

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
ENERGIATEKNIIKAN OSASTO

**Moottorimalliton skalaarisäätö**

Diplomityön aihe on hyväksytty Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun energiatekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa 13.3.2002.

Työn tarkastajana toimi professori Olli Pyrhönen ja ohjaajana DI Janne Jurvanen.

Helsingissä 30.10.2002

Antti Vuorivirta  
Tuulenpesäntie 3 as 13  
00410 Helsinki  
puh: 0503224156

## TIIVISTELMÄ

<b>Tekijä:</b>	Antti Vuorivirta
<b>Työn nimi:</b>	Moottorimalliton skalaarisäätö
<b>Osasto:</b>	Energiatekniikka
<b>Vuosi:</b> 2002	<b>Paikka:</b> Helsinki
Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu 86 sivua, 44 kuvaa ja 1 liite	
<b>Tarkastaja:</b>	Professori Olli Pyrhönen
<p>Työssä tutkitaan nopeusanturittoman vaihtovirtakäytön skalaarisia ohjaus- ja säätömenetelmiä. Työn alussa esitetään perusteoria taajuusmuuttajista ja oikosulkumoottoreista. Tämän jälkeen esitellään yleisimmin kirjallisuudessa esiintyneet skalaariohjaukset ja –säädöt. Vektorisäätöä ja erityisesti moottoriparametrien vaikutusta säädön toimivuuteen esitellään lyhyesti.</p> <p>Työn tavoitteena on ACS800 taajuusmuuttajan skalaarisäädön tutkiminen. ACS800:n nykyinen skalaarisäätö on liian sidoksissa vektorisäätöön, joten simulointien ja kirjallisuustutkimuksen tarkoituksena on täysin vektorisäädöstä eriytetyn skalaarisäädön kehitysmahdollisuuksien tutkiminen.</p> <p>Kirjallisuudessa esiintyneiden säätöjen avulla muodostetaan diskreettiaikainen toteutus skalaarisäädölle vaihtovirtakäytössä, jossa on käytössä virran ja välipiirijännitteen takaisinkytkentä. Säädettävää moottoria mallinnetaan jatkuva-aikaisella L-sijaiskytkennällä. Välipiirin mallinnus toimii myös jatkuva-aikaisena lukuun ottamatta välipiirin tasavirtakomponenttia, joka muodostetaan virran takaisinkytkennän ja PWM-modulaattorin kytkinasentojen avulla.</p> <p>Simuloinnin tarkoituksena on mallintaa skalaarisäädön suurimpia ongelmia, kuten virta- ja välijännitesäätöä. Tuloksista voidaan päätellä, että perussäädöt toimivat moitteettomasti, mutta erityisesti virtasäätöä tulisi kehittää.</p>	
<b>Avainsanat:</b>	Vaihtovirtakäyttö, epätahtimoottori, skalaarisäätö

## ABSTRACT

<b>Author:</b>	Antti Vuorivirta
<b>Title of thesis:</b>	Scalar Control without Using Motor Model
<b>Department:</b>	Department of Energy Engineering
<b>Year:</b> 2002	<b>Place:</b> Helsinki
Master's thesis, Lappeenranta University of Technology 86 pages, 44 figures and 1 appendix	
<b>Supervisor:</b>	Professor Olli Pyrhönen
<p>This thesis deals with scalar control of speed sensorless AC-drive. The basis of thesis is a literature survey of different existing scalar controls. First, basics of frequency converters and induction motors are reviewed. After that most popular scalar controlling methods from literature are introduced. Vector control and especially motor parameters influence to control is studied.</p> <p>Goal of thesis is to study scalar control in ACS800 frequency converter. ACS800's existing scalar control is too reliant to vector control. Aim of simulations and literary research is to study possibilities to form absolutely differentiate scalar control for ACS800.</p> <p>Encouraged by founded methods of controlling AC-drive without using motor model a new simulation model is created. Simulation model of system consists several blocks. Control, load and DC-link have each their own block. Thesis concentrate to study problems of control block, load and DC-link are studied generally. Controlled load is modelled by continuous time L-equivalent circuit. Dc-link modelling is also continuous time model with the exception of direct current component, which is formed function of switching positions and current feedback.</p> <p>Goal of thesis is to model different problems, which arise in frequency control, like problem of current and voltage control. Basic controls worked properly, but properties of current controller should be developed.</p>	
<b>Keywords:</b> AC-drive, induction motor, scalar control	

## **ALKULAUSE**

Tämä työ on tehty Helsingissä ABB Oy:n Drives-ryhmän Product AC-divisioonan tuotekehitysosastolle. Haluan kiittää DI Ari Huttusta mielenkiintoisen ja haastavan aiheen antamisesta. Kiitän diplomityöni tarkastajaa, professori Olli Pyrhöstä, neuvoista sekä mielenkiinnosta työtäni kohtaan.

Suurimmat kiitokset kuuluvat työni ohjaajalle DI Janne Jurvaselle, jonka neuvoista oli korvaamatonta hyötyä työni valmistumisen kannalta. Kiitokset myös DI Mikko Vertaselle arvokkaista neuvoista simulaatiota tehdessä. Lisäksi haluan kiittää kaikkia niitä henkilöitä jotka auttoivat työni valmistumista.

Lopuksi haluan kiittää Mervia oikolukemisesta ja kannustuksesta.

Helsingissä 30.10.2002

Antti Vuorivirta

# SISÄLLYS

ALKULAUSE .....	4
SISÄLLYS.....	5
KÄYTETYT MERKINNÄT.....	7
<b>1 JOHDANTO.....</b>	<b>13</b>
<b>2 PYÖRIMISNOPEUSSÄÄDETTY VAIHTOVIRTAKÄYTTÖ .....</b>	<b>16</b>
2.1 OIKOSULKUMOOTTORI.....	17
2.1.1 Avaruusvektorit.....	17
2.1.2 Moottorin dynaaminen malli .....	19
2.1.3 T-Sijaiskytkentä.....	20
2.1.4 L-sijaiskytkentä.....	23
2.2 VÄLIPiIRILLISET TAAJUUSMUUTTAJAT .....	26
2.2.1 Tasasuuntaajapiiri.....	26
2.2.2 Välipiiri.....	28
2.2.3 Vaihtosuuntaaja.....	30
<b>3 SÄHKÖKÄYTÖN OHJAUS JA SÄÄTÖ.....</b>	<b>36</b>
3.1 SKALAARIOHJAUS .....	36
3.1.1 Jännitevälipiiri-taajuusmuuttajan skalaariohjaus .....	37
3.2 SKALAARISÄÄTÖ.....	41
3.2.1 Jättämän kompensointi .....	43
3.2.2 Nopeusvirheen kompensointi estimointia käyttämällä.....	45
3.3 VEKTORISÄÄTÖ.....	48
3.4 SKALAARISÄÄDÖN KÄYTTÖKOhteITA .....	52
<b>4 MOOTTORIMALLITON SKALAARISÄÄTÖ .....</b>	<b>53</b>
4.1.1 <i>U/f</i> -käyrä.....	54
4.1.2 Kompensaattori.....	56
4.1.3 Jänniteohjeen muodostus.....	57
4.1.4 Modulaattori.....	58
4.1.5 Virtasäädin .....	58
4.1.6 Jännitesäädin.....	60
4.1.7 Taajuusramppi.....	62

<b>5</b>	<b>SIMULOINTI.....</b>	<b>63</b>
5.1	SIMULOINTIYMPÄRISTÖ .....	63
5.1.1	<i>Säätölohko</i> .....	64
5.1.2	<i>Välipiiri</i> .....	64
5.1.3	<i>Moottori</i> .....	66
5.1.4	<i>Kuorma</i> .....	67
5.2	SÄÄDÖN PARAMETRIT JA VIRITYS .....	67
5.3	TULOKSET .....	68
5.3.1	<i>Tulosten esitystapa</i> .....	68
5.3.2	<i>Skalaariohjaus</i> .....	70
5.3.3	<i>Virtasäätö</i> .....	72
5.3.4	<i>Välipiirin jännitesäätö</i> .....	76
5.3.5	<i>Moottorin mallin ongelma</i> .....	81
<b>6</b>	<b>YHTEENVETO .....</b>	<b>82</b>
	<b>LÄHTEET .....</b>	<b>84</b>
	<b>LITTEET</b>	

## KÄYTETYT MERKINNÄT

### Symbolit

$\underline{a}$	vektori
$\underline{a}^*$	vektorin liittoluku eli konjugaatti
$ \underline{a} $	vektorin itseisarvo
$e$	erosuure, sähkömotorinen voima
$f$	taajuus
$f(t)$	ajasta riippuva funktio
$G$	PWM:n kytkinasennot (simulointi)
$i$	virran hetkellisarvo
$I$	virran tehollisarvo
$j$	imaginääriyksikkö
$J$	hitausmomentti
$k$	kytkentäkerroin, verrannollisuuden osoitin
$l$	pituus
$L$	induktanssi
$n$	pyörimisnopeus
$N$	käämin kierrosten määrä
$p$	moottorin napapariluku
$q$	viiveoperaattori
$R$	resistanssi
$S$	kytkinasento
$s$	jättämä
$t$	aika
$T$	vääntömomentti, näytteenottoväli
$u$	jännitteen hetkellisarvo
$\hat{u}$	jännitteen huippuarvo
$U$	jännitteen tehollisarvo
$x$	mielivaltaisen koordinaatiston reaaliakseli

$y$	mielivaltaisen koordinaatiston imaginääriakseli
$\alpha$	staattorikoordinaatiston reaaliakseli
$\beta$	staattorikoordinaatiston imaginääriakseli
$\tau$	aikavakio
$\theta$	vuokulma
$\vartheta$	ohjearvovektorin kulma
$\sigma$	hajakerroin
$\omega$	kulmanopeus
$\hat{\omega}$	kulmanopeuden estimaatti
$\psi$	käämivuo
$\hat{\psi}$	jännitteen takaisinkytkennän integraali

#### **Ala- ja yläindeksit**

$A$	kolmivaihejärjestelmän a-vaihe
$ave$	keskiarvo
$B$	kolmivaihejärjestelmän b-vaihe
$C$	kolmivaihejärjestelmän c-vaihe
$c$	kondensaattori
$comp$	kompensointi
$d$	välipiiri
$D$	derivaattorin parametri
$DC$	tasasähkö (direct current)
$dq$	vektorin Re –ja Im-komponentit dq-koordinaatistossa
$e$	sähköinen, erosuure
$Fe$	rauta
$I$	integraattorin parametri
$in$	sisääntulo (input)
$inv$	vaihtosuuntaaja
$L$	kuorma (load), induktanssi



<i>limit</i>	raja
<i>m</i>	magnetointi-induktanssi (T-sijaiskytkentä)
<i>M</i>	mekaaninen, magnetointi-induktanssi (L-sijaiskytkentä)
<i>mes</i>	mitattu
<i>m</i>	magnetointi, mekaaninen
max	maksimi
min	minimi
<i>nom</i>	nimellisarvo
<i>out</i>	ulostulo (output)
<i>over</i>	ylijännitesäätimen parametri
<i>P</i>	P-säätimen parametri
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation (Pulssinleveysmodulaatio)
<i>r</i>	roottori
<i>R</i>	roottoripiiri (L-sijaiskytkentä), resistanssi
<i>ramp</i>	rampitettu
<i>ref</i>	referenssi eli ohjearvo
<i>s</i>	staattori
<i>sA</i>	staattorin a vaihe
<i>sample</i>	näytteenotto
<i>sB</i>	staattorin b vaihe
<i>sC</i>	staattorin c vaihe
<i>slip</i>	jättämä
<i>supply</i>	syöttö
<i>sw</i>	kytkentäjakso
<i>under</i>	alijännitesäätimen parametri
<i>x, y</i>	vektorin Re – ja Im-komponentit mielivaltaisessa koordinaatistossa
$\alpha, \beta$	vektorin Re – ja Im-komponentit staattorikoordinaatistossa
$\delta$	ilmaväli
$\sigma$	haja-

0 alkuarvo, nollavektori

### Muut merkinnät

– vektori  
\* vektorien ristitulo  
◦ vektorien pistetulo  
 $\hat{y}$  estimaatti  
Im imaginääriosa  
Re reaaliosa

### Lyhenteet

ABB Asea Brown Boveri, sähköalan yritys  
ACS ABB:n taajuusmuuttaja perhe  
DTC Direct Torque Control (Suora momenttisäätö)  
IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor  
ISU Inverter Supply Unit (Tasasuuntaaja)  
PWM Pulse Width Modulation (Pulssinleveysmodulaatio)  
smv sähkömotorinen voima  
ZOH Zero-Order-Hold (Nollannen Asteen Pitopiiri)

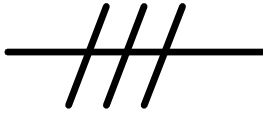
### Lohkokaavioiden lohkoja



tasasuuntaaja



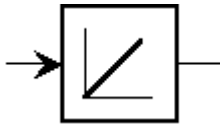
vaihtosuuntaaja



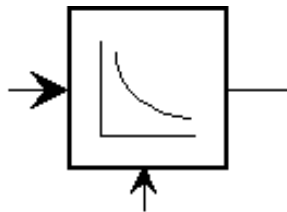
kolmivaihevirta



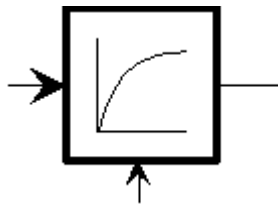
kolmivaiheinen vaihtovirtamoottori



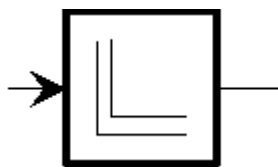
integraattori



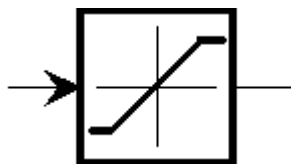
ensimmäisen asteen ylipäästösuodin



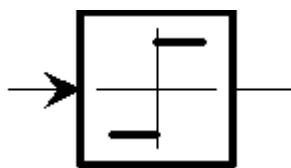
ensimmäisen asteen alipäästösuodin



derivaattori



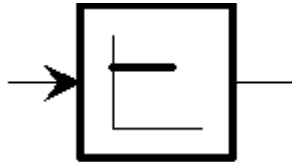
rajoitus



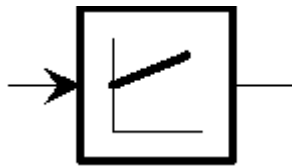
etumerkin tunnistus



ramppi



P-säädin



PI-säädin

# 1 JOHDANTO

Uudet säätöalgoritmit ja tehoelektroniikan nopea kehitys 1900-luvun loppupuolella mahdollistivat vaihtovirtakäyttöjen nopean leviämisen markkinoille. Tällöin epätahtikoneet korvasivat tasavirtakoneet varsin nopeasti nopeus- ja paikkasäätöä vaativista sovelluksista. Erityisen suosittu epätahtikonetyyppi on oikosulkumoottori halvan hintansa ja edullisten ylläpitokustannustensa ansiosta.

Sähkökäyttöjen säätötavat jaotellaan vektori- ja skalaarisäätöihin. Skalaarisäätöä sovelletaan erityisesti dynamiikaltaan yksinkertaisiin sovelluksiin tai kun vektorisäädön vaatimia parametrejä ei ole saatavilla. Skalaarisäädön suurin etu on, ettei se tarvitse moottorin parametrejä toimiakseen.

Skalaarisäätö on jännitteen amplitudin ja taajuuden säätöä. Siis ainoa tapa vaikuttaa kuormaan on muuttaa sinne syötetyn vaihtovirran taajuutta ja jännitettä. Taajuussäätö on luonteeltaan erittäin hidas ja sen toimintakyky nopeissa muutostilanteissa on heikko.

Säädössä ei haluta käyttää mekaanisia mittauksia esimerkiksi moottorin nopeudelle, sillä mekaaniset anturit lisäävät huomattavasti kustannuksia ja heikentävät toimintavarmuutta. Myös sähköisten galvaanisesti erotettujen mittausten, kuten jännite ja virta, minimoiminen kannattaa. Näitä mittauksia voidaan korvata reaaliaikaisella laskennalla.

Työn tavoitteena on tutkia kehitysmahdollisuuksia ABB Oy:n ACS800 taajuusmuuttajan skalaarisäädölle. ACS800-tuoteperheen tuotteet ovat kolmivaiheisia taajuusmuuttajia, jotka on tarkoitettu vaihtovirtamoottoreiden säätöön. ACS800 tuotteet sopivat lähestulkoon kaikkiin teollisuusympäristöihin tai sovellutuksiin mukaan lukien pumput, puhaltimet, sekoittimet, kuljettimet, hissit, nosturit, kelaimet, lingot ja puristimet. ACS 800 perheen tuotteet koostuvat tehoalueeltaan 1.1 kW:sta 3000 kW:iin olevista muuttajista.



Kuva 1-1: ACS800 tuotteen laitetta, pienimmistä runkokoista suurimpiin kaapitettuihin taajuusmuuttajiin.

Nykyään ACS800:an skalaarisäätö pohjautuu liikaa vektorisäätöön käyttäen esimerkiksi sen moottorimallia. Tarkoituksena on tutkia skalaarisäätöä jossa ei moottorimallia tarvittaisi. Kehitetyn säädön tulisi yksinkertaistaa säätöohjelmaa, vähentäen sen tilankäyttöä ja tarvittavaa prosessori kuormaa. Moottorimalliton skalaarisäätö-ohjelma toimisi paremmin sekä tahti- että epätahtikoneilla, koska sama ohjelma käy kummallekin moottorityypille. Moottorimalliton skalaarisäätö parantaisi myös taajuusmuuttajan käytettävyyttä laskemalla tarvittavien parametrien määrää. Nykyinen skalaarisäätö toimii paremmin, kun moottori on ensin identifioitu vektorisäädöllä, mikä on aiheuttanut käyttäjien kritiikkiä. Eriyttämällä vektori- ja skalaarisäätö näitä ongelmia voitaisiin vähentää.

Työssä esitellään erilaisia skalaarisia ohjauksia ja säätöjä, myös vektorisäätöä käsitellään. Vektorisäädön osuudessa keskitytään erityisesti parametrien merkitykseen säädössä. Toteutus on ACS800:n ympäristön mukainen, sisältäen välipiirin jännitemittauksen ja virran takaisinkytkennän. Systemiin syötetään pyörimisnopeusohje, jonka perusteella säätö antaa kuormalle halutunlaisen jännitteen ja taajuuden pitäen samalla kuormalle menevän virran kurissa ja välipiirin jännitteen haluttujen rajojen sisällä.

