tunnissa. Kontin keskimääräinen paino oli 28 tonnia konttitarraimen painaessa 13 tonnia. Kontit nostettiin laiturin tasolta laivaan keskimäärin 3 metrin korkeudella. Kontit nostettiin siirron aikana 14 metrin korkeuteen. Liitteessä 4 näkyy nosturin tyypillinen työsykli ja kuvaaja konttitarraimen liikkeistä 10 minuutin aikana.

Olettamalla käyttö jatkuvaksi, saadaan vuosittaiseksi työsykliä jatkuvaksi 238700. Tällä työsyklillä nostokoneiston vuotuinen sähköverkosta ottama energia on 1975 GJ eli 548,6 MWh. Sähköverkkoon palautuva energia on 1260 MJ eli 350 MWh.

Vuotuisesti säästöksi sähkön hinnalla 50 €/MWh tulee 17500 euroa. Prosentuaalinen sähkösäästö nostokoneiston osalta on 63 %. STS-nosturin käyttöaste vaihtelee suuresti eri satamien ja satamaoperaattorien kesken. Jos nosturilla ajettaisiin kahdessa vuorossa viitenä päivänä viikossa, tulisi työsyklejä vuodessa 113600. Tällöin vuotuisesti energi-

an säästökseksi tulisi noin 160 MWh, mikä vastaa sähkön hinnalla 50 €/MWh 8330 euron säästöä.

### **5.1.5 AGD-nosturin nostokoneiston energiansäästö**

AGD-nosturin teoreettinen sykli aika maksimikapasiteetilla 1500 tonnia tunnissa on 47 s. Keskimääräinen kapasiteetti on 1250 t/h syklin ajan ollessa tällöin 65 s. Olettamalla käyttö jatkuvaksi, saadaan vuosittaiseksi työsykliä määräksi 485000. Tyhjän kahmarin painon ollessa 12,7 t ja hyötykuorman 19,3 t, saadaan liitteen 5 mukaisella työsyklillä nostokoneiston vuotuisesti sähköverkosta ottamaksi energiaksi 3582 GJ eli 995 MWh. Sähköverkkoon palautuva energia on 1030 MJ eli 285 MWh.

Vuotuisesti säästökseksi sähkön hinnalla 50 €/MWh tulee 14250 euroa. Prosentuaalinen sähkönsäästö nostokoneiston osalta on 28 %. Jos AGD-nosturilla ajettaisiin kolme täyttä vuorokautta viikossa, tulisi työsyklejä vuodessa 208000. Tällöin vuotuisesti energian säästökseksi tulisi noin 122 MWh, mikä vastaa sähkön hinnalla 50 €/MWh 6100 euron säästöä.

## **5.2 Yhteenveto energiansäästölaskelmista**

Teoreettisen maksimi arvon verkkoonjarrutuksella saatavissa olevalle energian säästölle määrää nosturin kokonaishyötysuhde. Laskelmissa käytetty arvo 0,85 edustaa hyvää hyötysuhdetta nosturissa. Esimerkiksi kappaleen 4 taulukoiden 2 ja 7 arvoilla saadaan kyseisen panostusnosturin hyötysuhteeksi 0,80 ja RMG-nosturin hyötysuhteeksi 0,84. Tämä on hyötysuhde yhteen suuntaan eli sähköverkosta kuorman mekaaniseksi tehoksi. Sähköverkkoon palautuvan energian osuus on maksimissaan hyötysuhteen neliö, jolloin kappaleen 4 panostusnosturin teoreettinen maksimi nostoliikkeen sähkön säästölle on 64 % ja RMG-nosturin 70 %. Mikäli laskettava kuorma on nostettavaa kuormaa pienempi, pienenee verkkoon syötettävän energian osuus entisestään. Taulukossa 11 on esitetty arviot aiemmin käsiteltyjen nosturien energian säästöstä nostokoneiston osalta.



Taulukko 11. Verkkoonjarrutuksen ansiosta saatava energiansäästö nostokoneiston osalta eri nostureissa.

Nosturityyppi	Energian säästä jatkuvala käytöllä		Energian säästö todellisen käytön mukaan		Suhteellinen energian säästö
	[MWh]	[€]	[MWh]	[€]	
STS	350	17500	160	8330	63 %
AGD	285	14250	122	6100	28 %
RMG	190	9510	125	6250	72 %
Panostusnosturi	35	1750			20 %
WTE	27	1350			47 %