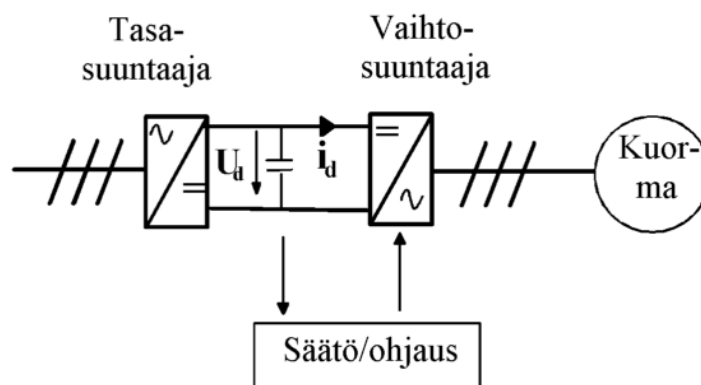
Toisessa luvussa esitellään vaihtovirtakäyttöjä yleisesti. Luvussa kolme esitellään erilaisia ohjaus- ja säätömenetelmiä. Seuraavassa luvussa tehdään skalaarisäädön toteutus, joka istutetaan ACS800:n antamiin toimintakehyksiin. Luvussa viisi toteutettua säätöä tutkitaan tarkemmin simuloimalla. Simuloinnin tarkoituksena on tuoda esiin tilanteita, jossa skalaarisäädön toiminta kohtaa suurimmat vaikeutensa. Viimeisessä luvussa kootaan tulokset yhteen ja vertaillaan työssä esiin tulleita menetelmiä.

## 2 PYÖRIMISNOPEUSSÄÄDETTY VAIHTOVIRTAÄYTTÖ

Perinteisesti tasasähkökoneita on käytetty nopeus- ja paikkasäätöä vaativissa sovelluksissa. Tehoelektronikan ja mikroprosessorien kehityksen myötä näissä sovelluksissa on siirrytty käyttämään vaihtosähkökoneita. Vaihtosähkökoneiden etuna on niiden matalat ylläpito kustannukset ja yksinkertainen rakenne [14].

Muuttajan tehtävänä on muuttaa sähköverkon vakiotaajuinen ja –jännitteinen sähkö kuorman tarvitsemaan muotoon. Tämä edellyttää laiteelta kykyä muuttaa jännitteen suuruutta koneen pyörimisnopeutta ja vuota vastaavaksi [17].

Normaalisti taajuusmuuttaja koostuu eri rakennemuoduleista. Samoista standardi moduuleista voidaan koota erilaisia sovellutuksia. Kuvassa (2-1) esitetään jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan rakenne



Kuva 2-1: Välipiirillisestä taajuusmuuttajasta ja moottorista koostuva vaihtovirtakäyttö.

Taajuusmuuttajia on kaksi perustyyppiä, välipiirillisiä ja suoria. Suorat taajuusmuuttajat jaetaan matriisimuuttajiin ja syklokonverttereihin. Niissä syöttävän vaihtosähköverkon sähkö pilkotaan puolijohdekytkimillä suoraan halutun taajuiseksi ja jännitteiseksi vaihtosähköksi. Jatkossa keskitytään vain välipiirillisten taajuusmuuttajien tutkimiseen. Kuormana käytetään oikosulkumoottoria, jota esitellään lyhyesti seuraavassa.



## 2.1 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottorissa on toiminnan kannalta kaksi tärkeää osaa, paikallaan pysyvä staattori ja pyörivä roottori. Staattorissa on symmetrinen monivaihekäämitys ja se on kiinnitetty koneen runkoon. Roottorissa on häkkikäämitys, joka muodostuu urissa olevista eristämättömistä sauvoista. Sauvat on yhdistetty oikosulkurenkailla molemmista päistä. Oikosulkemisen vuoksi ainoa yhteys roottorin ja staattorin välillä on magneettikenttä. Staattorikäämityksessä kulkeva virta saa aikaa magneettivuon, joka kytkeytyy ilmapälin yli muodostaen roottorivirran. Roottorista tulee näin sähkömagneetti, joka pyrkii seuraamaan staattorin pyörivää magneettikenttää [17].

Oikosulkumoottori kuuluu epätahtikoneisiin, joten sen pyörimisnopeus poikkeaa kuormitettuna tahtinopeudesta. Tätä nopeuseroa kutsutaan jättämäksi ja sitä tarvitaan indusoimaan roottorin häkkikäämitykseen vääntömomenttia muodostava virta.

### 2.1.1 Avaruusvektorit

Oikosulkumoottorin staattorin vaihevirit muodostavat kolmivaihejärjestelmän, joka voidaan kuvata avaruusvektorin avulla. Valitaan reaaliakseliksi ( $\alpha$ -akseli) staattorikäämityksen a-vaiheen magneettiakseli. Muunnos hetkellisarvoisista vaihesuureista vektoriksi on

$$\underline{i}_s^{\alpha\beta}(t) = \frac{2}{3} \cdot \left( i_{sA} + i_{sB} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_{sC} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \right), \quad (2-1)$$

missä  $i_{sA}$ ,  $i_{sB}$  ja  $i_{sC}$  ovat vaihevirtojen hetkellisarvot. Eksponenttitermit vastaavat vektorin kiertymistä kulma  $2\pi/3$  ja  $4\pi/3$  kompleksitasossa ja vektorimerkinnän yläindeksi ilmoittaa kyseisen vektorin koordinaatiston. Vektori  $\underline{i}_s^{\alpha\beta}$  voidaan kirjoittaa muotoon

$$\underline{i}_s^{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \left[ i_{sA} - \frac{1}{2} i_{sB} - \frac{1}{2} i_{sC} + j \left( \frac{\sqrt{3}}{2} i_{sB} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{sC} \right) \right] = i_s^\alpha + j \cdot i_s^\beta, \quad (2-2)$$

missä  $i_s^\alpha$  ja  $i_s^\beta$  ovat reaali- ja imaginääriakselin suuntaiset komponentit. Nollajärjestelmää staattorikäymityksessä kuvata kaavalla

$$i_{s0} = \frac{1}{3} (i_{sA} + i_{sB} + i_{sC}). \quad (2-3)$$

Vaihevirroiksi  $\alpha\beta$ -koordinaatistossa saadaan tällöin avaruusvektorin reaaliosan, imaginääriosan ja nollakomponentin avulla

$$i_{sA} = i_s^\alpha + i_{s0}, \quad (2-4)$$

$$i_{sB} = -\frac{1}{2} i_s^\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} i_s^\beta + i_{s0}, \quad (2-5)$$

$$i_{sC} = -\frac{1}{2} i_s^\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i_s^\beta + i_{s0}. \quad (2-6)$$

Moottorin kytkentä pyritään tekemään niin, että moottoriin menee vain kolme vaihejohtinta, jolloin vaihevirtojen summa on aina nolla ja nollavirtaa ei kulje. Staattorivektori saadaan lausuttua kahden vaihevirran avulla yhtälöstä (2-2)

$$\underline{i}_s = i_{sA} + j \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{sA} + 2 \cdot i_{sB}) \quad (2-7)$$

Avaruusvektoriteoria on vain yksinkertaistus, mutta se on hyvin käyttökelpoinen monimutkaisen toiminnan kuvaamiseen. Teoriassa oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi, että koneen epälineaarisuuden kuten rautahäviöt ja resistanssit ovat lämpötilasta ja taajuudesta riippumattomia [9][12][13].

### **Koordinaatistomuunnos**

Avaruusvektoreiden yhteydessä puhuttiin staattorin a-vaiheen suuntaan kiinnitetystä  $\alpha\beta$ -koordinaatistosta. Muita tarkastelukoordinaatistoja ovat mielivaltainen xy-

koordinaatisto ja käämivuohon kiinnitetty dq-koordinaatisto. Oikosulkumoottorin mallintamisessa koordinaatistolla on suuri merkitys, koska roottorikentän ja staattorikentän välillä on jättämän suuruinen nopeusero. Oikean koordinaatiston valinnalla ajasta riippuvaisten vaihtosähkösuureiden laskenta muuttuu tasasähkösuureiden laskennaksi, koska valitussa koordinaatistossa olevien vektorisuureiden voidaan olettaa pysyvän paikallaan. Koordinaatistomuutokset tapahtuvat mielivaltaisen xy-koordinaatiston ja  $\alpha\beta$ -koordinaatiston välillä seuraavasti

$$\underline{i}_s^{xy} = \underline{i}_s^{\alpha\beta} \cdot e^{-j\nu_{x\alpha}}, \quad (2-8)$$

$$\underline{i}_s^{\alpha\beta} = \underline{i}_s^{xy} \cdot e^{+j\nu_{x\alpha}}, \quad (2-9)$$

missä  $\nu_{x\alpha}$  on xy-koordinaatiston kulma dq-koordinaatistoon nähden. Vastaavasti voidaan käsitellä muutkin moottorin virrat, jännitteet ja käämivuot.

### 2.1.2 Moottorin dynaaminen malli

Todellisuudessa moottori pyörii hitaammin kuin sille syötetty jännitteen avaruusvektori. Tätä erotusta kutsutaan jättämäksi  $s$ . Nyt  $\omega_s$  on staattorin sähköinen kulmataajuus ja  $\omega_r$  on roottorin kulmataajuus. Näiden taajuuksien väliseksi yhteydeksi saadaan yhtälö

$$\omega_r = (1-s) \cdot \omega_s. \quad (2-10)$$

Mekaanisen nopeuden kulmataajuuden  $\omega_m$  ja roottoritaajuuden yhteydeksi saadaan  $\omega_r = p \cdot \omega_m$ , missä  $p$  on moottorin napapariiluku. Jättämätaajuus  $\omega_{slip}$  määritellään seuraavalla tavalla [9]

$$\omega_{slip} = s \cdot \omega_s = \omega_s - \omega_r. \quad (2-11)$$

### 2.1.3 T-Sijaiskytkentä

Staattorin jännitevektorin ollessa  $\underline{u}_s^{\alpha\beta}$ , virtavektorin  $\underline{i}_s^{\alpha\beta}$  ja vuovektorin  $\underline{\psi}_s^{\alpha\beta}$  staattorikoordinaatistossa pätee yhtälö [9]

$$\underline{u}_s^{\alpha\beta} - R_s \underline{i}_s^{\alpha\beta} - \frac{d\underline{\psi}_s^{\alpha\beta}}{dt} = 0, \quad (2-12)$$

missä  $R_s$  on staattorin resistanssi. Mahdollista on myös kirjoittaa samanlainen yhteys roottoripiirille roottorikoordinaatistossa, joka pyörii samaa nopeutta sähköisen moottorin kulmanopeuden  $\omega_m$  kanssa. Johdettaessa moottorin mallia on staattori- ja roottoripiiri kummatkin esitettävä staattorikoordinaatistossa. Täten saadaan

$$\underline{u}_r^{\alpha\beta} = R_r \underline{i}_r^{\alpha\beta} + \frac{d\underline{\psi}_r^{\alpha\beta}}{dt} - j\omega_m \underline{\psi}_r^{\alpha\beta}, \quad (2-13)$$

missä  $\underline{u}_r^{\alpha\beta}$  on roottorin jännitevektori,  $R_r$  roottori resistanssi,  $\underline{i}_r^{\alpha\beta}$  roottorivirtavektori ja  $\underline{\psi}_r^{\alpha\beta}$  roottorin käämivuovektori. Termi  $-j\omega_m \underline{\psi}_r^{\alpha\beta}$  kuvaa siirtymää roottorikoordinaatistosta staattorikoordinaatistoon. Koska roottorikämit ovat oikosulussa, roottorin jännitevektori  $\underline{u}_r^{\alpha\beta}$  voidaan asettaa nolnaan.

Vuovektorit saadaan muodostettua staattorin ja roottorin virtavektoreiden avulla

$$\underline{\psi}_s^{\alpha\beta} = L_s \underline{i}_s^{\alpha\beta} + L_m \underline{i}_r^{\alpha\beta} \quad (2-14)$$

$$\underline{\psi}_r^{\alpha\beta} = L_m \underline{i}_s^{\alpha\beta} + L_r \underline{i}_r^{\alpha\beta} \quad (2-15)$$

missä  $L_s$  ja  $L_r$  ovat staattorin ja roottorin kokonaisinduktansseja, kun taas  $L_m$  on moottorin magnetointi-induktanssi. Toisaalta voimme esittää magnetointivirran, joka on roottori- ja staattorivirtojen summa

$$\underline{i}_m^{\alpha\beta} = \underline{i}_s^{\alpha\beta} + \underline{i}_r^{\alpha\beta}. \quad (2-16)$$

Nyt vuovektorit voidaan lausua seuraavasti

$$\underline{\psi}_s^{\alpha\beta} = L_m \underline{i}_m^{\alpha\beta} + (L_s - L_m) \underline{i}_s^{\alpha\beta} = L_m \underline{i}_m^{\alpha\beta} + L_{s\sigma} \underline{i}_s^{\alpha\beta}, \quad (2-17)$$

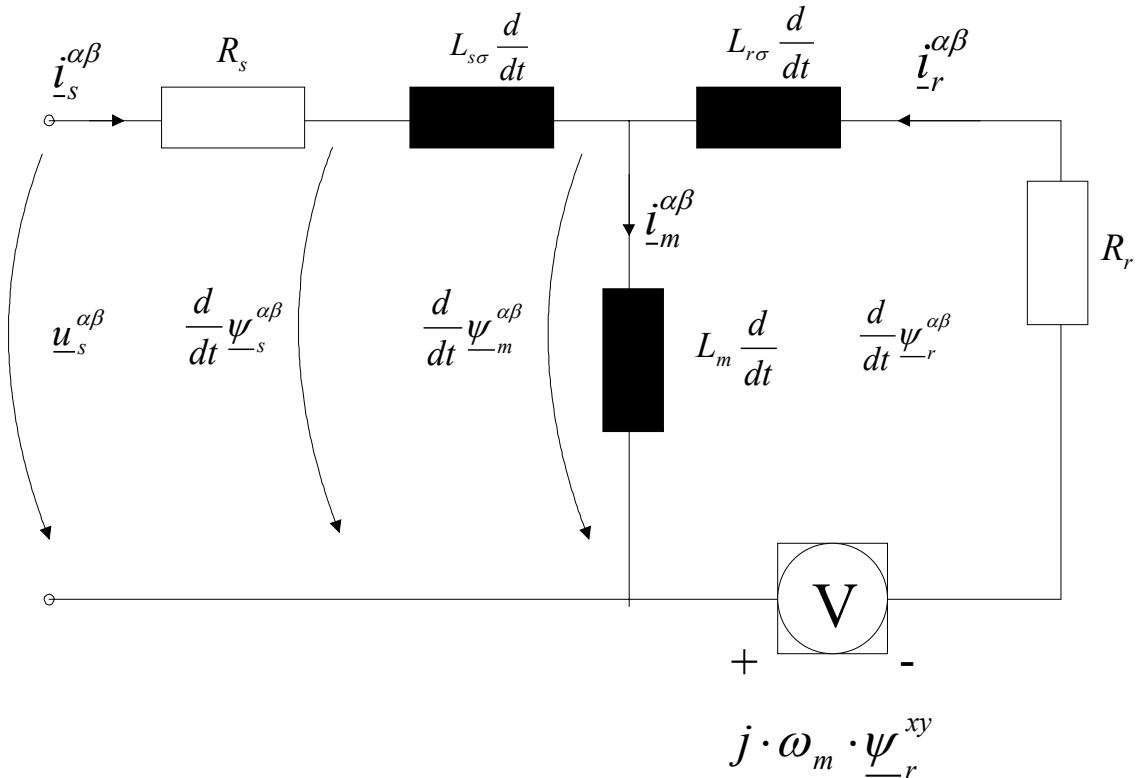
$$\underline{\psi}_r^{\alpha\beta} = L_m \underline{i}_m^{\alpha\beta} + (L_r - L_m) \underline{i}_r^{\alpha\beta} = L_m \underline{i}_m^{\alpha\beta} + L_{r\sigma} \underline{i}_r^{\alpha\beta}, \quad (2-18)$$

missä  $L_{s\sigma}$  ja  $L_{r\sigma}$  ovat staattorin ja roottorin hajainduktansseja. Käämivuovektorit (2-17) ja (2-18) voidaan sijoittaa yhtälöihin (2-12) ja (2-13). Täten saadaan muodostettua yhtälö staattorin jännitevektorille, kun oletetaan induktanssien pysyvän vakiona

$$\underline{u}_s^{\alpha\beta} = R_s \underline{i}_s^{\alpha\beta} + L_{s\sigma} \frac{d\underline{i}_s^{\alpha\beta}}{dt} + L_m \frac{d\underline{i}_m^{\alpha\beta}}{dt}, \quad (2-19)$$

$$\underline{u}_r^{\alpha\beta} = R_s \underline{i}_r^{\alpha\beta} + L_{s\sigma} \frac{d\underline{i}_r^{\alpha\beta}}{dt} + L_m \frac{d\underline{i}_m^{\alpha\beta}}{dt} - j\omega_m \underline{\psi}_r^{\alpha\beta}. \quad (2-20)$$

Näiden kahden yhtälön perusteella voidaan muodostaa oikosulkumoottorille sijaiskytkentä staattorikoordinaatistossa.



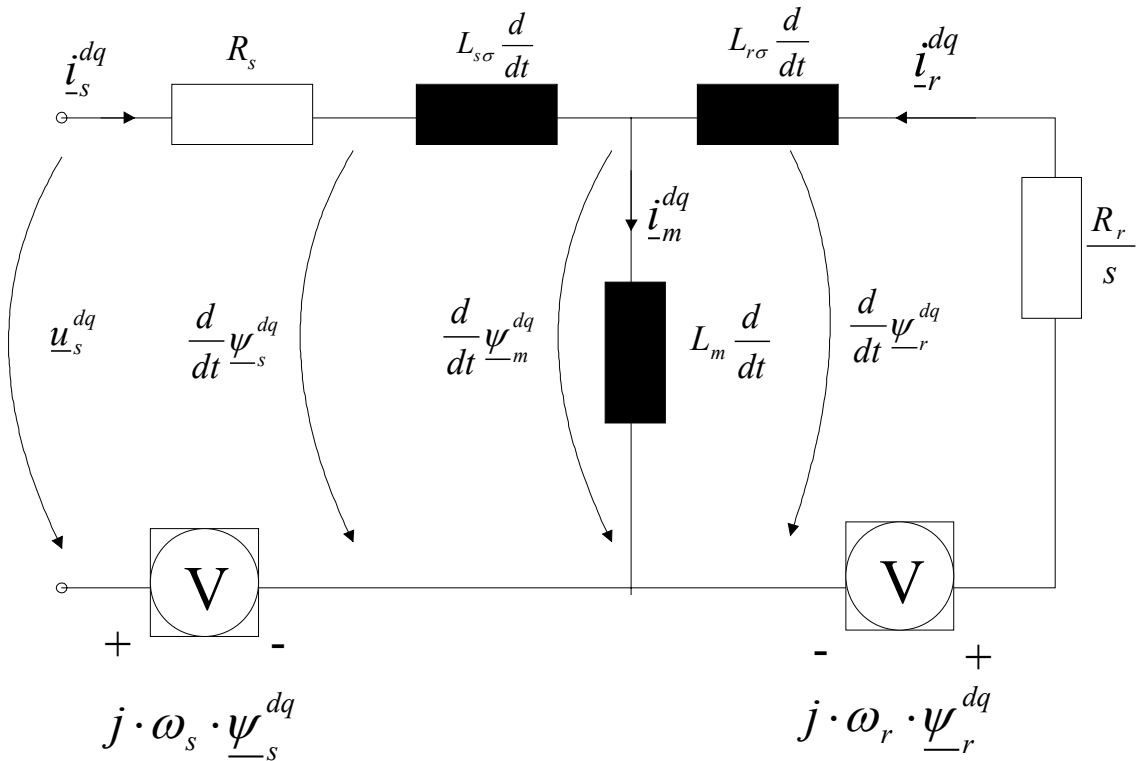
Kuva 2-2: Dynaaminen T-sijaiskytkentä oikosulkumoottorille staattorikoordinaatistossa.

Säätötekniisiä sovelluksia varten on hyvä esittää sijaiskytkentä dq-koordinaatistossa. Tällöin yhtälöt (2-12) ja (2-13) saadaan muotoon

$$\underline{u}_s^{dq} = R_s \underline{i}_s^{dq} + \frac{d\underline{\psi}_s^{dq}}{dt} + j\omega_s \underline{\psi}_s^{dq}, \quad (2-21)$$

$$\underline{u}_r^{dq} = R_r \underline{i}_r^{dq} + \frac{d\underline{\psi}_r^{dq}}{dt} + j\omega_r \underline{\psi}_r^{dq}. \quad (2-22)$$

Huomattavaa on, että kulmataajuuksien ero staattorikoordinaatiston ja dq-koordinaatiston välillä on verrannollinen jättämän kulmataajuuden kanssa. Täten saadaan T-sijaiskytkentä dq-koordinaatistossa



Kuva 2-3: Dynaaminen T-sijaiskytkentä oikosulkumoottorista dq-koordinaatistossa.

### 2.1.4 L-sijaiskytkentä

Vaikka T-sijaiskytkennän malli on fyysisesti pätevä, säätöteknisesti ajatellen se on yliparametrisoitu. Yksi hajainduktanssi kahden sijasta on pätevä. Näin voimme johtaa mallin, jossa hajainduktanssit on sijoitettu staattoripuolelle. Käämivuot  $\underline{\psi}_s^{\alpha\beta}$  ja  $\underline{\psi}_r^{\alpha\beta}$  kaavoista (2-17) ja (2-18) voidaan esittää hajainduktanssien  $L_{s\sigma}$  ja  $L_{r\sigma}$  avulla dq-koordinaatistossa [9]

$$\underline{\psi}_s^{dq} = (L_{s\sigma} + L_m) \cdot \underline{i}_s^{dq} + L_m \underline{i}_r^{dq}, \quad (2-23)$$

$$\underline{\psi}_s^{dq} = L_m \underline{i}_s^{dq} + (L_{r\sigma} + L_m) \cdot \underline{i}_r^{dq}. \quad (2-24)$$

Muovataan roottori suureita  $\underline{\psi}_r^{dq}$  ja  $\underline{i}_r^{dq}$  vakion  $b$  avulla. Täten saadaan

$$\underline{\psi}_R^{dq} = b \underline{\psi}_r^{dq}, \quad (2-25)$$

$$\underline{i}_R^{dq} = \frac{\underline{i}_r^{dq}}{b}. \quad (2-26)$$

Jos seuraavissa kaavoissa alaindeksissä on isoja kirjaimia, ne viittaavat L-sijaiskytkentään ja pienet kirjaimet viittaavat vastaavasti T-sijaiskytkentään. Kaavat (2-23) ja (2-24) voidaan esittää kaavojen (2-25) ja (2-26) avulla seuraavasti

$$\underline{\psi}_S^{dq} = (L_{s\sigma} + L_m) \underline{i}_S^{dq} + b L_m \underline{i}_R^{dq}, \quad (2-27)$$

$$\underline{\psi}_R^{dq} = b L_m \underline{i}_S^{dq} + b^2 (L_{r\sigma} + L_m) \underline{i}_R^{dq}. \quad (2-28)$$

Kaavasta (2-28) voidaan päätellä, että roottori- ja staattorivirroilla tulee olla sama kerroin  $b$ . Täten saadaan

$$b = \frac{L_m}{L_m + L_{r\sigma}} = \frac{L_m}{L_r} \quad (2-29)$$

Näin magnetointi-induktanssi L-sijaiskytkennässä saa arvon

$$L_M = bL_m \quad (2-30)$$

ja kokonaishajainduktanssi voidaan esittää seuraavasti

$$L_\sigma = L_{s\sigma} + bL_{r\sigma}, \quad (2-31)$$

jolloin vuovektoreiksi saadaan

$$\underline{\psi}_s^{dq} = (L_\sigma + L_M)\underline{i}_s^{dq} + bL_M\underline{i}_R^{dq}, \quad (2-32)$$

$$\underline{\psi}_R^{dq} = L_M\underline{i}_s^{dq} + L_M\underline{i}_R^{dq}. \quad (2-33)$$

Lopuksi jännitevektorien kaavat (2-21) ja (2-22) voidaan kirjoittaa modifioitujen parametrien avulla

$$\underline{u}_s^{dq} = R_s\underline{i}_s^{dq} + \frac{d\underline{\psi}_s^{dq}}{dt} + j\omega_s\underline{\psi}_s^{dq}, \quad (2-34)$$

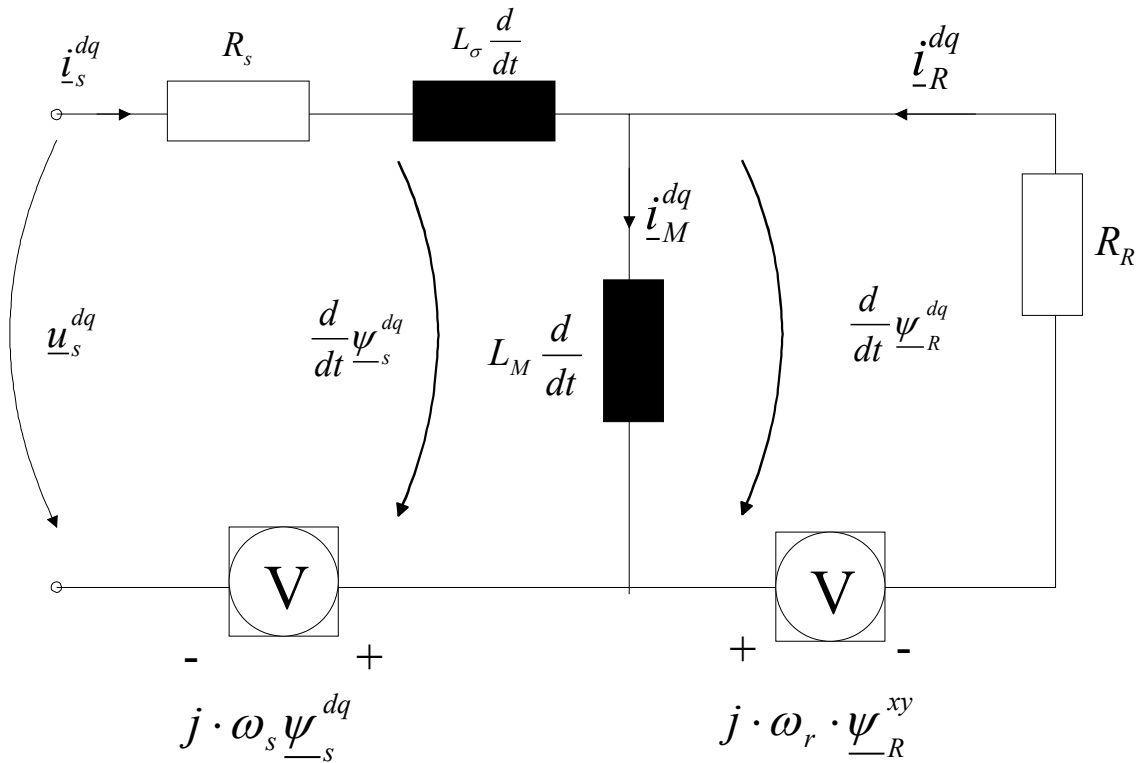
$$\underline{u}_R^{dq} = R_R\underline{i}_R^{dq} + \frac{d\underline{\psi}_R^{dq}}{dt} + j\omega_r\underline{\psi}_R^{dq} = 0, \quad (2-35)$$

missä modifioitu roottoriresistanssi on

$$R_R = b^2 R_r. \quad (2-36)$$



L-sijaiskytkentä on esitetty kuvassa (2-4) kaavojen (2-31)-(2-35) mukaan



Kuva 2-4: Moottorin yksinkertaistettu L-sijaiskytkentä. Tässä mallissa kaikki hajainduktanssit on sijoitettu staattori puolelle, jolloin käytettävien parametrien määrä laskee.

Induktiomoottorin hajakerroin  $\sigma$  saadaan seuraavasta kaavasta

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}. \quad (2-37)$$

Vuotokertoimen avulla voidaan määrittää induktanssit  $L_\sigma$  ja  $L_M$  L-sijaiskytkennässä

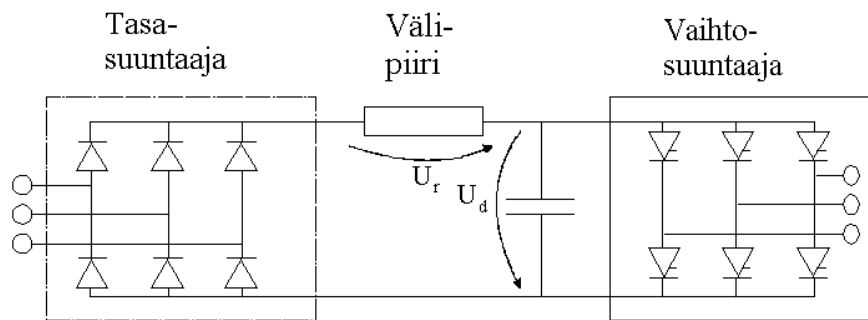
$$L_\sigma = \sigma L_s, \quad (2-38)$$

$$L_M = L_s - \sigma L_s. \quad (2-39)$$

## 2.2 Välipiirilliset taajuusmuuttajat

Välipiirilliset taajuusmuuttajat sisältävät kolme perusosaa, tasasuuntaajan, välipiirin ja vaihtosuuntaajan. Välipiirillisessä taajuusmuuttajassa verkon syöttämä vaihtojännite tasasuunnataan tasasuuntaajassa. Tämän jälkeen virta kulkee välipiirin läpi, jonka jälkeen se vaihtosuunnataan vaihtosuuntaajassa halutunlaiseksi.

Välipiirin tyyppi määrää vaihtosuuntaajan säätötavan. Käytössä on virta- ja jännitevälipiirillisiä muuttajia.



Kuva 2-5: Jännitevälipiiriohjattu taajuusmuuttaja. Tässä tasasuuntaajana toimii diodisilta ja vaihtosuuntaajana tyristorisilta.

Tasasuuntaajapiiri on usein diodisilta tai puoliksi ohjattu silta, kun vaihtosuuntaajapiiri on toteutettu IGBT-komponenteilla. [1]

### 2.2.1 Tasasuuntaajapiiri

Tasasuuntaajapiiri koostuu usein vaihtovirta kuristimesta, tasasuuntaavasta sillasta ja suodatin kapasitansseista.

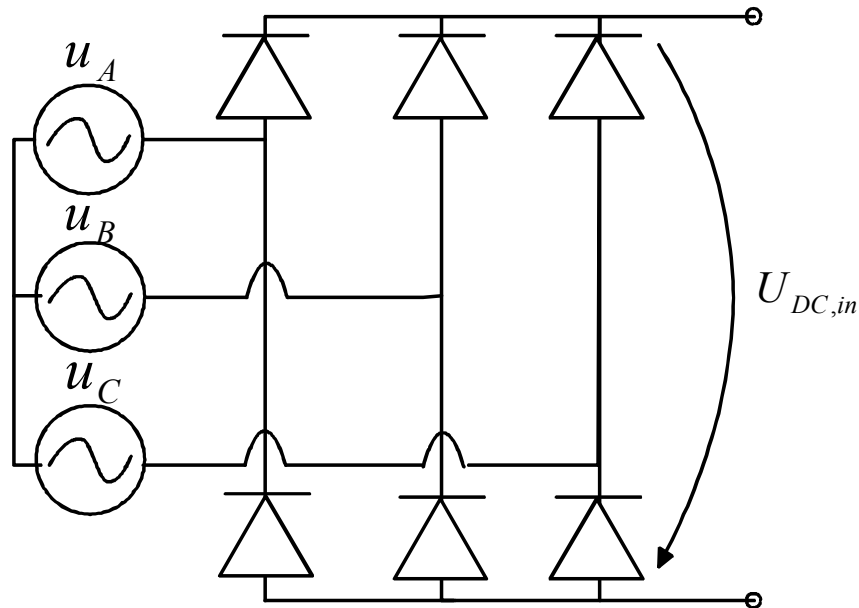
Kuristinta käytetään tasoittamaan verkkovirrassa esiintyviä yliaaltoja. Kuristin on sijoitettu vaihtosähköpuolelle ennen tasasuuntaavaa siltaa rajoittamaan virran

nousunopeutta kommutointi hetkellä. Kuristin vaimentaa myös taajuusmuuttajan elektromagneettista säteilyä.

Tasasuuntaava silta on yleensä standardi 3-vaiheinen 6-pulssidiodisilta tai kolmesta tyristorista ja kolmesta diodista muodostettu silta. Pienemmissä sovellutuksissa käytetään usein puhdasta diodisiltaa, jossa piirin rele on auki välipiirin kapasitanssin latautuessa ja resistanssi rajoittaa lataavaa virtaa.

Isoissa laitteissa sillassa sijaitsevat kolme tyristoria pitävät sillan irti kytkettynä ja latausvirta kulkee diodien ja resistanssin läpi. Lataus kierroksen jälkeen tyristorit ovat jatkuvasti johtavuustilassa eli silta toimii kuin tavallinen puhdas diodisilta. [1]

Kuvassa (2-6) esitetään jännitevälipiirin tasasuuntaajan sijaiskytkentä. Tasasuuntaajalta tulee tasasuunnattu jännite  $U_{DC,in}$ .



Kuva 2-6: Tasasuuntaajana toimivan diodisillan ideaalinen malli.

Vaihejännitteet on määritelty seuraavasti:

$$u_A = \hat{u}_{\text{supply}} \cdot \cos(\omega t) \quad (2-40)$$

$$u_B = \hat{u}_{\text{supply}} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-41)$$

$$u_C = \hat{u}_{\text{supply}} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2-42)$$

Jännitteiden  $u_A, u_B$  ja  $u_C$  välillä on  $120^\circ$  vaihesiirto.

Kuvan (2-6) tasasuuntaajan kolme ylintä diodia toimivat korkeimman jännitteen valitsijoina, koska joku näistä kytkeytyy korkeimpaan vaihejännitteeseen. Taas yksi alimmista diodeista kytkeytyy aina alimpaan vaihejännitteeseen. Joten tasajännite voidaan laskea yksinkertaisesti korkeimman ja alimman vaihejännitteen erotuksena

$$U_{DC,in} = \max\{u_A, u_B, u_C\} - \min\{u_A, u_B, u_C\}. \quad (2-43)$$

Virta  $I_{DC,in}$  riippuu modulaattorin kytkin asennoista ja virtatakaisinkytkennästä saatavasta virrasta  $i_s$ . [6]

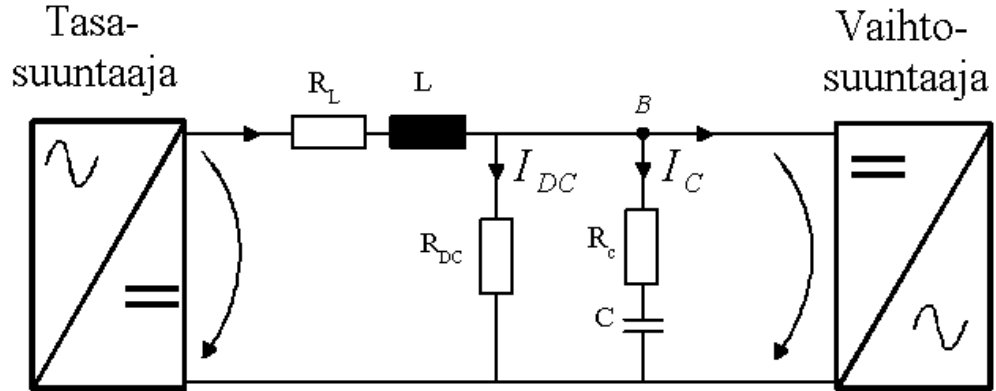
### 2.2.2 Välipiiri

Välipiirin tutkimisessa keskitytään vain jännitevälipiiriin, vaikka muitakin välipiirityyppejä on kehitetty.

Jännitevälipiirissä on kondensaattori, jonka tarkoituksena on pienentää tasajännitteen aaltoisuutta. Jännite välipiirissä voi olla myös tasoituskuristin tasasuuntaajan ja kondensaattorin välissä eli LC-alipäästösuodin, muitakin suodintyypppejä voi käyttää tähän tarkoitukseen.[17] Jänniteohjatussa taajuusmuuttajassa lähtöjännitteen suuruutta säädetään joko välipiirin jännitettä säätämällä tai muuttamalla lähtöjännitteen pulssikuviota. Pulssikuvion muuttamista kutsutaan pulssinleveydenmoduloinniksi PWM (Pulse Width Modulation). [8][14]

## Jännitevälipiirin komponenttien laskenta

Kuvassa (2-7) on jännitevälipiirin sijaiskytkentä [6]



Kuva 2-7: Jännitevälipiiriä kuvaava sijaiskytkentä.