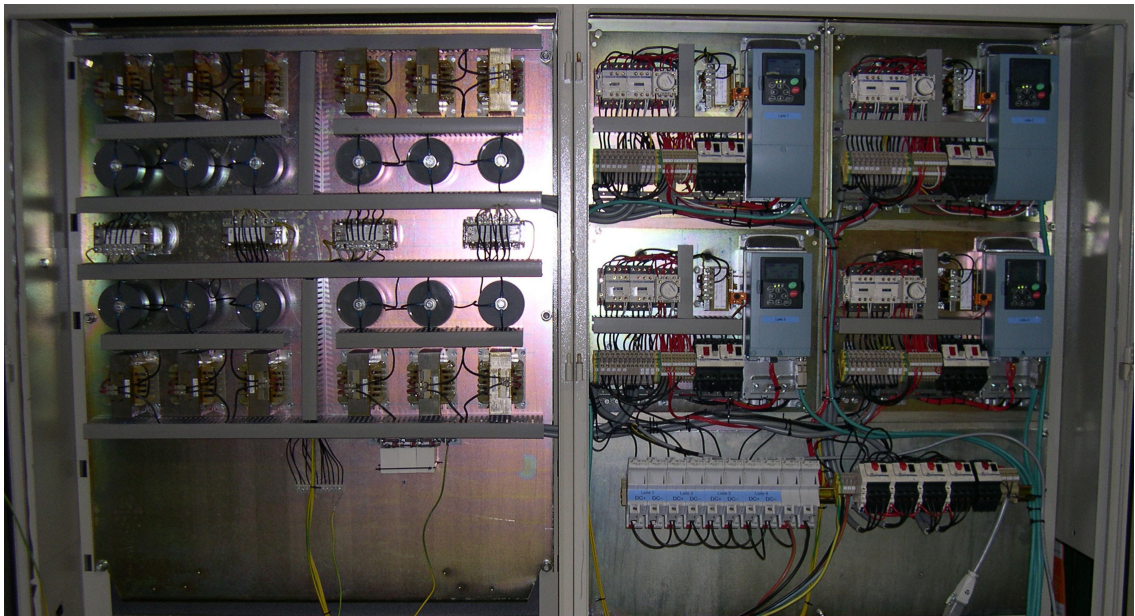
Konttinostureissa suhteellinen energian säästö on suurin, koska kuorma pysyy saman painoisena noston ja laskun ajan. AGD- ja panostusnosturissa laskettava kuorma on nostettavaa kuormaa pienempi, jolloin suhteellinen energian säästö on matala. AGD-nosturin työsykli on kuitenkin niin nopea, että todellisesta energian säästästä tulee merkittävä. Panostusnosturin käytöt ovat teholtaan suuria, mutta tarkastellun nosturin työsyklissä vain noin 10 % on ajoa päänostokoneistolla. Tästä seuraa, että verkkoonjarrutuksen avulla saatava energian säästö panostusnosturissa on lähes merkityksetön. Vaikka tarkastellun WTE-nosturin suhteellinen energian säästö on kohtalaisen hyvä, jää todellinen energian säästö käyttöjen matalan tehon johdosta alhaiseksi.

## 6 MITTAUKSET LABORATORIOLAITTEISTOLLA JA NOSTURISSA

Ennen ensimmäisen uuden sukupolven verkkoonjarrutuslaitteen asiakastoimitusta järjestelmän toimintaa testattiin laboratoriolaitteistolla. Laboratoriolaitteisto on toteutettu pienemmillä ja rakenteeltaan hieman erilaisilla verkkosuuntaajilla, joten varsinaisen tuotantoon tulevan verkkoonjarrutuslaitteiston toiminta varmistettiin vielä mittauksilla oikeassa nosturissa.

### 6.1 Mittaukset laboratoriolaitteistolla

Testilaitteisto koostuu neljästä nimellisteholtaan 4 kW:n verkkovaihtosuuntaajasta, jotka ovat kytketyt yhteiseen välipiiriin. Jokaisella laitteella on oma *LCL*-suodatin. Laboratoriolaitteistossa käytettävät verkkovaihtosuuntaajat ovat tavallisia KCI:n moottorinvertterejä, joihin on ladattu verkkoonjarrutusohjelmisto. Tässä tapauksessa niiden tasountaussilta jätetään kytkemättä ja sähköverkon vaiheet kytketään liittimiin, joihin normaalisti tulisivat moottorikaapelit. Kuvassa 51 näkyy laboratoriolaitteisto.

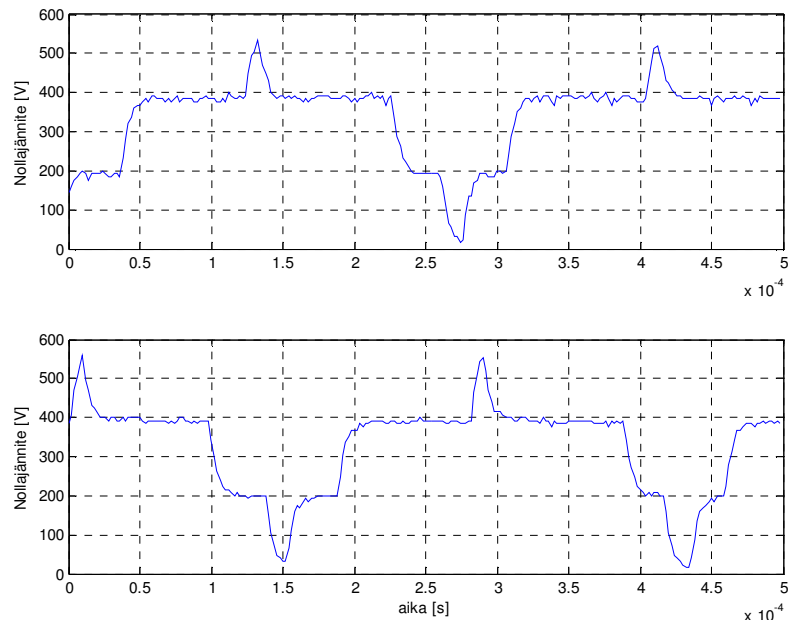


Kuva 51. Laboratoriolaitteisto.