Mallista voidaan laskea seuraavat virrat ja jännitteet. Kuristimen läpi kulkevan virran  $I_{DC,in}$  saadaan laskettua kaavasta

$$I_{DC,in} = \frac{1}{L} \int (U_{dc,in} - U_{DC} - U_{R_L}) dt. \quad (2-44)$$

Kondensaattorin C läpi kulkeva virta  $I_C$  saadaan Kirchofin lain avulla kuvasta (2-6) solmukohdasta B:

$$I_C = I_{DC,in} - I_{DC,out} - I_{DC}. \quad (2-45)$$

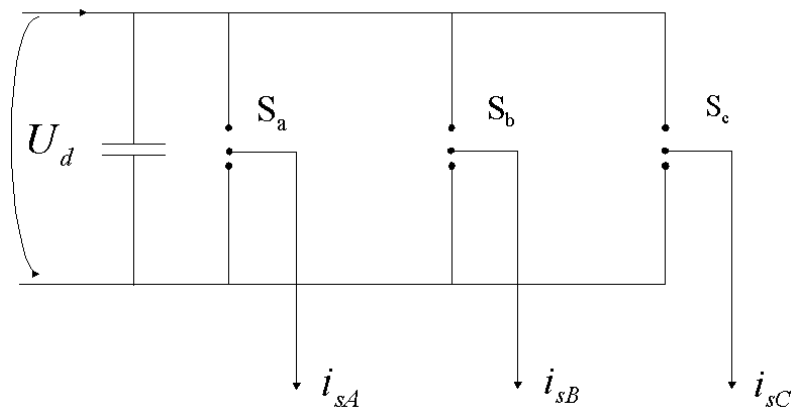
Ulos menevä jännite  $U_{DC,out}$  voidaan määrittää kaavalla:

$$U_{DC,out} = \frac{1}{C} \int I_C dt + R_c I_C, \quad (2-46)$$

missä  $R_c$  on kondensaattorin resistanssi.

### 2.2.3 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja on viimeinen osa taajuusmuuttajan pääpiiriä. Periaatteessa vaihtosuuntaaja on identtinen systeemiä syöttävän tasasuuntaajan kanssa. Kuva (2-8) esittää jännitevälipiirin vaihtosuuntaajan kytkinmallin.

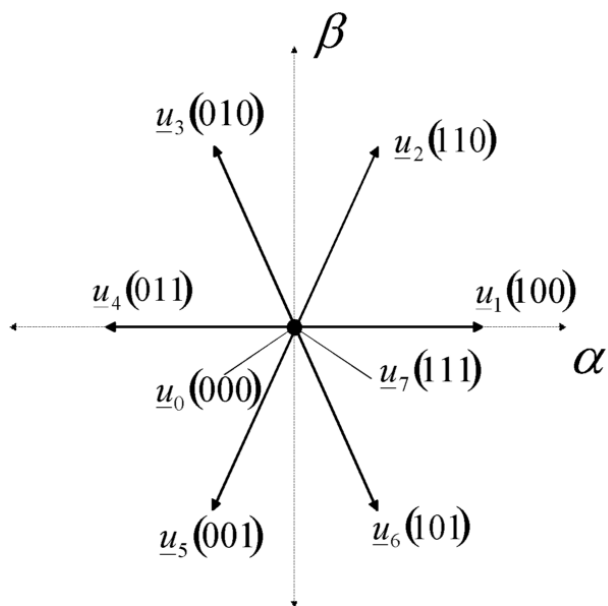


Kuva 2-8: Vaihtosuuntaajan kytkinmalli, missä  $S_a$ ,  $S_b$  ja  $S_c$  ovat vaihekohtaiset kytkemisfunktiot,  $U_d$  on välipiiristä tuleva jännite ( $U_{DC,out}$ ), sekä  $I_d$  on välipiiristä tuleva virta ( $I_{DC,out}$ ).

Kytkemisfunktiot saavat arvot 0 tai 1 sen mukaan, onko vaihtokytkin alhaalla vai ylhäällä.[9] Staattorin jännitevektori riippuu kytkemisfunktiosta.

$$\underline{u}_s^{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \cdot U_d \cdot \left( S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right). \quad (2-47)$$

Vaihtosuuntaajan kolme kytkintä voivat olla kahdeksassa eri asennossa. Kuvassa (2-9) esitetään vaihtosuuntaajan kytkemisfunktioiden yhdistelmiä ( $S_a$ ,  $S_b$  ja  $S_c$ ) vastaavat jännitevektorit kompleksitasossa. Vektoreiden pituus on  $\frac{2 \cdot U_d}{3}$  ja niiden välinen kulma on  $\frac{\pi}{3}$ .



Kuva 2-9: Vaihtosuuntaajan kytkinasentoja vastaavat vektorit.

### Välipiirin virran muodostus kytkintilojen ja virtatakaisinkytkennän avulla

Välipiirin virta on aina jokin vaihevirroista positiivisena tai negatiivisena, lukuun ottamatta nollavektoreita  $\underline{u}_0$  tai  $\underline{u}_7$ . Vaihtokytkimien tilasta tiedetään, minkä vaiheen virta on kyseessä ja mikä on virran suunta. Näistä tiloista voidaan muodostaa taulukko.

Virtatakaisinkytkennästä tuleva virta on muotoa  $\underline{i}_s = i_{sx} + j \cdot i_{sy}$ . Kytkintilojen mukaan voidaan kertoa kompleksimuotoinen virta skalaarisiksi. Taulukossa (2-1) on esitetty tasasuuntaajan virran  $I_d$  muodostuminen kytkinasentojen funktiona.

Jännitevektori ( $S_a, S_b, S_c$ )	Virta $I_d$
$\underline{u}_0$ (000)	0
$\underline{u}_1$ (100)	$\frac{2}{3}i_{sx}$
$\underline{u}_2$ (110)	$\frac{1}{3}i_{sx} + \frac{1}{\sqrt{3}}i_{sy}$
$\underline{u}_3$ (010)	$-\frac{1}{3}i_{sx} + \frac{1}{\sqrt{3}}i_{sy}$
$\underline{u}_4$ (011)	$-\frac{2}{3}i_{sx}$
$\underline{u}_5$ (001)	$-\frac{1}{3}i_{sx} - \frac{1}{\sqrt{3}}i_{sy}$
$\underline{u}_6$ (101)	$\frac{1}{3}i_{sx} - \frac{1}{\sqrt{3}}i_{sy}$
$\underline{u}_7$ (111)	0

Taulukko 2-1:Vaihtokytkimen tilaa vastaava välipiirivirta

### 2.2.3.1 Vektorimodulointi

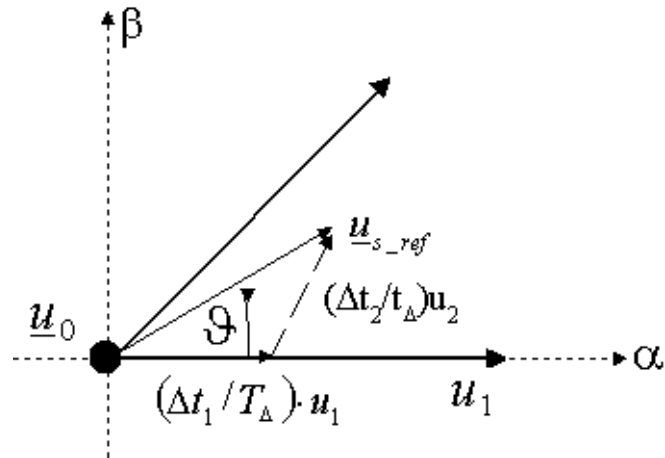
Vaihtosuuntaajissa käytetyin modulointimenetelmä on pulssinleveysmodulointi PWM (pulse width modulation), jonka toimintaa jatkossa selvitetään.

Kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan johtoajat voidaan ratkaista keskiarvoperiaatteella, jonka  $\frac{2 \cdot U_d}{3}$  pitkät jännitevektorit ovat esitetty kuvassa (2-9). Kuvassa (2-10) esitettyä ohjearvovektoria  $\underline{u}_{s\_ref}$  vastaava keskiarvoinen vektori on toteutettavissa käyttämällä vektoreita  $\underline{u}_1$  ,  $\underline{u}_2$  ja nollavektoria  $\underline{u}_0$ . Tällöin saadaan



$$\underline{u}_{s\_ave}^{\alpha\beta} = \frac{1}{T_{\Delta}} (t_0 \underline{u}_0 + t_1 \underline{u}_1 + t_2 \underline{u}_2) = \underline{u}_{s\_ref} \quad (2-48)$$

missä  $T_{\Delta}$  on modulointijakso ja  $t_0$ ,  $t_1$  ja  $t_2$  ovat vastaavien jännitevektoreiden  $\underline{u}_0$ ,  $\underline{u}_1$ , ja  $\underline{u}_2$  käyttöaikoja. Kuvassa (2-10 esitetään vektori  $\underline{u}_{s\_ref}^{\alpha\beta}$  rajattuna



Kuva 2-10: Vektori  $\underline{u}_{s\_ref}^{\alpha\beta}$  esitettynä käyttöaikojen avulla staattorikoordinaatistossa.

Geometriaa hyväksi käyttämällä voidaan ratkaista vektorien käyttöajat

$$t_1 = \sqrt{3} \cdot T_{\Delta} \cdot \frac{\underline{u}_{s\_ref}}{U_d} \cdot \sin(60^\circ - \vartheta), \quad (2-49)$$

$$t_2 = \sqrt{3} \cdot T_{\Delta} \cdot \frac{\underline{u}_{s\_ref}}{U_d} \cdot \sin \vartheta, \quad (2-50)$$

$$t_0 = T_{\Delta} - t_1 - t_2, \quad (2-51)$$

missä  $\vartheta$  on ohjearvovektorin kulma  $\alpha$ -akseliin nähden.

Muissa kuudenneksissä oleville vektoreille voidaan toteuttaa samat operaatiot vastaavalla tavalla. On kuitenkin huomioitava, että toteutettavissa ovat vain ohjearvovektorit, joiden kärki on kuusikulmion sisällä. Eikä minimipulssien takia

mikään käyttöajoista  $t_0$ ,  $t_1$  ja  $t_2$  saa tulla liian pieneksi.[17] Tahdistamattomassa moduloinnissa jakso  $T_\Delta$  on vakiopituinen.

Jännitevektorien käyttöjärjestys voidaan valita monella tavalla, seuraavassa esitettävä tapa tuottaa sinikolmiovertailua muistuttavan jännitteen. Olkoon vektori  $\underline{u}_{s\_ref}^{\alpha\beta}$  vektorien  $\underline{u}_1$  ja  $\underline{u}_2$  rajoittamassa sektorissa. Lasketaan käyttöajat yhtälöiden (2-40), (2-41) ja (2-42) mukaisesti ja valitaan jakson  $T_\Delta$  mittainen sekvenssi

$$---\langle t_0 \rangle \rightarrow +--\langle t_1 \rangle \rightarrow ++-\langle t_2 \rangle \rightarrow +++\langle t_0 \rangle$$

Seuraavassa sekvenssissä käyttöajat lasketaan uuden ohjearvovektorin mukaan. Kytkinkääntöjen määrän minimoimiseksi jännitevektorien käyttöjärjestys on käänteinen edelliseen sekvenssiin nähden.

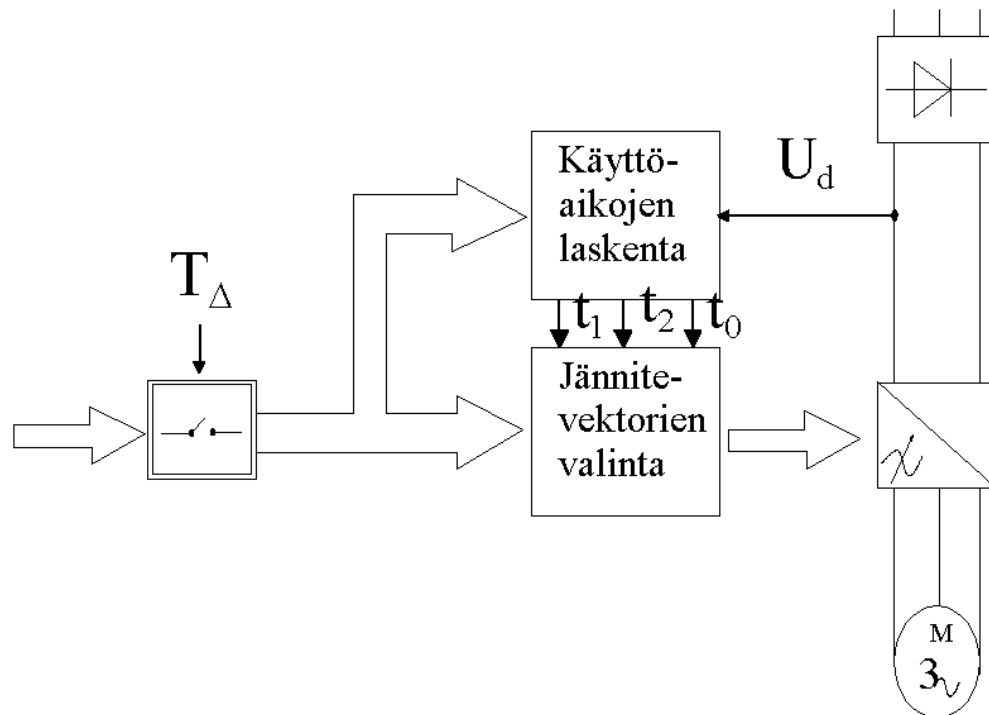
$$+++ \langle t_0 \rangle \rightarrow ++-\langle t_2 \rangle \rightarrow +--\langle t_1 \rangle \rightarrow ---\langle t_0 \rangle$$

Kaksi edellisen tapaista sekvenssiä muodostaa yhden kytkentäsekvenssin, jonka kesto on kytkentäjakso  $T_{sw}$ . Kytkentäjakson aikana muodostetaan kaksi jännitteen ohjearvovektoria. [10]

Koska kytkentäjakson aikana kaikki kytkimet kääntyvät kerran edestakaisin, saadaan kytkentätaajuudeksi

$$f_{sw} = \frac{1}{T_{sw}} = \frac{1}{2T_\Delta}. \quad (2-52)$$

Vektori  $\underline{u}_{s\_ref}^{\alpha\beta}$  toimii kaikissa sektoreissa samalla periaatteella. Kuvassa (2-11) esitetään vektorimoduloinnin periaatteellinen lohko-kaavio.



Kuva 2-11: Vektorimoduloinnin periaatteellinen lohkokaavio. Kuviossa on esitetty näytteenotto jakson  $T_\Delta$  välein, jännitevektorien valinta ja käyttöaikojen laskenta.

### 3 SÄHKÖKÄYTÖN OHJAUS JA SÄÄTÖ

Vaihtosähkökoneiden ohjaukseen ja säätöön on kehitetty monia menetelmiä, esimerkkeinä skalaari- ja vektorisäätö. Skalaariset menetelmät ovat yksinkertaisin tapa säätää taajuusmuuttajan antamaa nopeus- tai momenttiohjetta. Skalaarisäätö soveltuu erinomaisesti dynamiikka vaatimuksiltaan vähäisiin käyttöihin, kuten pumppuihin ja puhaltimiin. [19]

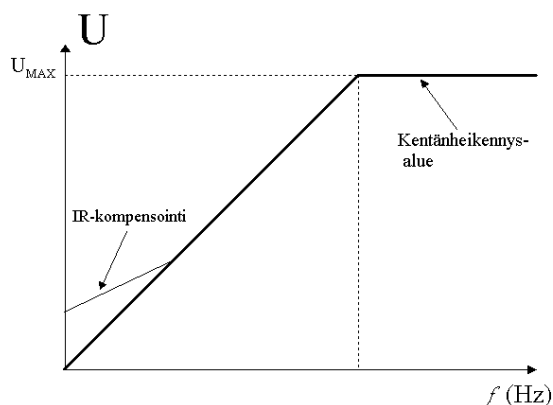
Skalaarisilla menetelmillä säädön tarkkuus on suoraan verrannollinen moottorin jättämään. Yleensä jättämä on suhteellisen pieni, jonka vuoksi tarkkuus on riittävä useimpiin käytännön sovelluksiin.

Ohjaus ja säätö eroavat toisistaan tavassa, jossa pyritään saavuttamaan haluttu tavoite. Ohjaus perustuu ohjearvoihin ja systeemistä muodostettuun malliin, joiden perusteella halutut ohjaussignaalit muodostetaan. Säätö perustuu systeemin lähtö- ja ohjearvojen vertailuun. Lähtö- ja ohjearvojen erotuksen perusteella muodostetaan säätöalgoritmia hyväksikäyttäen ohjaussignaaleja, jotka minimoivat kyseisen erotuksen.

#### 3.1 Skalaariohjaus

Yksinkertaisin tapa sähkömoottorin nopeuden ohjaamiseen on syöttötaajuuden ja -jännitteen ohjaus. Käytännössä staattorijännitteen amplitudin  $U_s$  ja sen taajuuden  $f_s$  suhde pyritään pitämään likimäärin vakiona kentänheikennystä lukuun ottamatta. Skalaariohjauksessa pyörimisnopeuden referenssin ja oloarvon välille jää jättämän suuruinen poikkeama. [4]

Suhde  $U_s/f_s$  muodostaa kuvassa (3-1) esitetyn suoran.



Kuva 3-1:  $U/f$ -käyrä, taajuusohjeen ollessa noin 30% tai alle nimellistaajuudesta ollaan kompensointi alueella ja taajuuden ylittäessä nimellisarvon siirrytään kentänheikennysalueelle.

Tämän kaltainen nopeuden ohjaus perustuu moottorin pysyvän tilan yhtälöihin, koska ohjataan vain jännitteen skalaarisia ominaisuuksia, eli taajuutta ja itseisarvoa. Jännite- tai virtavektorin suuntakulmiin ei aktiivisesti vaikuteta. Käytönohjaus pysyvän tilan yhtälöillä muutostilanteessa on mahdotonta, joten skalaariohjausmenetelmien dynamiikka on heikkoa. Toisaalta moottorin parametrejä ei tarvitse tietää.

Koska skalaariohjauksessa staattorivirtaa ei säädetä, voivat välipiirijännitteen  $U_d$  muutokset ja vaihtokomponentit näkyä vääntömomentissa. Nopeusohjeen muutosnopeutta on rajoitettava, muuten seurauksena voi olla liian suuri virta ja hidastuksessa välipiirin jännitteen nouseminen yli sallitun. Parempaan dynamiikkaan päästään käyttämällä muutostilanteissa päteviä moottorin avaruusvektorimallin yhtälöitä. Vektoryhtälöihin perustuvia säätömenetelmiä tarkastellaan tarkemmin tämän luvun loppuosassa.