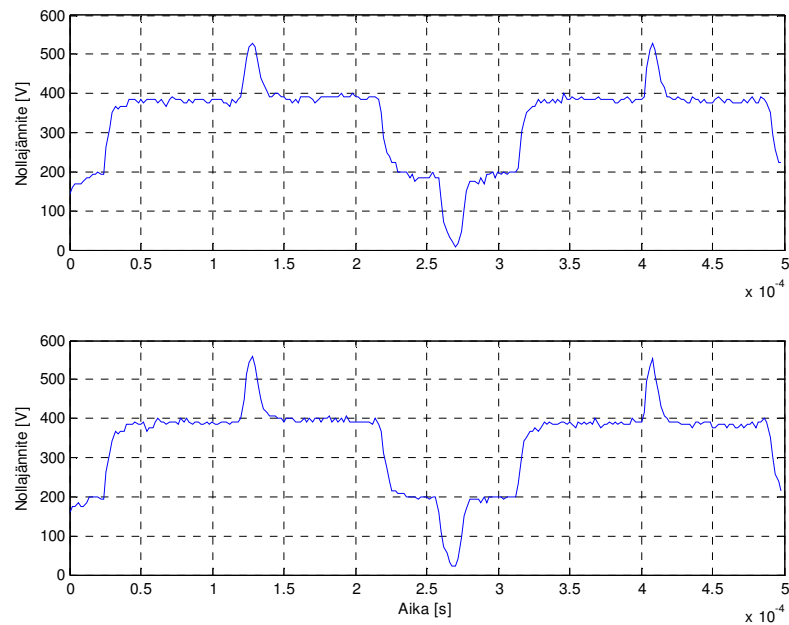
### 6.1.1 Nollavirran säädön toiminta

Nollavirran säädön toiminnan toteamiseksi kahdesta rinnan käyvästä laitteesta mitattiin nollajännitteet ilman nollavirran säätöä ja säädön kanssa. Mittausta varten muodostettiin  $1\text{ M}\Omega$ :n vastuksista virtuaalinen tähtipiste molemmille laitteille *LCL*-suodattimen ja invertteriosan väliin. Oskilloskoopilla mitattiin näiden tähtipisteiden ja välipiirin negatiivisen kiskon välinen jännite. Lisäksi toisesta laitteesta mitattiin vaihevirrat, joiden summana saadaan laskettua piirissä kulkeva nollavirta.

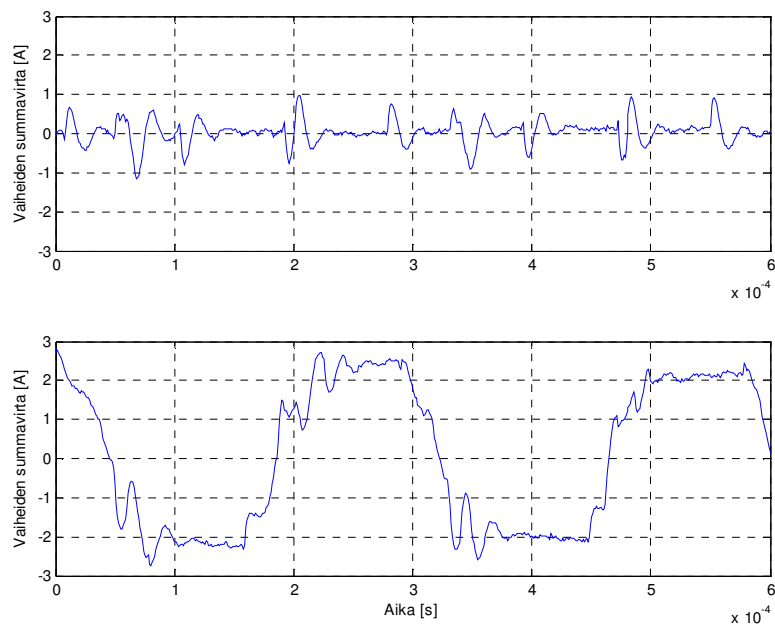
Kuvassa 52 ovat kahden rinnan käyvän laitteen mitatut nollajännitteet ilman PWM-pulssien synkronointia. Tällöin nollajännitteiden välillä on noin 150 asteen vaihesiirto. Kuvassa 53 näkyy vastaava tilanne PWM-pulssien synkronoinnin ollessa käytössä. Tällöin kummankin laitteen nollajännitteet ovat samanvaiheiset. Toisesta rinnankäyvästä laitteesta mitattiin myös vaihevirrat. Normaalissa kiertovirrattomassa kolmivaihejärjestelmässä vaihevirtojen summa on nolla. Täten vaihevirtojen summana saadaan yhteisluotoisen nollajännitteen aiheuttama kiertovirta. Kuvassa 54 on ylhäällä vaihevirroista laskettu kiertovirta PWM-pulssien synkronoinnin ollessa päällä ja alhaalla kiertovirta PWM-pulssien synkronoinnin ollessa pois päältä.