### 3.1.1 Jännitevälipiiri-taajuusmuuttajan skalaariohjaus

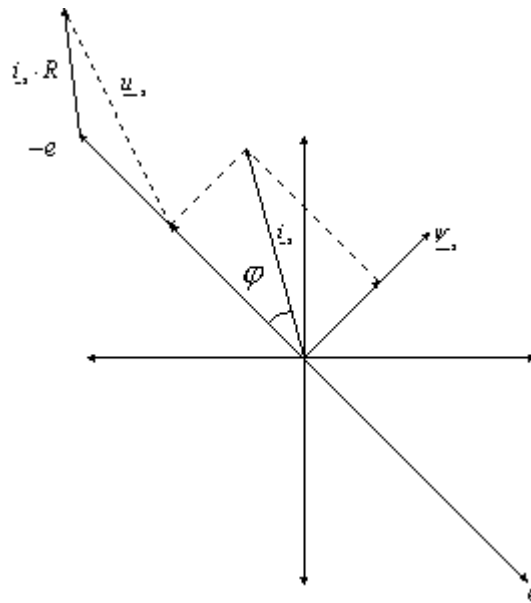
Jännitevälipiirillisellä taajuusmuuttajalla syötetyn kuorman skalaariohjaus perustuu pysyvyystilan jänniteyhtälöön

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d}{dt} \underline{\psi}_s . \quad (3-1)$$

Staattorin derivaatta on kaavan

$$\frac{d\underline{\psi}_s}{dt} = \frac{d\underline{\psi}_s e^{j\omega t}}{dt} = j\omega \underline{\psi}_s e^{j\omega t} = j\omega \underline{\psi}_s \quad (3-2)$$

mukainen. Kuvassa (3-2) esitetään moottorin vektoreita kuvaava osoitinpiirros.



Kuva 3-2: Moottorin vektoreita kuvaava osoitinpiirros. Staattorin jännitevektori muodostuu sähkömotorisesta voimasta  $e$  ja resistiivisestä jännitehäviöstä  $\underline{i}_s \cdot R$ .

Skalaariohjauksessa ollaan kiinnostuneita lähinnä itseisarvoista. Kun syöttöjännite pidetään vakiona, staattorijännitteen ohjearvoksi saadaan

$$u_{s,ref} = R_s i_s + \omega_{ref} \psi_{s,ref} . \quad (3-3)$$

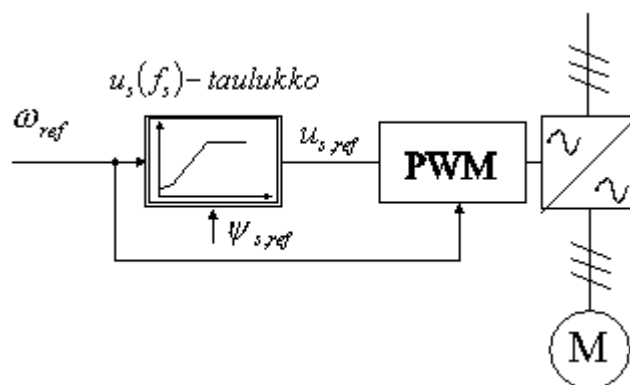
Kaavassa oletetaan staattoriin indusoituvan jännitehäviön  $R_s i_s$  olevan karkeasti staattoriin indusoituvan liikejännitteen suuntainen. Pienillä nopeuksilla kuormalle syötettävään jännitteeseen tulee lisätä jännitehäviön suuruinen lisä. Tätä lisää kutsutaan IR-kompensoinniksi. Suurilla nopeuksilla resistiivisen termin merkitys on niin vähäinen että se voidaan unohtaa, koska se on niin pieni termiin  $\omega_{ref} \psi_{s,ref}$  verrattuna. Koska IR-

termi jätetään huomioimatta saadaan ohjausperiaate joka on esitetty kaavassa (3-4). Taajuusohjeen ollessa suoraan verrannollinen nopeusohjeeseen saadaan käänmivuon ohjearvolle yhtälö

$$\psi_{s,ref} = \frac{u_{s,ref}}{2 \cdot \pi \cdot f_s} \quad (3-4)$$

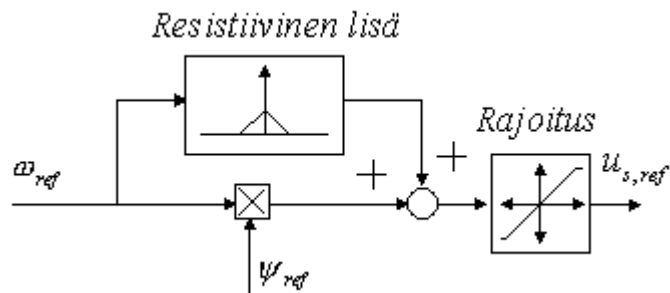
Skalaariohjauksessa ei pyritä vaikuttamaan kuorman virtaan mitenkään, joten se toimii periaatteessa samoin kuin verkosta syötetty. [17] Systeemin stabiilius riippuu yksin kuorman stabiiliudesta. Tämä voi aiheuttaa ongelmia varsinkin suuritehoisilla kuormilla. Stabiiliutta voidaan parantaa lisäämällä takaisinkytkentöjä esimerkiksi vaihevirroista, mutta silloin siirrytään skalaarisäädön puolelle.

Kun käytön halutaan toimivan nimellinopeutensa yläpuolella, käytetään kentänheikennystä. Tällöin moottorin vuota pienennetään kääntäen verrannollisesti nopeuteen nähden lähtöjännitteen pysyessä maksimissaan. Kentänheikennyksessä ilmavälivuo pienenee ja staattorivirran rajoituksien takia vääntömomentti laskee. Seuraavassa on esitetty lohkokkaavio miten skalaariohjaus on toteutettavissa.



Kuva 3-3: Skalaariohjauksen lohkokkaavio. Resistiivinen jännitehäviö ja kentänheikennys on sisällytetty  $u(f)$  taulukkoon, josta saadaan modulaattorille syötettävä jänniteohje  $u_{s,ref}$ .

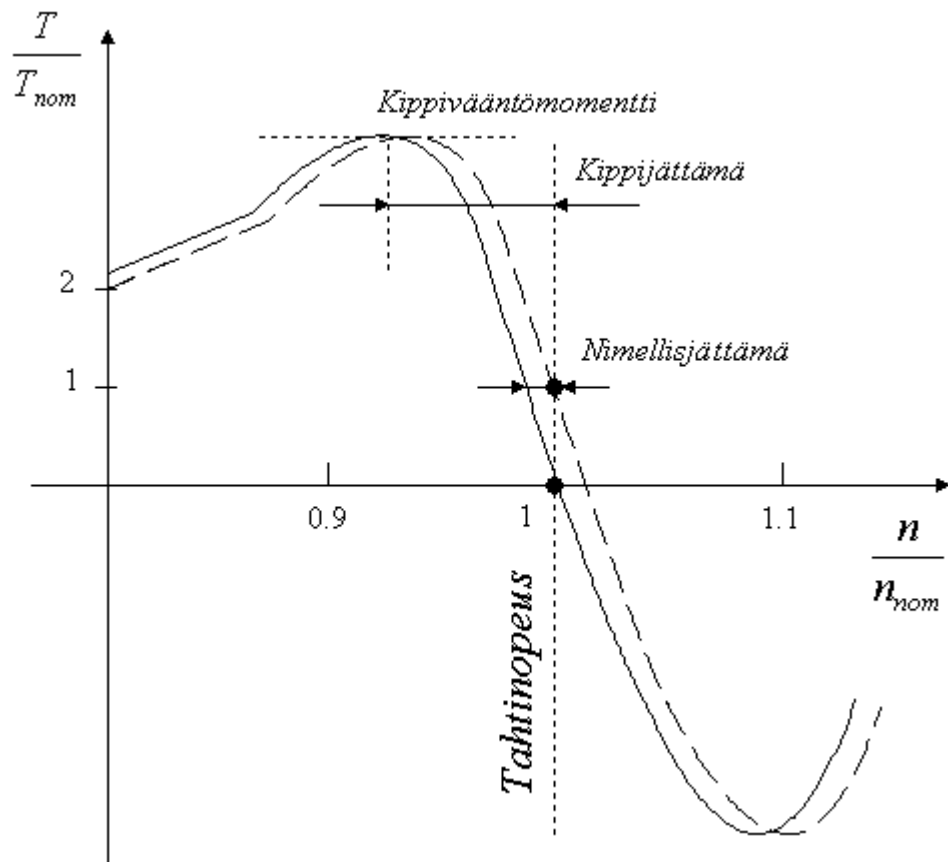
Seuraavana on esitetty tapa miten  $u(f)$  voi korvata resistiivisellä lisällä.



Kuva 3-4: Vaihtoehtoinen toteutus jännitetaulukolle. Kentänheikennys toteutetaan rajoittamalla jänniteohje nimelliseen jännitteeseen. [10]

Mikäli taajuusohjetta  $f_{ref}$  kasvatetaan jatkuvuustilassa, voi jättämä ylittää kippivääntömomenttia vastaavan arvon, jolloin moottori joutuu epästabiiliin tilaan. Samanlainen tilanne voi syntyä taajuuden ohjearvon laskiessa askelmaisesti tai kuormaiskussa. Siksi on tärkeää huolehtia, että kiihdytyksen ja jarrituksen aikana mekaaninen nopeus seuraa kulmanopeuden ohjearvoa, jolloin jättämä ei pääse kasvamaan liiaksi. Kuvassa (3-5) esitetään vääntömomentin riippuvuutta pyörimisnopeudesta.





Kuva 3-5: Nimellistaajuudella syötetyn oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyrä (yhtenäinen viiva) ja portaattoman nopeussäädön periaate. [17]

### 3.2 Skalaarisäätö

Skalaarisäätö perustuu lähinnä moottorin staattisen tilan tuntemiseen. Skalaarisäätö on perusluonteeltaan taajuussäätö, jossa ohjaussuureina ovat moottorin taajuus, jännite ja edellisten korjaukset virtatakaisinkytkentää käyttämällä. [18]

Skalaarisäätimen ulkoa saama ohje on joko taajuus- tai vääntömomenttiohje. Taajuusohje syötetään suoraan jännitearvolohkon kautta modulaattorille. Vääntömomenttiohje taas syötetään momenttisäätölohkon kautta modulaattorille.

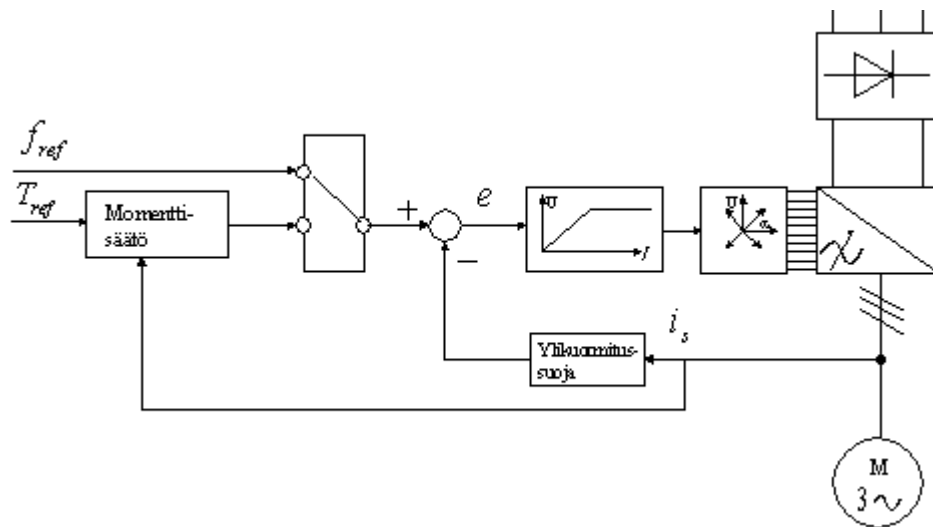
Skalaarisäätö muodostuu kahdesta osasta, taajuussäädöstä ja vääntömomenttisäädöstä. Oleellista on, että vääntömomentin ohjaus perustuu vääntömomentin ja jättämän väliseen pysyvän tilan yhtälöistä johdettavissa olevaan riippuvuuteen

$$T = \frac{3}{2} p \frac{\omega_{slip} \cdot \psi_r^2}{R_r}, \quad (3-5)$$

missä  $\omega_{slip}$  on jättämäkulmataajuus. Jos vuo  $\psi_r$  ja roottoriresistanssi  $R_r$  oletetaan vakioksi, on jättämätaajuus suoraan verrannollinen vääntömomenttiin.[18]

Ensimmäisen vääntömomentin oloarvon määrittämisen vaihtoehto perustuu nopeuden takaisinkytkentään. Takaisinkytkennästä saadaan kulmanopeus, jota voidaan verrata taajuusohjeeseen. Tätä erotusta voidaan käyttää vääntömomenttisäädön oloarvon estimaattina.

Toinen menetelmä moottorin vääntömomentin oloarvon määrittämiseksi perustuu jännitevälipiiristä otettavaan virran mittaukseen. Välipiirin virta on lähestulkoon kaikissa tapauksissa suoraan verrannollinen kuorman ottamaan tehoon. Siis mittaustuloksen ja nopeusohjearvon perusteella voidaan estimoida koneen tuottama vääntömomentti. Kuvassa (3-6) esitetään mahdollinen lohkokaavio skalaarisäädölle.



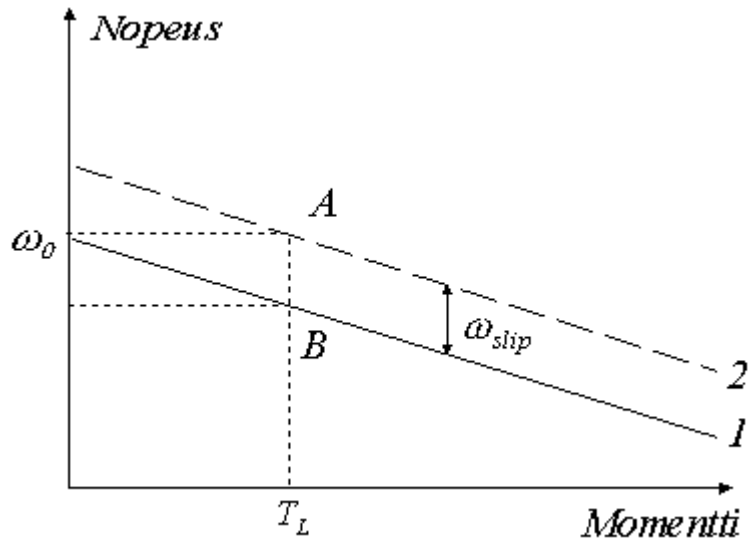
Kuva 3-6: Skalaarisäädön lohkokaavio esitys. Virran takaisinkytkennällä voidaan parantaa säädön toimivuutta ylivirta tilanteissa laskemalla taajuusohjetta virran funktiona. Virran takaisinkytkentä mahdollistaa vääntömomenttisäädön, koska vääntömomentti on verrannollinen virran suuruuteen.

Taajuusohjetta  $f_{ref}$  rajoitetaan virran maksimiarvoa vastaavalla arvolla, jotta invertterissä ei esiintyisi ylivirtoja.

### 3.2.1 Jättämän kompensointi

Sovelluksissa, joissa taajuus muuttuu nopeasti, jättämä vaihtelee kääntäen verrannollisesti taajuuteen. Jättämä kasvaa myös näissä sovellutuksissa niin nopeasti, ettei sitä voi jättää huomioimatta. Erityisesti alhaisilla taajuuksilla tämä ilmiö tulee niin voimakkaaksi, että moottori ei pysty tuottamaan pyydettyä momenttia kuormalle ja pysähtyy.

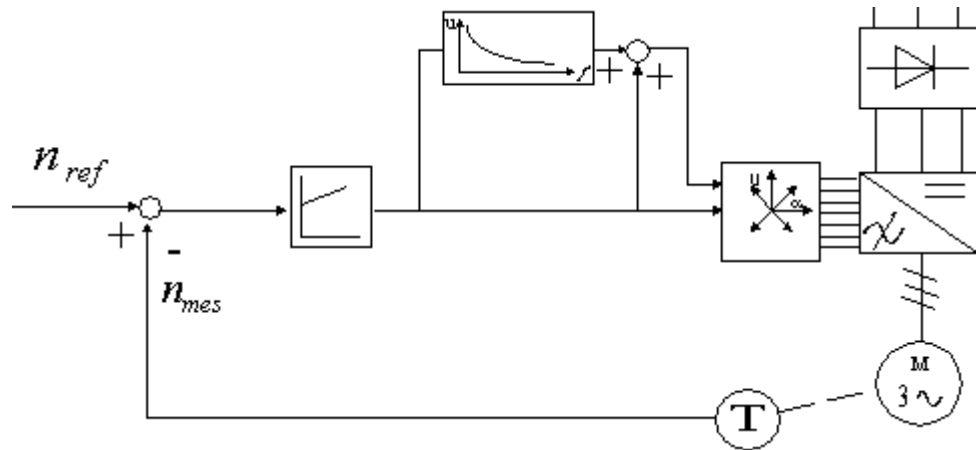
Kompensointi tekniikkaa voidaan selvittää kuvan (3-7) avulla.



Kuva 3-7: Vääntömomentin ja nopeuden riippuvuussuhde. Suora 1 kuvaa roottorin kulmataajuutta  $\omega_r$  ja suora 2 staattorin sähköistä kulmataajuutta  $\omega_s$ . Pisteiden A ja B välinen etäisyys kuvaa jättämetaajuutta  $\omega_{slip}$ . Mitä raskaammin moottori on kuormitettu, sitä pitempi on pisteiden A ja B välinen etäisyys.

Kuvassa (3-7) on esitetty vääntömomentin ja nopeuden riippuvuussuhde. Pisteiden A ja B välinen etäisyys kuvaa jättämetaajuutta  $\omega_{slip}$ . Kun staattorin jännitteen taajuutta kasvatetaan jättämetaajuuden verran saavutetaan uusi taajuus  $\omega_b$ , joka vastaa nimellistaajuutta  $\omega_0$ . Säättämällä staattorijännitteen taajuutta jatkuvasti mekaaninen nopeus voidaan pitää vakiona kaikilla kuorman arvoilla.

Kuvassa (3-8) esitetään skalaarisäätö, jossa sovelletaan jättämän kompensointia.



Kuva 3-8: Nopeustakaisinkytketty skalaarisäätö resistiivisellä lisällä. Nyt taajuusohje riippuu mitatun pyörimisnopeuden  $n_{mes}$  ja pyörimisnopeusohjeen  $n_{ref}$  erotuksesta.

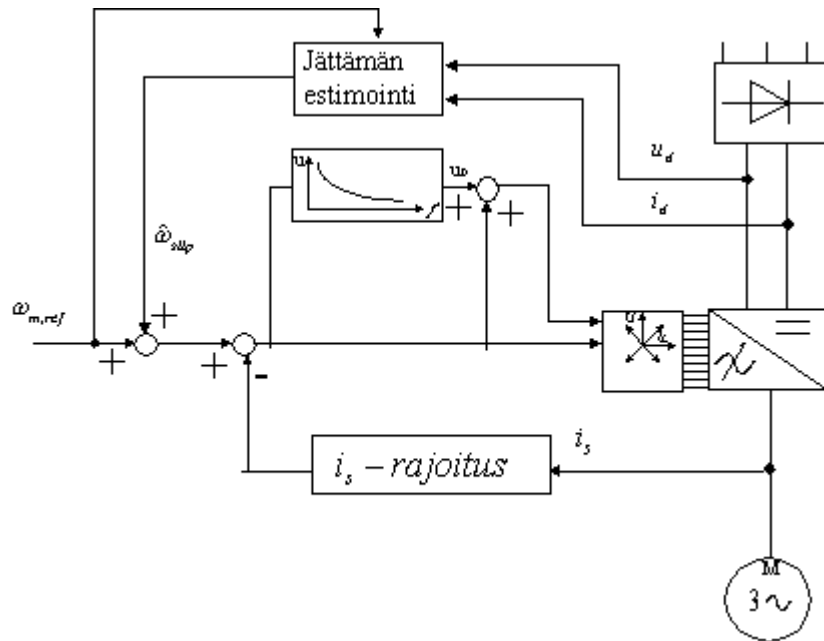
Jos kuormitusmomentin ja pyörimisnopeuden vaihtelua ei sallita, käytetään kuvan (3-8) mukaista säätöpiiriä. Kuvassa moottorin mekaaninen pyörimisnopeus mitataan takometrillä. Kulmanopeuden erosignaali ohjaa PWM-invertterin taajuutta ja jännitettä virranrajoituselimen avulla.

Kulmanopeuden erosignaalista voidaan muodostaa jättämataajuus  $f_{slip}$  PI-säätäjän avulla. Tässä menetelmässä ei tarvita staattoritietoa, joten voimme poistaa kalliin virta takaisinkytkennän. [15]

### 3.2.2 Nopeusvirheen kompensointi estimointia käyttämällä

Jättämän aiheuttaman nopeusvirheen kompensointi onnistuu ilman nopeustakaisinkytkentää käyttämällä nopeusestimaattoria. Nopeusestimaattori määrittää jättämäkulmataajuuden, jonka avulla voimme kompensoida nopeusvirheen.

Kuvassa (3-9) on esitetty esimerkki nopeusvirheen kompensoinnista, joka perustuu jättämäkulmataajuuden estimointiin mitatun välipiiritehon avulla [Mohan s 422-424].



Kuva 3-9: Nopeusvirheen kompensointi estimointia käyttämällä. Välipiirijännitteen ja –virran avulla lasketaan jättämän estimaatti, joka lisätään kulmataajuusohjeeseen nopeusvirheen poistamiseksi.

Jättämäkulmataajuuden estimointia varten tarvittava moottorin ilmaväliteho saadaan laskettua

$$P_\delta = P_d - P_{inv} - P_s - P_{Fe} , \quad (3-6)$$

missä  $P_d$  on välipiiritehon tasakomponentti ja  $P_{inv}$  on vaihtosuuntaajan häviöteho. Staattorin resistansseista syntyvä häviöteho  $P_s$  täytyy arvioida esimerkiksi välipiiritehon ja moottorikilpiarvojen avulla, jos staattorivirtaa ei mitata. Rautahäviöt otetaan mukaan, jos moottorin nimellispistettä vastaavat rautahäviöt tiedetään. [15]

Kaavassa (3-7) esitetään vääntömomentin  $T$  ja jättämätaajuuden  $\omega_{slip}$  välille käämivuosta  $\psi_r$  riippuva yhteys

$$T = \frac{3}{2} p \frac{\omega_{slip} \cdot \psi_r^2}{R_r} = \frac{3}{2} p \frac{L_m \psi_s^2}{L_s R_r} \frac{\omega_{slip}}{1 + (\sigma \cdot \tau_r \omega_{slip})^2} , \quad (3-7)$$

missä  $L_m$  on magnetointi-induktanssi,  $L_s$  staattori-induktanssi,  $\sigma$  hajakerroin ja  $\tau_r$  roottorin aikavakio. Jos roottorin käämivuo  $\psi_r$  on vakio, on jättämäkulmataajuus suoraan verrannollinen vääntömomenttiin. Jos taas staattorin käämivuo  $\psi_s$  on vakio, on jättämän suhde vääntömomenttiin epälineaarinen. Koska skalaarisäädössä ohjataan staattorin käämivuota, on oletus  $\psi_s$  vakio käyttökelpoisempi. Vääntömomentille pätee myös

$$T = \frac{P}{\omega_m / p} = \frac{P_\delta}{\omega_s}, \quad (3-8)$$

missä  $P$  on moottorin teho ja  $P_\delta$  ilmavälissä tapahtuva tehohäviö.

Yhtälöitä (3-7) ja (3-8) käyttämällä saadaan johdettua jättämäkulmataajuuden estimaatille yhtälö

$$\hat{\omega}_{slip} = \frac{1}{2} \sqrt{\omega_{m,ref}^2 + \frac{8}{3} \frac{R_r}{\psi_r^2} P_\delta} - \frac{1}{2} \omega_{m,ref}. \quad (3-9)$$

Pysyvässä tilassa roottorin käämivuo saadaan yhtälöstä (3-9)

$$\psi_r = \frac{1}{\sqrt{1 + (\sigma \tau_r \omega_{slip})^2}} \frac{L_m}{L_s} \psi_s. \quad (3-10)$$

Tarkan jättämäestimaatin saamiseksi yhtälöt (3-11) ja (3-12) voidaan yhdistää. Oletus lineaarisesta jättämän ja vääntömomentin suhteesta kuitenkin riittää useimmissa tapauksissa. Staattorijännitteen kulmataajuuden ohjearvoksi saadaan

$$\omega_{s,ref} = \omega_{m,ref} + \hat{\omega}_{slip}. \quad (3-11)$$

Estimointia käytettäessä skalaarisäätö vaikeutuu parametrien määrän kasvaessa. Estimoidessa tarvitsemme moottorimallista useita eri parametrejä kuten induktanssit, hajakertoimen ja roottoripiirin aikavakion. Tosin estimointi parantaa säädön dynamiikkaa huomattavasti verrattuna suoraan skalaarisäätöön. [14][15]

### 3.3 Vektorisäätö

Vektorisäädöllä tarkoitetaan kaikkia vaihtosuuntaajien ohjaukseen käytettyjä menetelmiä, jotka perustuvat virtavektoreiden jakamiseen vuon suuntaiseen ja tätä vastaan kohtisuoraan komponenttiin. Tätä vektorin jakamista komponentteihinsa, johonkin käänmivuovektoriin kiinnitetyssä kenttäkoordinaatistossa, tunnetaan yleisesti kenttäorientointina.

Vektorisäädön tavoitteena on ohjata konetta oikein myös muutostilanteissa. Tämä vaatii vääntömomentin ja käänmivuon oloarvojen estimointia ja muuttajan ohjausten määrittämistä koneen vektoriyhälöihin perustuen. Kenttäorientoinnilla saadaan ratkaistua helposti oikosulkukoneen haluttua vuota ja momenttia vastaavat virtakomponenttien ohjearvot. Vektorisäädetyissä käytöissä vaihtosuuntaajan lähtöjännitteet muodostetaan tämän jälkeen yleisesti jotakin virran säätömenetelmää käyttäen [Niiranen 1999 s. 85-98].

#### **Kenttäorientointi**

Kaikkien kiertokentän muodostavien pyörivien sähkökoneiden yleisenä lähtökohtana on saada koneen magnetoinnin ja vääntömomentin säätö toisistaan riippumattomiksi. Tällöin koneen sähkömagneettinen tila voidaan asettaa halutuksi. Vuosäädöllä pyritään pitämään staattorin, roottorin tai yhdessä staattorin ja roottorin väliin muodostuneen ilmavälin käänmivuovektorin pituus vakiona. Momentin säädöllä koneen kehittämä vääntömomentti säädetään ohjattavan prosessin sen hetkisten vaatimusten mukaiseksi.

Oikosulkukoneen tapauksessa yleisten periaatteiden toteuttaminen vaikeutuu huomattavasti, koska roottorin virta ei ole erikseen säädettävissä. Sähkökoneen käänmityksissä kulkevat virrat muodostavat koneen vääntömomentin ja vuon. Oikosulkukoneessa vuo- ja momenttisäätö saadaan erotettua säätämällä staattorivirran magnetoinnista huolehtivaa ja momenttia kehittävää komponenttia erikseen. Käytännössä nämä komponentit selvitetään ilmoittamalla virtavektori koneen johonkin



käämivuovektoriin kiinnitetyssä ja siten vuovektorin mukana pyörivässä kenttäkoordinaatistossa.

Kenttäkoordinaatiston vuon suuntaista reaaliakselia kutsutaan yleisesti d-akseliksi ja vuota vastaan kohtisuoraa imaginääriakselia q-akseliksi. Vuon eli d-akselin suuntainen virtakomponentti vaikuttaa vuon itseisarvoon. Vuota vastaan kohtisuora q-komponentti taas muodostaa vääntömomentin.

Yleisimmin käytetään roottorin käämivuovektoreihin sidottua dq- koordinaatistoa, koska roottorivuovektorin hetkellinen kulmanopeus vaihtelee vähiten. Lisäksi sen itseisarvo on helpoin pitää vakiona, koska se muuttuu hitaasti roottoriaikavakion määräämällä nopeudella [Mård s.205-206 ja Niiranen s 85].

Roottorin käämivuon koordinaatistossa pätee siis yhtälö

$$\underline{\psi}_r^{xy} = \psi_{rx} + j\psi_{ry} = \psi_r \cdot e^{j\theta} \quad (3-12)$$

missä  $\psi_r$  on roottorin käämivuon itseisarvo. Staattorikoordinaatistossa lausuttuna käämivuovektori on  $\underline{\psi}_r^{\alpha\beta} = \psi_r e^{j\theta_{\psi r}}$ , missä  $\theta_{\psi r}$  on käämivuokoordinaatiston ja staattorikoordinaatiston välinen kulma.

Vääntömomentille pätee roottorin käämivuon koordinaatistossa

$$T = \frac{3}{2} p k_r \psi_r i_{sy} \quad (3-13)$$

missä  $p$  on moottorin napapariluku ja  $k_r = \frac{L_m}{L_r}$  on roottoripiirin kytkentäkerroin. Jos roottorin käämivuo pidetään vakiona, voidaan vääntömomenttia ohjata suoraan virtakomponentilla  $i_{sy}$ . Roottorin käämivuolle saadaan

$$\tau_r \frac{d}{dt} \psi_r + \psi_r = L_m i_{sx} \quad (3-14)$$

eli roottorin käämivuota säädellään virtakomponentilla  $i_{sx}$ . Kaavassa (3-14) esiintyvä termi  $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$  on roottoripiirin aikavakio. [17][22]

### Vuovektorin kulma määrittäminen

Orientoinnin vuoksi vektori tarvitsee tiedon vuovektorin kulmasta. Koska kulman määrittäminen mittamalla on mahdotonta tehdään se moottorimallin avulla laskemalla. Suora viivaisin menetelmä on laskea estimoidun käämivuovektorin kulmanopeus ja vähentää siitä estimoitu jättämäkulmanopeus. Moottorin kulmanopeuden estimaatti on

$$\hat{\omega}_m = \hat{\omega}_{\psi r} - \hat{\omega}_{slip}, \quad (3-15)$$

missä  $\hat{\omega}_{\psi r}$  on roottorin käämivuovektorin kulmanopeuden estimaatti ja  $\hat{\omega}_{slip}$  jättämäkulmanopeuden estimaatti. Estimoidun käämivuovektorin  $\hat{\psi}_r^{\alpha\beta}$  kulman  $\hat{\psi}_{\psi r}$  avulla saadaan lauseke

$$\hat{\omega}_{\psi r} = \frac{d\hat{\psi}_{\psi r}}{dt} = \frac{d}{dt} \arctan\left(\frac{\hat{\psi}_{r\beta}}{\hat{\psi}_{r\alpha}}\right). \quad (3-16)$$

Kulmanopeus  $\hat{\omega}_{\psi r}$  saadaan numeerisesti derivoimalla. Kulmaa  $\hat{\psi}_{\psi r}$  käytetään myös koordinaatistomuutoksen tekemiseen ja se saadaan esimerkiksi taulukoidun arctan-funktion avulla. Yhtälö (3-16) saadaan muotoon

$$\hat{\omega}_{\psi r} = \frac{1}{\hat{\psi}_r^2} \left( \hat{\psi}_r^{\alpha\beta} \times \frac{d}{dt} \hat{\psi}_r^{\alpha\beta} \right). \quad (3-17)$$

Jättämäkulmanopeuden estimaatti saadaan kaavasta [11]

$$\hat{\omega}_{slip} = \frac{L_m i_{sy}}{\tau_r \hat{\psi}_r}. \quad (3-18)$$

## **Parametrien merkitys säädössä**

Jotta päästään parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen oikosulkumoottorin ohjauksessa, meillä tulisi olla staattorivirtojen ja jännitteiden mittausta sekä mekaanisen pyörimisnopeuden mittausta. Jokainen mittausturi kuitenkin nostaa tuotteen hintaa ja laskee sen luotettavuutta, siksi niiden määrä pyritään pitämään mahdollisimman pienenä. Yleensä valmistajat käyttävät kahden vaihevirran ja välipiirijännitteen mittausta. Kolmas vaihevirta pystytään laskemaan ja kahden mitatun, välipiirijännitteen ja vaihtosuuntaajan kytkinasentojen avulla. Mittausten ja moottorimallin avulla moottorisäätö pystyy tuntemaan moottorin sen hetkisen tilan. Mitä vähemmän mittaustietoja tulee, sitä voimakkaampi moottorisäädön riippuvuus on moottorimallin parametrien tarkkuudesta.

Moottorimalliin tarvittavien parametrien lukumäärä riippuu käytettävästä säätömenetelmästä. Mitä enemmän moottoriparametreja moottorimallin tulee tuntea, sitä laajemmalla alueella ja tarkemmin moottoria pystyy säätämään, mutta sitä herkempi säätö on parametrien virheille. [22]

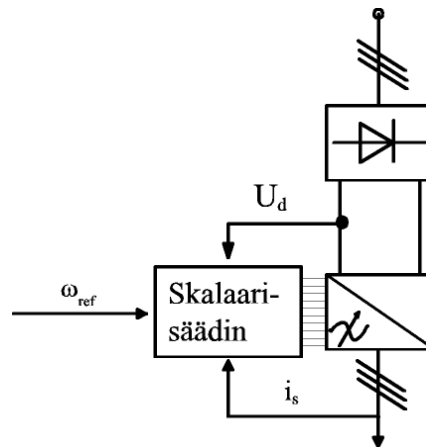
### **3.4 Skalaarisäädön käyttökohteita**

Sovellukset, joissa transienttitilan dynaamiset virheet eivät ole ongelma, ovat skalaarisäädölle sopivia, esimerkkeinä tavalliset teollisuudessa käytettävät pumput, puhaltimet, lingot ja kuljettimet.

Oikosulkumoottoreissa suurilla nopeuksilla säätötapa sopii vaativiin käyttöihin, koska tällöin koneen sisäinen vuonsäätö toteutuu hyvin. Skalaarisäätö sopii monimoottorikäyttöihin, koska se ei tarvitse moottorimallia toimiakseen. Skalaarisäädöllä aikaansaatu väntömomenttivaste on suhteellisen hidas verrattuna staattorissa tehtyihin jännitteen ja taajuuden säätöihin. Tämän takia skalaarisäätö ei sovellu vaativiin servokäyttöihin eikä esimerkiksi valssikäyttöihin.

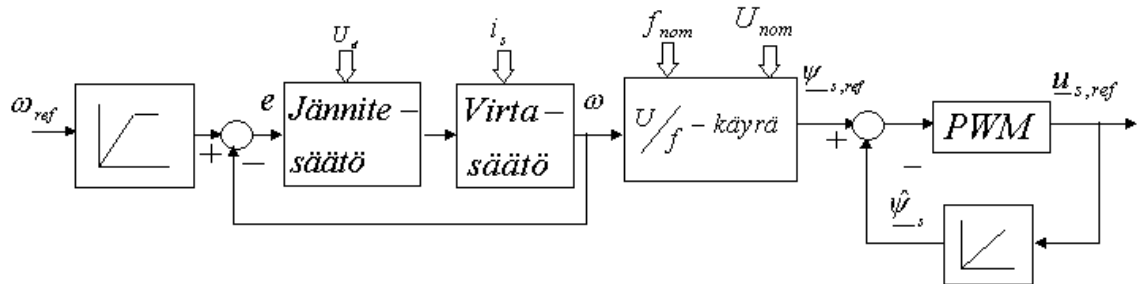
## 4 MOOTTORIMALLITON SKALAARISÄÄTÖ

Tavoitteena on muodostaa skalaarisäätö, joka ei tarvitse toimiakseen nimellisjännitteen ja -taajuuden lisäksi muita parametrejä. Normaalisti erilaiset ohjaukset ja säädöt tarvitsevat mallin kuormasta toimiakseen tyydyttävällä tavalla. Malli sovitetaan ACS800:n antamiin toimintakehyksiin, eli käytössä on virran ja välipiirin jännitteen takaisinkytkentä. Malli eroaa aikaisemmista ACS800 ympäristöön tehdyistä skalaarisäädöistä siinä, ettei moottorimallista saatavia parametrejä ole käytössä. Kuvassa (4-1) esitellään säädettävän vaihtovirtakäytön lohkokaavio.



Kuva 4-1:Skalaarisäädetty vaihtovirtakäyttö virran ja välipiirin jännitteen takaisinkytkennällä. Skalaarisäädin ohjaa kuormaa syöttävää invertteria.

Mallissa käytetään skalaarisäädön perusyhtälöä (3-3). Mallin skalaarisäädin osuus koostuu on  $U/f$ -käyrän muodostuksesta, PWM-modulaattorista, virta- sekä jännitesäätimistä ja taajuusrampista. Skalaarisäätimen lohkokaavio on seuraavanlainen.