Kuva 52. Rinnankäyvien suuntaajien nollajännitteet ilman PWM-pulssien synkronointia.



Kuva 53. Rinnankäyvien suuntaajien nollajännitteet, kun PWM-pulssien synkronointi on käytössä.

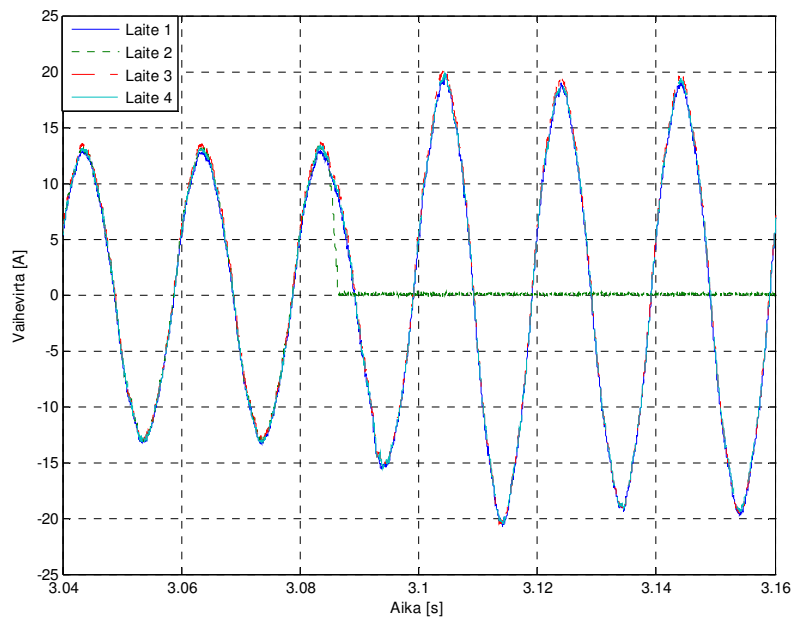


Kuva 54. Suuntaajan nollavirta. Ylemmässä kuvassa on suuntaajan nollavirta PWM-synkronoinnin ollessa käytössä. Alemmassa kuvassa on suuntaajan nollavirta ilman PWM-synkronointia.

Ilman nollavirran säätöä laitteiden läpi kulkee tehollisarvoltaan noin 2 A suuruinen kiertovirta. Laitteiden nimellisvirran ollessa 9 A, on kiertovirta yli 20 % laitteen nimellisvirrasta.

### 6.1.2 Kuorman jakaantuminen rinnankäyviin laitteiden kesken

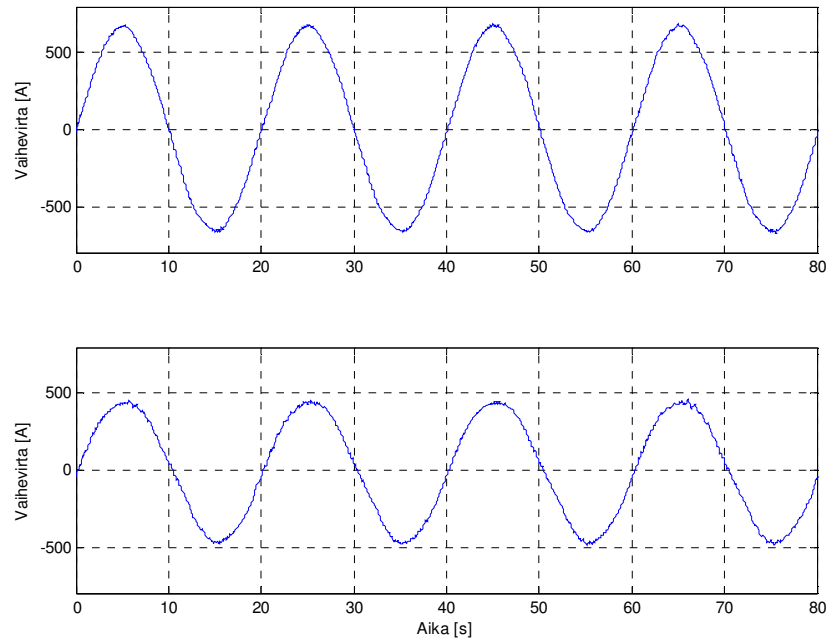
Kuorman jakautumista rinnankäyviin laitteiden kesken tutkittiin mittaamalla jokaisesta rinnankäyvästä laitteesta yhden vaiheen virta. Kuvassa 55 näkyy tilanne, jossa yksi neljästä rinnankäyvästä laitteesta erotetaan syöttöverkosta kesken ajon. Yksittäisten laitteiden kuorman säätö korjaa tilanteen ja järjestelmä saavuttaa tehotasapainon alle 20 ms aikana. Välipiirin jännitteen joustoon perustuva kuorman jakaminen toimii siis hyvin.