Kuva 4-2: Taajuusohjeen kulku skalaarisäätimessä. Systeemiin tulee sisään taajuusohje  $\omega_{ref}$  ja ulostulossa on staattorille syötettävä jännite  $\underline{u}_{s,ref}$ .  $U_d$  on välipiirin tasajännite ja  $i_s$  on virran takaisinkytkennästä saatava arvo. Systeemissä säädetään vain jännitteen skalaarisia ominaisuuksia, eli taajuutta ja itseisarvoa.

Huomioitavaa on, että ennen  $U/f$ -käyrän muodostusta käytetty signaali on skalaari ja sen jälkeen muuttuu vektoriksi. Tämä johtuu siitä että ACS800:a on suunniteltu ensisijaisesti vektorisäätöön, joten mallin tulee sopeutua siihen.

Jatkossa esittelemme kaikki skalaarisäätimen lohkot erikseen. Erityisesti kompensointi, virtasäätö ja jännitesäätö ovat tarkastelun kohteina.

#### 4.1.1 U/f-käyrä

$U/f$ -käyrän muodostuksen toteutus on hyvin yksinkertainen. Lohkoon tulee sisälle kulmataajuusohje, jota integroidaan vuokulman  $\theta$  määrittämiseksi

$$\theta = \int \omega_{ref} dt \quad (4-1)$$

Lohkoon tulee myös kuorman nimellisjännite  $U_{nom}$ . Nimellisjännite skaalataan taajuusohjeella  $\omega_{ref}$  ja nimellistaajuudella  $f_{nom}$ , jotta  $U/f$ -käyrä saadaan muodostettua. Vuokulmasta  $\theta$  muodostetaan sini ja cosini funktiot ja kerrotaan ne

skaalatun  $U_{nom}$  :n kanssa. Täten saamme muodostettua vuoreferenssin x- ja y-komponentit

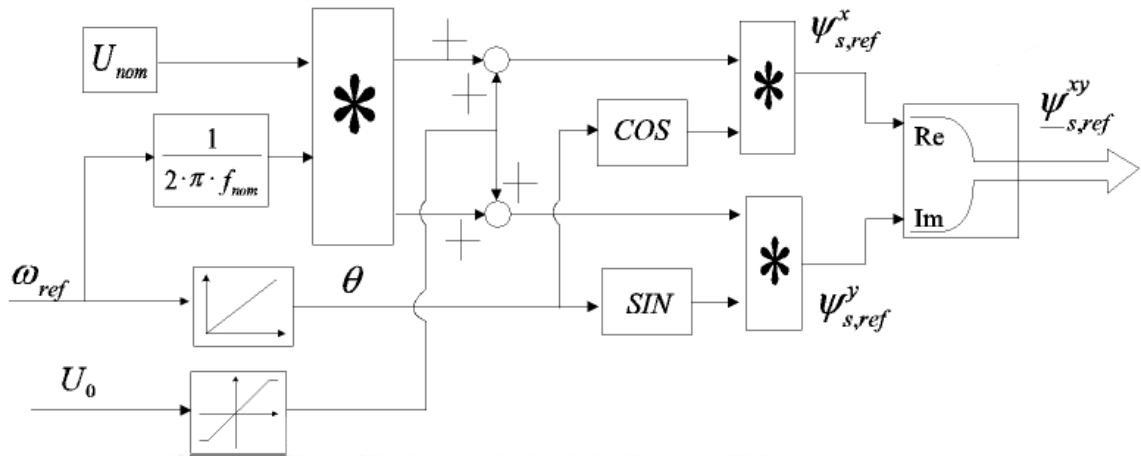
$$\psi_{ref}^x = U_{nom} \cdot \cos \theta \cdot \frac{\omega_{ref}}{2 \cdot \pi \cdot f_{nom}}, \quad (4-2)$$

$$\psi_{ref}^y = U_{nom} \cdot \sin \theta \cdot \frac{\omega_{ref}}{2 \cdot \pi \cdot f_{nom}}. \quad (4-3)$$

Tämän vuo-ohjeen voimme syöttää PWM-modulaattorille, joka muodostaa siitä kuvassa (4-2) esitetyn staattorin-jänniteohjevektorin  $\underline{u}_{s,ref}$ .

Eräs skalaarisäädön suurimmista ongelmista on että kuorman kasvaessa tulee syötettävän jännitteen kasvaa. Kun jännite saavuttaa rajansa ja kuorma jatkaa kasvamista, romahtaa välipiirin jännite, jolloin moottori kippaa. Kippaamista voidaan yrittää estää lisäämällä syötettävään jännitteeseen ns. resistiivinen lisä. Resistiiviseen lisään palaamme tarkemmin kompensoinnin kohdalla.

Kun referenssit  $\psi_{ref}^x$  ja  $\psi_{ref}^y$  yhdistetään muodostuu referenssivektori  $\underline{\psi}_{ref}$  joka syötetään modulaattorille. Kuvassa (4-3) on esitetty lohkokaavio skalaarisäätimestä.



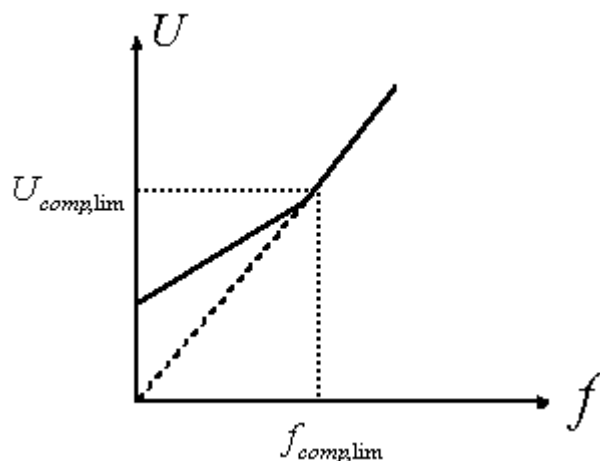
Kuva 4-3:  $U/f$ -käyrän muodostus. Lohkon sisään taajuuden ja jännitteen lisäksi tulee termi  $U_0$ , joka kuvaa resistiivistä lisää. Lohko muodostaa modulaattorille syötettävän referenssin  $\underline{\psi}_{s,ref}^{xy} = \psi_{s,ref}^x + j\psi_{s,ref}^y$ . Taajuusohjeen muutosta on rajoitettu, koska liian nopeat taajuusaskeleet aiheuttavat ongelmia muualla säädössä.

#### 4.1.2 Kompensaattori

Resistiivistä jännitehäviötä kompensoidaan nopeuden ollessa lähellä nollaa. Tavallisin tapa on käyttää yhtälössä (3-3) esiintyvää termiä  $R_s i_s$ .  $R_s i_s$  termi toteutetaan estimoimalla staattoriresistanssia ja kertomalla estimaattia virtatakaisinkytkennän kanssa. Moottorimallittoman säädön tapauksessa estimointi on mahdoton toteuttaa, koska resistanssin estimointiin tarvittavaa moottorimallia meillä ei ole käytössä.

Vaihtoehdoksi jää vain resistiivisen lisän käyttö. Kuvassa (4-3) esiintyvä  $U_0$  kuvaa resistiivistä termiä. Kun taajuusohje on eri suuri kuin nolla ja pienempi kuin  $f_{comp,lim}$ , kompensointi termiä  $U_0$  lisätään jännitteeseen  $U_{nom}$ . Hyvänä arvona  $f_{comp,lim}$ :lle pidetään noin 30%:ia nimellistaajuudesta  $f_{nom}$ . [2] Kuvassa (4-4) nähdään resistiivisen termin vaikutus  $U/f$ -käyrään.





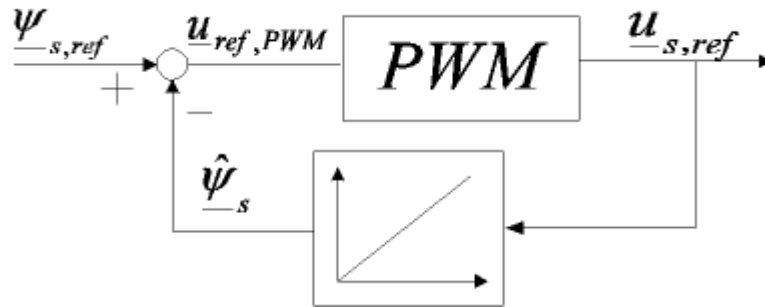
Kuva 4-4: Kompensoinnin vaikutus  $U/f$ -käyrään. Kiinteä viiva kuvaa kompensoitua käyrää kun katkoviiva on kompensoimaton käyrä.

Resistiivinen osuus lähestyy nollaa kaavan (4-4) mukaan

$$\begin{cases} U_0 = \frac{f_{comp,lim} - f_{ref}}{f_{nom}} \cdot U_{nom} & \text{kun } f_{ref} \leq f_{comp,lim} \\ U_0 = 0 & \text{kun } f_{ref} > f_{comp,lim} \end{cases} \quad (4-4)$$

### 4.1.3 Jänniteohjeen muodostus

Jänniteohjeen muodostuksessa sisään tuleva referenssi  $\underline{\psi}_{s,ref}$  vähennetään kuormalle syötettävän jänniteohjeen  $\underline{u}_{s,ref}$  takaisinkytkennän integraalin  $\hat{\underline{\psi}}_s$  kanssa. Referenssin  $\underline{\psi}_{s,ref}$  ja takaisinkytkennän integraalin  $\hat{\underline{\psi}}_s$  erotus syötetään modulaattorille, joka muodostaa siitä kuormalle syötettävän jännitteen. Kuvassa (4-5) esitetään säätimen lohkodeigrammi



Kuva 4-5: Jänniteohjeen muodostuksen lohkokkaavio. Modulaattori muodostaa jänniteohjeen  $\underline{u}_{s,ref}$ , referenssin  $\underline{\psi}_{s,ref}$  ja takaisinkytkennän  $\hat{\underline{\psi}}_s$  erotuksesta.

#### 4.1.4 Modulaattori

Modulaattorin toimintaa on jo alustavasti selitetty toisessa luvussa kappaleessa (2.2.3.1), joten sitä ei tässä tarkemmin käsitellä. Toteutuksessa käytettiin Marko Hinkkasen vuonna 2000 esittelemää mallia. Hinkkasen modulaattori on tehty ACS:n vektorisäätöä varten.

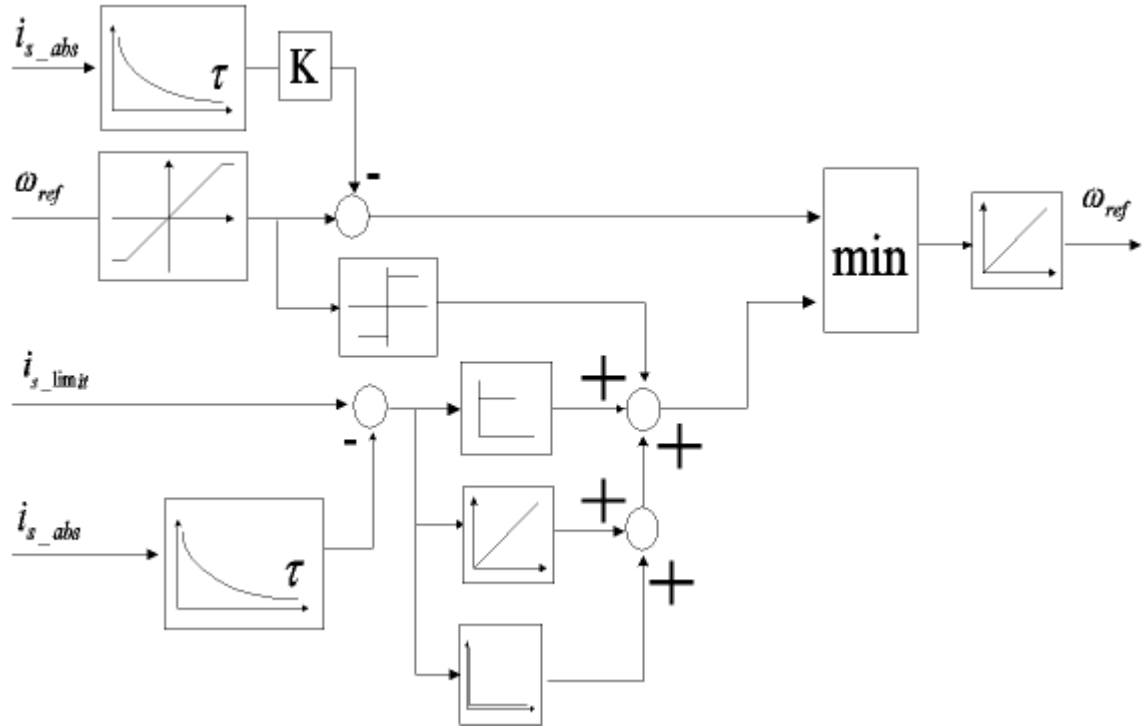
#### 4.1.5 Virtasäädin

Virtasäätimen tarkoituksena on pitää virta kurissa kuorman kasvaessa. Skalaarisäädössä voidaan säätää vain virtavektorin pituutta, mikä tekee virtasäädön vaikeaksi toteuttaa. Seuraavassa esittelemme virtasäätimen erään toteutuksen.

#### Taajuusohjeen rajoitus

Virtasäätö on koko säätöketjun tärkein lenkki. Sen toiminta halutaan taata kaikissa tilanteissa. Virtasäätimeen tulee taajuusohje ja virtavektorin pituus. Virtaa ylipäästösuodatetaan, jonka jälkeen suodatettu virta skaalataan. Suodatetulla ja skaalatulla virralla vähennetään taajuusohjetta virran kasvaessa. Erityisesti tällä tavalla

saadaan pienennettyä virtapiikkejä. Taajuusohjeen säädön lohkokaavio on seuraavanlainen



Kuva 4-6: Lohkokaavio virtasäädön aiheuttamasta taajuusohjeen rajoituksesta. Virtasäädössä käytetään PID-säädintä.

Lisäksi säädön on tarkoitus virran kasvaessa pudottaa taajuusohjetta niin, ettei virta ylittäisi virtarajaa  $i_{s\_limit}$ . Tähän säätöön valittiin PID-säädin, koska se on osoittautunut käytössä hyväksi ratkaisuksi. Ongelmaksi muodostui PID-säätimen kertoimien ja aikavakioiden määrittäminen. Näiden tulisi päivittyä kuormituksen funktiona. P-säätimen parametrin  $K_p$  ollessa liian suuri säädin pakottaa virran pysymään rajojen sisällä liian aggressiivisesti, kun taas integraattorin aikavakion  $\tau_I$  ollessa liian suuri virtapiikkejä pääsee läpi säätimestä. Virtasäätimen parhaan mahdollisen toiminnan varmistamiseksi, PID-säädin tulisi korvata jollain adaptiivisella säätimellä, joka osaisi mukautua parhaiten nopeasti muuttuviin epälineaarisiin kuormitustilanteisiin.

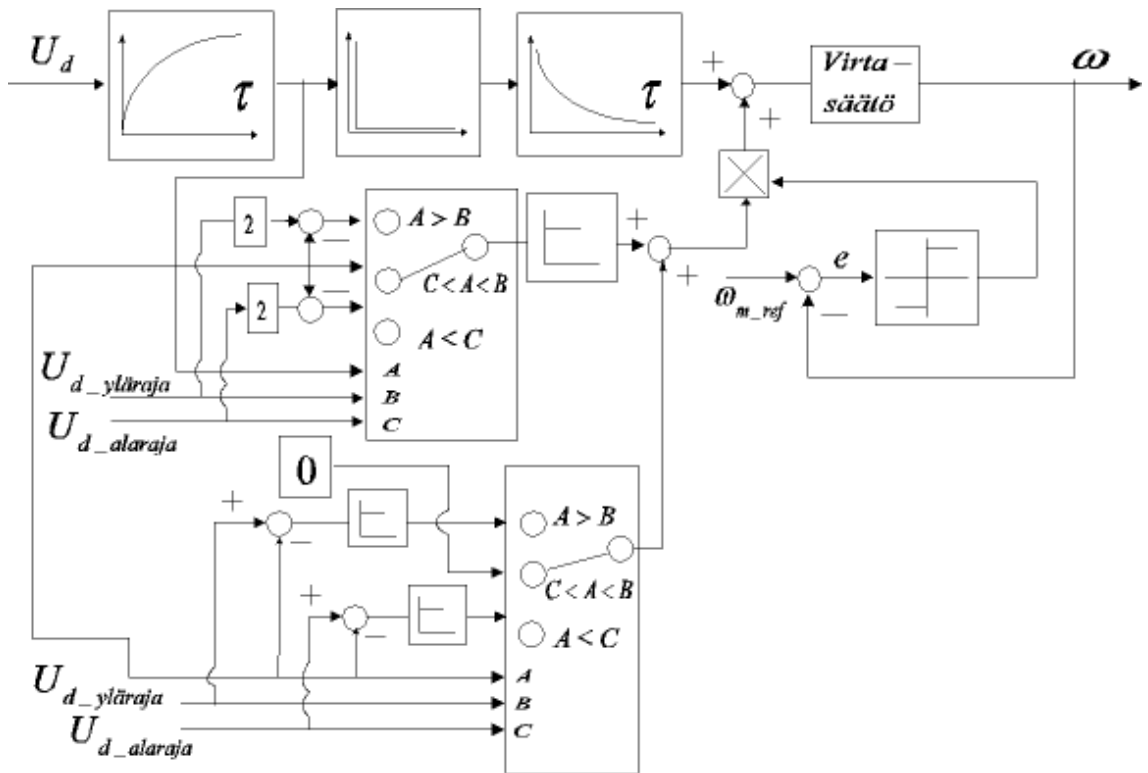
#### 4.1.6 Jännitesäädin

Jännitesäätimellä pyritään rajoittamaan välipiirissä tapahtuvia jännitteen muutoksia. Nopeissa taajuusaskeleissa välipiirin jännite muuttuu nopeasti. Moottoria kiihdytettäessä tai kuorman kasvaessa välipiirin jännite laskee, koska tällöin kuorma tarvitsee lisää energiaa ja ottaa sitä välipiiristä. Jarrutettaessa välipiirin jännite taas nousee, koska moottori syöttää ylimääräisen energian välipiiriin. Ylijännitesäädön tarkoituksena on pitää välipiirin jännite määrätyn rajan alapuolella ja täten suojata laitteen komponentteja. Alijännitesäädön avulla voidaan pitää laite toiminnassa lyhyiden syöttöjännitekatkojen ajan. Välijännitteen säädöllä pyritään pitämään myös välijännite mahdollisimman tasaisena, koska jännitteen värinä lyhentää komponenttien elinikää.