Kuva 55. Kuormitettujen rinnankäyviin suuntaajien yhden vaiheen virrat.

### 6.2 Mittaukset RMG-nosturissa

Uuden sukupolven verkkoonjarrutuslaitteen toiminta varmistettiin mittauksilla RMG-nosturissa. Kyseisessä nosturissa on kolme rinnankäyvää verkkoonjarrutuslaitetta, joista yksi on varalaitte. Mittauksien ajaksi kytkettiin päälle vain yksi verkkoonjarrutusyksikkö, jotta laitetta päästiin kuormittamaan nimellisvirralla. Nosto- ja siirtoliikettä ei ajettu samanaikaisesti, jolloin yhden verkkoonjarrutusyksikön käyttö oli mahdollista. Kuvassa 56 ovat verkkoonjarrutuslaitteen virran käyrämuodot nostokoneiston nostossa ja laskussa nimellisellä kuormalla ja nostonopeudella. Virran huippuarvo nostossa on 688 A, josta saadaan tehollisarvoksi 486 A. Laskussa puolestaan virran huippuarvo on 460 A tehollisarvon ollessa 325 A.

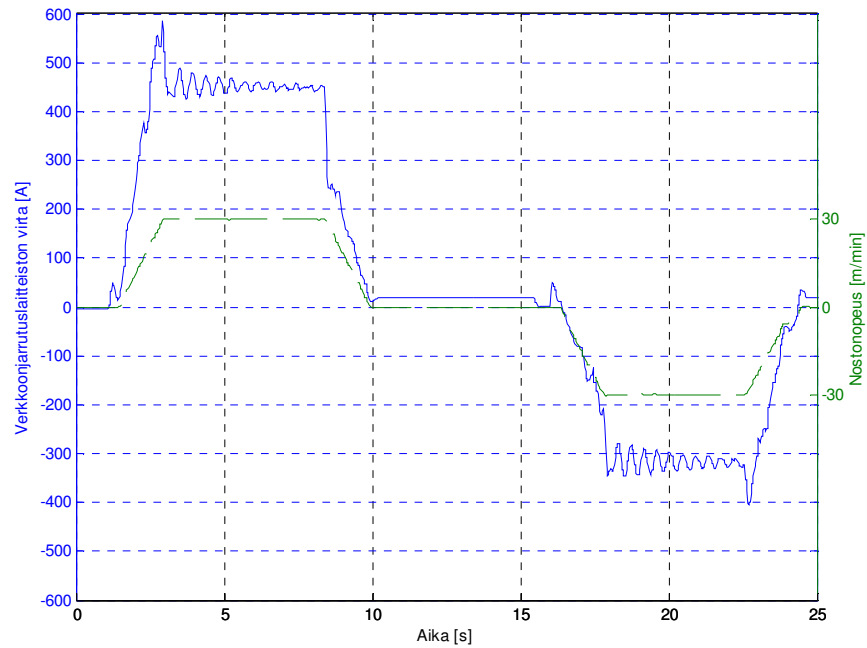


Kuva 56. RMG-nosturin verkkoonjarrutuslaitteen yhden vaiheen virta yhden verkkoonjarrutusyksikön ollessa käytössä. Ylemmässä kuvassa on verkkoonjarrutuslaitteen vaihevirta nostettaessa 40 tonnin nimelliskuormaa nimellisuopeudella. Alemmassa kuvassa on verkkoonjarrutuslaitteen vaihevirta, kun samaa kuormaa lasketaan samalla nopeudella. Virran tehollisarvo on nostossa 486 A ja laskussa 325 A.

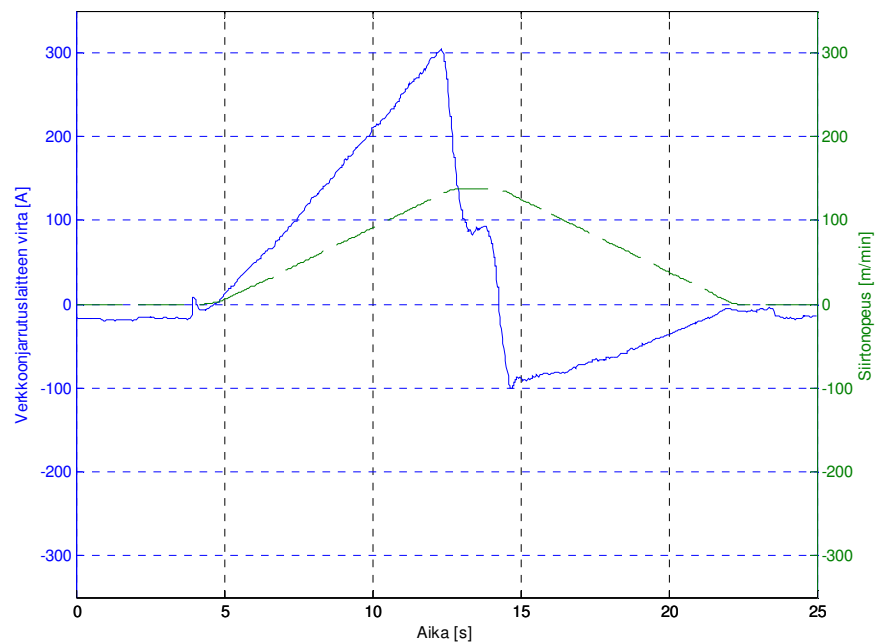
Oskilloskooppimittausten lisäksi tallennettiin verkkoonjarrutuslaitteen Profibus-väylälle antamat virran arvot 20 ms välein. Lisäksi väylältä tallennettiin moottorien nopeusohjeet. Kuvassa 57 on Profibus-väylältä saatu verkkoonjarrutuslaitteen virta ja nostomoottorin nopeusohjeesta laskettu nostonopeus. Kuvassa näkyvä virran väre aiheutuu noston mekaniikasta. Nostomoottorin vääntömomentti ja teho eivät ole tasaisia, vaan niissä esiintyy värähtelyä. Verkkoonjarrutuslaitteen virta asettuu nostossa noin 460 A tasolle ja laskussa -325 A tasolle.

Kuvassa 58 on Profibus-väylältä saatu verkkoonjarrutuslaitteen virta ja siirtomoottorin nopeusohjeesta laskettu siirtonopeus pukin siirrossa. Virta kasvaa kiihdytyksen aikana lineaarisesti maksimiarvoonsa 300 A.

Verrattaessa kuvien 57 ja 58 mitattuja virtoja kuvien 42 ja 45 laskennallisiin virtoihin, huomataan laskennallisten virtojen olevan hyvin lähellä todellisia mitattuja virtoja.



Kuva 57. RMG-nosturin verkkoonjarrutuslaitteiston virta ja nostonopeus. Nostossa jatkuvan tilan virta on noin 460 A ja laskussa  $-325$  A. Suurin hetkellinen virta on noin 580 A ennen tasaisen nostonopeuden saavuttamista.



Kuva 58. RMG-nosturin verkkoonjarrutuslaitteiston virta ja pukin ajonopeus pukin siirrossä. Kiihdytyksen lopussa virran tehollisarvo käy hetkellisesti 300 A tasolla. Jarrutuksen alussa verkkoonjarrutuslaitteiston virta on hetkellisesti  $-100$  A.

## 7 YHTEENVETO

Laboratoriossa ja käyttöpaikalla tehtyjen mittausten perusteella itsenäisistä rinnankytketyistä yksiköistä koostuvan verkkoonjarrutuslaitteiston todettiin toimivan hyvin. Teknisesti laitteisto siis sopii nosturikäyttöön. Tehtyjen kustannuslaskelmien mukaan erillisellä verkkoonjarrutuslaitteella toteutettu verkkoonjarruttava ratkaisu tulee kustannuksiltaan lähes poikkeuksetta vastusjarrutusta kalliimmaksi. Energiansäästölaskelmien perusteella on verkkoonjarrutuksen ansiosta saavutettavalla energian säästöllä merkitystä vain konttinostureissa ja suurissa kahmarinostureissa. Käytännön ylärajana vastusjarrutukselle voidaan kuljetusteknisistä syistä pitää 24 metrin jarruvastuskaappiletkan pituutta. Tämä vastaa noin 700 kW:n jarrutustehoa, mikä edellyttää noin 1000 kW:n syöttötehoa.

Energian säästön perusteella verkkoonjarrutus sopii RMG-nosturiin, mikäli verkkoonjarrutuksen aiheuttama lisäkustannus saadaan siirrettyä nosturin myyntihintaan. Vaativissa ympäristöolosuhteissa verkkoonjarrutus on perusteltu vaihtoehto. Terästehdasnosturin luotettavuutta voidaan ratkaisevasti parantaa verkkoonjarrutuksen avulla, koska jatkuvaa puhdistamista vaativat jarruvastukset voidaan jättää pois.

Verkkoonjarrutuslaitteistoa käytettäessä syöttöverkon taajuus ja jännite eivät vaikuta nosturin mekaniikan mitoittamiseen. Tällöin nosturista voidaan tehdä standardituote, jonka vaihteistojen välityksiä ja moottoreita ei tarvitse valita erikseen eri maiden sähköverkkojen mukaan. Tällä perusteella tehokkaimmissa WTE-nostureissa voitaisiin käyttää verkkoonjarrutusta. Pienemmillä tehoilla 250 kW:n verkkoonjarrutusyksikkö alkaa olla ylimittäinen ja nostaa nosturin kustannuksia suhteellisesti liian paljon.

Käyttöpaikalla tehtyjen mittausten perusteella työssä esitetty laskentamalli verkkoonjarrutuslaitteen virran määrittämiseksi nosturin mekaanisista ominaisuuksista antaa todennukaisia tuloksia. Jatkossa olisi syytä kehittää KCI:n sisäistä sähkökäyttöjen mitoitusohjelmaa siten, että se laskisi invertterien maksimivirran lisäksi myös maksimitehon ja sen ajallisen keston. Tällöin verkkoonjarrutuslaitteen mitoituksessa voitaisiin mahdollisesti käyttää laitteelle määriteltyä minuutin ylikuormitusvirtaa suurempaa kahden sekunnin ylikuormitusvirtaa. Mikäli kahden sekunnin ylikuormitusvirran käyttämistä mi-



toitusperusteena ei pidetä järkevänä laitteen luotettavuuden ja eliniän kannalta, riittävät laskentaohjelman jo nykyisin antamat invertterien jatkuvan tilan virta ja maksimivirta verkkoonjarrutuslaitteen mitoituslaitteeseen. Siirtoliikkeen osalta on otettava huomioon moottoreiden huonompi tehokerroin osakuormalla ajettaessa, mikä johtaa pienempään verkkoonjarrutuslaitteen virtaan kuin mitä yhtälön 3.2 mukaan saadaan.

Verkkoonjarrutuksesta tulisi kilpailukykyisempi, jos käytettäviin taajuusmuuttajiin saataisiin integroiduksi aktiivinen verkkosilta kohtuullisin lisäkustannuksin. Verkko- ja moottorisillan sijainti samassa taajuusmuuttajan rungossa toisi mahdollisten kustannussäästöjen lisäksi myös tilansäästöä. Verkkoonjarrutus voitaisiin tällaisella ratkaisulla toteuttaa nykyiseen tapaan yhteisellä DC-välipiirillä, jota syöttäisi yhden tai useamman suuritehoisemman invertterin aktiivinen verkkosilta. Toinen vaihtoehto olisi toteuttaa järjestelmä suoraan verkkoon kytketyillä aktiivisin verkkosilloin varustetuilla taajuusmuuttajilla. Tällöin hankalasti asennettava kuparikiskoista koostuva yhteinen DC-välipiiri sulakkeineen voitaisiin jättää pois. Tulevaisuudessa seuraavaa KCI:n taajuusmuuttajasukupolvea suunniteltaessa on syytä ottaa huomioon mahdollisuus aktiivisen verkkosillan integroinnista laitteisiin.

## LÄHDELUETTELO

- [Aura 1986] Aura, L. Tonteri, A. J. 1986. Sähkömiehen käsikirja 2. Porvoo, WSOY. 373 s. ISBN 951-0-13479-1.
- [FEM 1987] FEM 1.001. 1987. SECTION I. Heavy Lifting Appliances: Rules for the design of hoisting appliances. Booklet 2. 3rd edition. Federation Europeenne de la Manutention. 63 s.
- [Hämäläinen 2004] Hämäläinen, Y. Starck, P. 2004. KCI Training: BaseTrain-koulutusaineisto. Hyvinkää. KCI Konecranes Oyj. 122 s.
- [Lüthje 1998] Lüthje, K. 1998. Kahmaripukkinosturin ohjaus. Teknillinen korkeakoulu, Diplomityö. 113 s.
- [Ollila 1993] Ollila, J. 1993. Avaruusvektoriesitys PWM-suuntaajien analysoinnissa – käytännön sovellutus jännitevälipiirilliseen verkkosuuntaajaan. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Raportti 1-93. 166 s. ISBN 951-721-963-6.
- [Ollila 2006] Ollila, J. 2006. Rinnankytkettyjen taajuusmuuttajien tahdistaminen. Patenttijulkaisu FI116649B. 12 s.
- [Pyrhönen 2001] Pyrhönen, J. 2001. Sähkökäytöt 2001. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, luentomateriaali. 249 s.
- [Pöllänen 2003] Pöllänen, R. 2003. Converter-flux-based current control of voltage source PWM rectifiers – analysis and implementation. Lappeenranta University of technology. 165 s. ISBN 951-764-834-0.

[Valjus 2005]

Valjus, M. 2005. Moniensioinen muuntaja taajuudenmuuttajakäytössä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Diplomityö. 78 s.

**LIITE 1. Erään WTE-nosturin työsykli**

	$s$ [m]	$m$ [t]	$t_{\min}$ [s]	Työsyklejä vuodessa	Sitoutuva energia [GJ]	Vapautuva energia [GJ]
<b>Purkualueelta silloon</b>				9600		
Nosto täydellä kahmarilla	27	16	29		34,581	
Sillan siirto	14	16	13			
Vaunun siirto	19	16	20			
Lasku tyhjällä kahmarilla	27	7,5	29			16,210
<b>Purkualueelta varastoon</b>				28850		
Nosto täydellä kahmarilla	14	16	16		53,887	
Sillan siirto	14	16	13			
Vaunun siirto	10	16	14			
Lasku tyhjällä kahmarilla	14	7,5	16			25,259
<b>Varastosta silloon</b>				28850		
Nosto täydellä kahmarilla	27	16	29		103,924	
Sillan siirto	14	16	13			
Vaunun siirto	13	16	16			
Lasku tyhjällä kahmarilla	27	7,5	29			48,715
<b>Sekoitus</b>				7700		
Nosto täydellä kahmarilla	14	16	16		14,382	
Sillan siirto	14	16	13			
Vaunun siirto	10	16	14			
Lasku tyhjällä kahmarilla	14	7,5	16			6,742
<b>Energiat yhteensä</b>					206,8	96,9

**LIITE 2. Erään terästehdasnosturin työsykli**

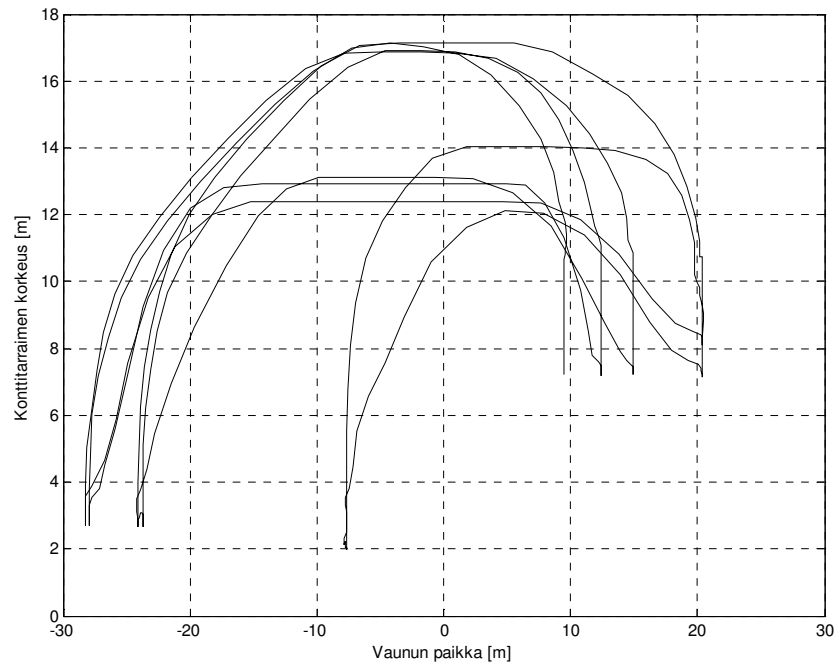
26280 sykliä vuodessa	$s$ [m]	$m$ [t]	$t_{\min}$ [s]	Sitoutuva energia [GJ]	Vapautuva energia [GJ]
Nosto	5,7	335	48	579,2	
Sillan siirto	17	335	21		
Vaunun siirto	3	335	10		
Lasku	1	335	10		73,4
Nosto	1	35	10	10,6	
Sillan siirto	17	35	21		
Vaunun siirto	3	35	10		
Lasku	5,7	35	48		43,7
Nosto	2	35	18	21,2	
Sillan siirto	7	35	11		
Vaunun siirto	5	35	14		
Lasku	1,2	35	12		9,2
Ajoa tyhjällä koukulla					
Energiat yhteensä				611,0	126,3

**LIITE 3. Tyypillinen RMG-nosturin työsykli**

219000 sykliä vuodessa	$s$ [m]	$m$ [t]	$t_{\min}$ [s]	Sitoutuva energia [GJ]	Vapautuva energia [GJ]
Nosto	9	33	20	750,67	
Vaunun siirto	16	33	15		
Lasku	9	33	20		542,36
Nosto	6	13	14	197,15	
Vaunun siirto	16	13	15		
Sillan siirto	13	13	15		
Lasku	6	13	14		142,44
Energiat yhteensä				947,8	684,8

#### LIITE 4. Erään STS-nosturin työsykli

238700 sykliä vuodessa	$s$ [m]	$m$ [t]	$t_{\min}$ [s]	Sitoutuva energia [GJ]	Vapautuva energia [GJ]
Nosto	14	41	16	1581,3	
Vaunun siirto	40	41	23		
Lasku	11	41	13		898,8
Nosto	11	13	13	394,0	
Vaunun siirto	40	13	23		
Lasku	14	13	16		362,3
Energiat yhteensä				1975,3	1261,1



Erään STS-nosturin konttitarraimen liikheet x-y-tasossa 10 minuutin aikana. Kontin korkeus on 2,3-2,9 m.

**LIITE 5. Erään AGD-nosturin työsykli**

485000 sykliä vuodessa	$s$ [m]	$m$ [t]	$t_{\min}$ [s]	Sitoutuva energia [GJ]	Vapautuva energia [GJ]
Täyden kahmarin nosto laivasta	20	32	9	3582	
Siirto siilolle	19		8		
Tyhjennys siiloon					
Siirto laivalle	19		8		
Tyhjän kahmarin lasku laivaan	20	12,7	9		1030
Energiat yhteensä				3582	1030