#### Yli- ja alijännitesäätimet

Yli- ja alijännitesäätimien tarkoituksena on pitää välipiirin jännite käyttäjän määräämien rajojen sisällä. Jos välipiirin jännite  $U_d$ :n kasvaa liian suureksi, ylijännitesäätäjä alkaa nostaa taajuusohjetta  $\omega_{ref}$ , mikä laskee  $U_d$ :tä. Kuorman ollessa suuri välipiirin jännite  $U_d$  laskee sallitun rajan alle. Tällöin alijännitesäädin alkaa toimia laskien taajuusohjetta. Tämä toimenpide nostaa  $U_d$ :n takaisin rajojen sisäpuolelle.

Säätimen sisääntuloina ovat välipiirijännite  $U_d$  sekä käyttäjän antaman nopeusohjeen ja virtasäätimeltä lähtevän taajuusreferenssin erotus. Erotuksen merkki hoitaa jännitesäätimen toiminnan suunnan, eli säädin toimii oikein sekä negatiivisella että positiivisella ohjeella. Säätimessä välipiirijännite alipäästösuodatetaan, jonka jälkeen siitä muodostetaan P- ja D-termit, joita kerrotaan sisään tulevan erotuksen merkillä. I-termiä ei säätimeen haluttu, koska välijännitesäätö on sekundäärinen säätö ja jännitteen annetaan liikkua vapaasti haluttujen rajojen sisällä. Jos säädin estää välijännitteen nousun virtasäätimen toiminta voi häiriintyä. Kuten edellä on mainittu, virtasäätö on aina säädössä etusijalla. Kuvassa (4-7) on kuvattu säädin lohkokaaaviona.



Kuva 4-7: Jännitesäädön lohkodeigrammi. Jännitesäädössä käytetään PD-säädintä, joka pitää välipiirin jännitteen haluttujen rajojen sisällä. Kytkinlohkot vertailevat mitattua välipiirijännitettä. Jos välipiirijännite ylittää ylärajan  $U_{d\_yläraja}$  tai alittaa alarajan  $U_{d\_alaraja}$ , P-termi alkaa toimia. Toiminnan suunta määrätään referenssin  $\omega_{m,ref}$  ja virtasäädöstä lähtevän taajuusohjeen erotuksen merkin perusteella.

Useissa sovelluksissa jännitesäädössä käytetään vain P-säätimiä, mutta niiden aggressiivisen toiminnan vuoksi ne eivät sovellu tähän tapaukseen.

#### **4.1.7 Taajuusramppi**

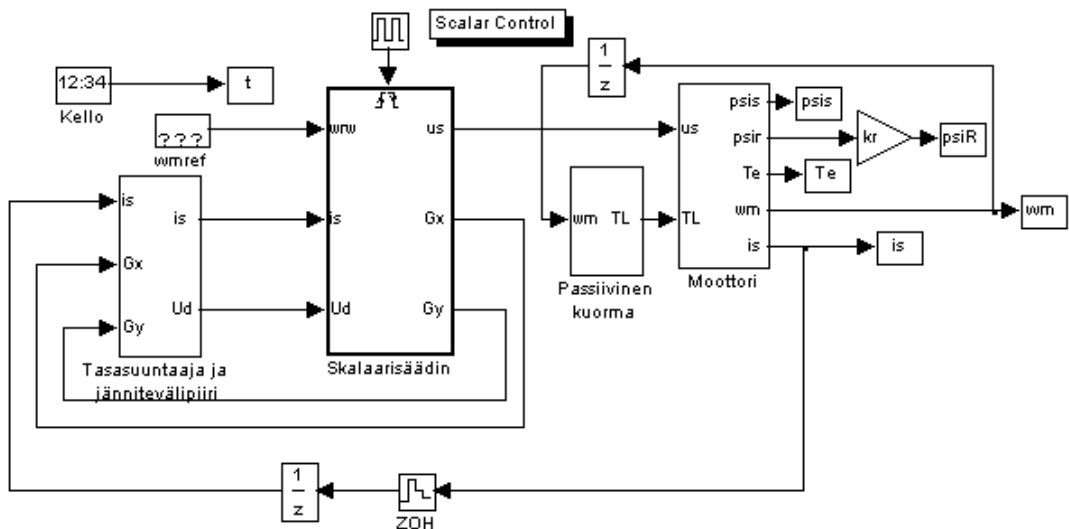
Taajuusohje annetaan usein askelmaisena. Skalaarisäätö ei ole parhaimmillaan nopeissa muutostilanteissa, joten käytetään rampitusta pienentämään nopeiden taajuusaskelien aiheuttamaa värähtelyä systeemissä.

## 5 SIMULOINTI

Tässä luvussa tutkitaan simuloimalla luvussa 4 esitetyn skalaarisäädön ominaisuuksia. Erityisesti keskitytään skalaarisäädölle vaikeisiin tilanteisiin eli virtasäätöön sekä ylä- ja alijännitesäätäjien ongelmiin. Simuloinnissa käytetään MATLAB Simulink ympäristössä mallinnettua järjestelmää, jota simuloidaan vaihtuvilla nopeusohjeilla vaihtuvissa kuormitusilanteissa. Ensimmäisenä esitetään oleelliset simuloitavan kuorman ja säädön parametrit. Lopuksi esitetään simuloinnin tulokset.

### 5.1 Simulointiympäristö

Kuvassa (5-1) esitetään simuloitavan järjestelmän lohkokaavio. Simuloitava malli perustuu Marko Hinkkasen vuonna 2000 esittämään malliin vaihtovirtakäytölle. Skalaarisäätöä varten alkuperäiseen malliin on tehty muutoksia säätölohkoon ja kuorman mallinnukseen. Uutena ominaisuutena esiteltiin välijännitepiirin malli.

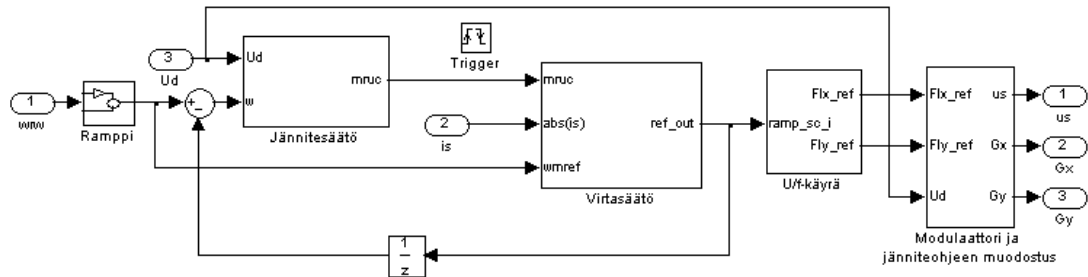


Kuva 5-1: Simuloitavan järjestelmän lohkokaavio. Käyttäjä antaa parametrin  $\omega_{m,ref}$  ja määrittelee kuorman. Simuloinnista saadaan tuloksina mekaaninen nopeus, moottorin virta, moottorille syötettävä jännite, välipiirin jännite ja virta sekä moottorin kehittämä vääntömomentti.

Skalaarisäätimeen syötetään taajuusohje  $\omega_{ref}$ , joka kulkee säätimen taajuussäätöketjun läpi muodostaen moottorille syötettävän aikajatkuvan jännitteen  $\underline{u}_{s\_ref}$ . Moottorilta tulee säätimeen päin aikajatkuva virran takaisinkytkentä, joka diskretoidaan nollannen asteen pitopiirissä (ZOH). Tämä virta kulkee välijännitepiirin lävitse muodostaen välipiirin jännitteen  $U_d$ .

### 5.1.1 Säätölohko

Kuvassa (5-2) on skalaarisäätimen lohkot.



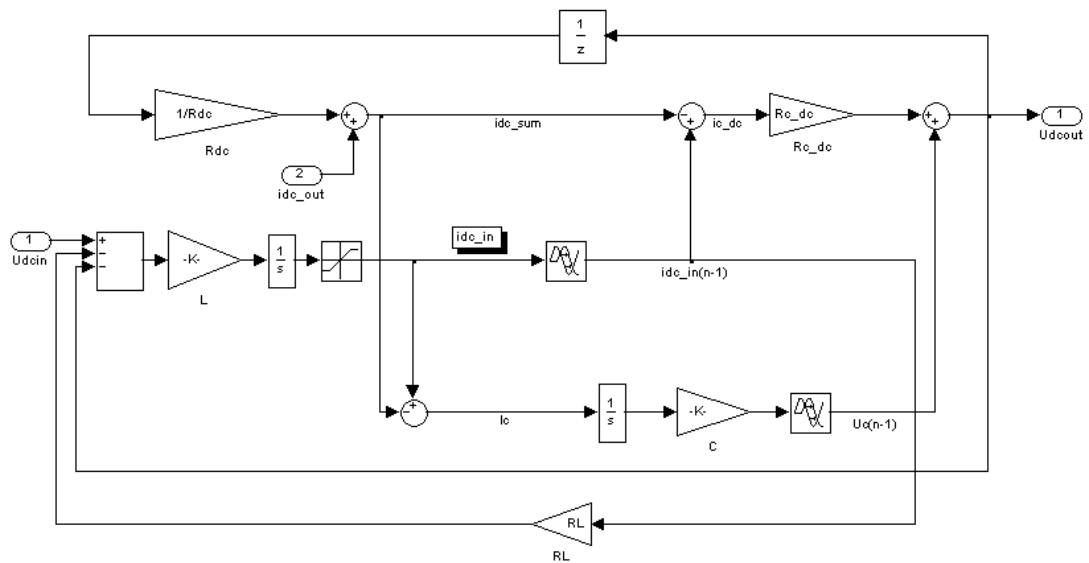
Kuva 5-2: Skalaarisäätimen ylin taso Simulink ohjelmassa.

Skalaarisäätö toimii  $200 \mu s$  aikatasolla. Kaikkien lohkojen sisällä on C-kielellä kirjoitetut säätimet, jotka toteuttavat säädön. Lohkojen ohjelmointi esitellään tarkemmin liitteessä I.

### 5.1.2 Välipiiri

Välijännitepiiriin virta  $i_{DC,in}$  muodostetaan luvussa 2 esitetyn laskennan mukaan. Modulaattorin kytkintiloja kerrotaan diskreetin takaisinkytkentä virran kanssa muodostaen aikajatkuva tasavirta. Diodisillalta tuleva virta ja jännite johdetaan tasajännitepiiriin, josta niistä muodostetaan luvun 2 mukainen tasajännite  $U_d$ , joka johdetaan skalaarisäätimeen.





Kuva 5-3: Välijännitepiirin Simulink-lohkokkaavio. Välijännitepiiri on mallinnettu aika-jatkuvana poiketen muista käytetyistä lohkoista. Välipiiriin sisääntulossa on tasasuuntaajalta tuleva jännite  $U_{DC,in}$ . Välipiirin virta määräytyy kuormituksen funktiona virran takaisinkytkennästä.

Seuraavassa taulukossa on esitetty välijännitepiirin sijaiskytkennän arvot. Arvot on saatu ACS 800:sta.

Taulukko 5-1: Välijännitepiirin parametrit:

Parametri	Arvot
Syöttöjännite $U_{sup\ ply}$	690 V
Kuristimen resistanssi $R_L$	7.9 mΩ
Kuristimen induktanssi $L$	0.20 mH
Välipiirin kapasitanssi $C$	7.8mF
Tasajännite häviöt $R_{DC}$	2kΩ
Hakkurin resistanssi	1Ω

### 5.1.3 Moottori

Kuormana käytettiin jatkuva-aikaisena mallinnettua oikosulkumoottorin L-sijaiskytkentää. Simuloinneissa käytetyn 250 kW moottorin (ABB M2BA 355S 4) nimellisarvot on esitetty taulukossa (5-2).

Taulukko 5-2: Nimellisarvot:

Parametri	Arvo
Teho $P_{nom}$	250 kW
Taajuus $f_{nom}$	50 Hz
Pääjännite $U_{nom}$	380 V
Pyörimisnopeus $n_{nom}$	1487 rpm
Vääntömomentti $T_{nom}$	1606 Nm
Hitausmomentti $J_{nom}$	6.5 kgm <sup>2</sup>
Virta $I_{nom}$	430 A

Taulukossa (5-3) esitellään moottorin T-sijaiskytkennän arvot, jotka on saatu ABB Oy:ltä.

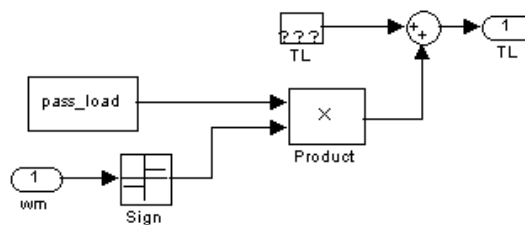
Taulukko 5-3: T-sijaiskytkennän parametrit:

Parametri	Arvot
Staattoriresistanssi $R_s$	0.004 Ω
Roottoriresistanssi $R_r$	0.005 Ω
Magnetointi-induktanssi $L_m$	1.741 Ω
Staattorin hajainduktanssi $L_{s\sigma}$	0.082 Ω
Roottorin hajainduktanssi $L_{r\sigma}$	0.045 Ω

L-sijaiskytkennän parametrien arvot saadaan laskettua T-sijaiskytkennän parametreistä luvussa 1 esitettyjen kaavojen avulla.

#### 5.1.4 Kuorma

Alkuperäisessä mallissa kuorma oli mallinnettu aktiiviseksi, eli moottorille annettiin hetkellisiä momentti-iskuja. Tässä työssä haluttiin mallintaa skalaarisäätö sovelluksille tyypillisempää kuormaa, eli sen haluttiin vastustavan moottoria tasaisesti. Skalaarisäädön ongelmakohtien tutkimista varten jätettiin myös aktiivinen kuorma jäljelle. Kuvassa (5-4) on kuorman Simulink-malli



Kuva 5-4: Kuorman mallinnus. Jatkuva passiivinen kuorma *pass\_load* vastustaa moottoria suhteessa mekaaniseen pyörimisnopeuteen. Tämän lisäksi aktiivinen kuorma *TL* voi antaa hetkellisiä momentti-iskuja moottorille.

## 5.2 Säädön parametrit ja viritys

Moottorin parametrit vastaavat kaikissa simuloinneissa taulukon (5-3) parametrejä. Säätäjät viritettiin kokeellisesti, kunnes systeemi saatiin stabiiliksi. Välipiirin ylä- ja alarajat on määrätty ACS 800:n manuaalin mukaan. Virtarajana käytetään  $2 * I_{nom}$  ja kuormalle syötetyn jännitteen rajana moottorin nimellijännitettä.

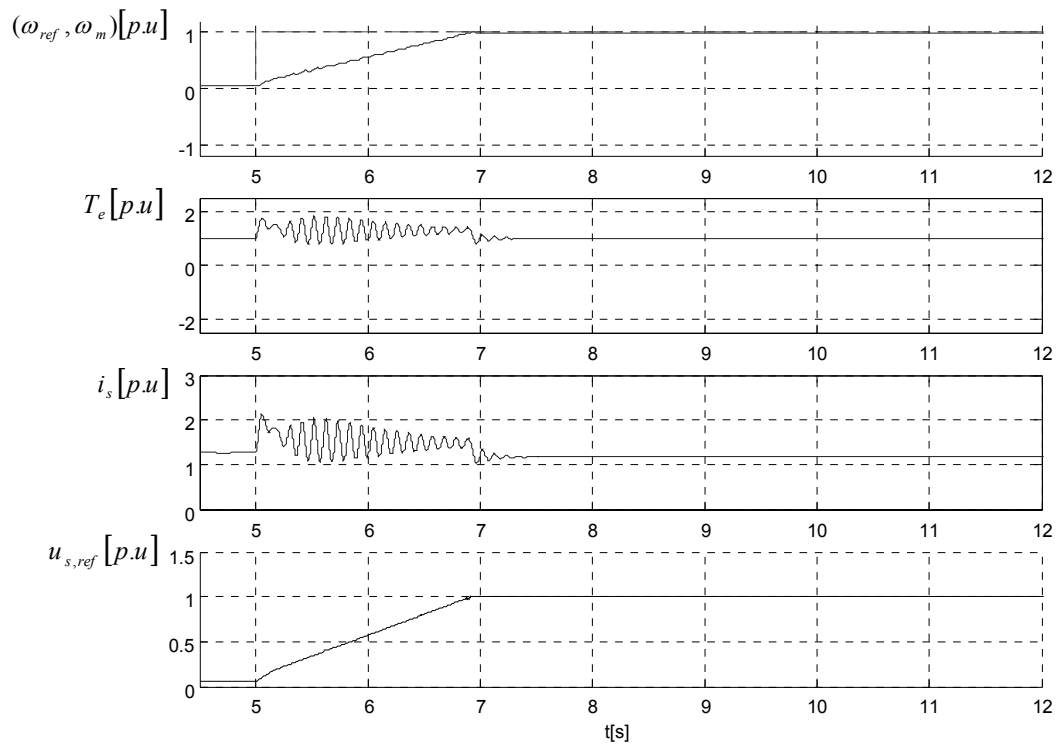
## 5.3 Tulokset

### 5.3.1 Tulosten esitystapa

Tulokset on piirretty MATLAB:lla kuviin, joissa x-akselilla on aika ja y-akselilla mitattava suure. Kaikki mitatut suureet ovat esitetty suhteessa nimellisarvoihin. Näytteenottotaajuutena  $f_{sample}$  käytettiin  $5\text{ kHz}$ .

Kaikissa simuloinneissa taajuusohje lähtee nousemaan 5 % arvosta passiivisen kuorman ollessa asetetussa arvossaan. Kuvassa (5-5) on esitetty tapaus, jossa taajuusohje nousee askelmaisesti nimellisarvoonsa. Kuorman ollessa kaiken aikaa nimellisvääntömomentin suuruinen. Kuvassa (5-5) esiintyvä  $u_{s,ref}$  on kuormalle syötetyn jännitteen itseisarvo. Jatkossa simuloinnit esitetään vastaavalla tavalla.

Jännitesäätimen ylijännitepuolen P-säätimen parametreinä käytettiin ylijännitesäätäjälle  $K_{over} = 3$  ja alijännitesäätimelle  $K_{under} = 10$ . Virtasäätimen P-termin kerroin on  $K_p = 0.02$ , integraattorin kerroin  $K_I = 0.015$  ja derivaattorin  $K_D = 0.001$ .

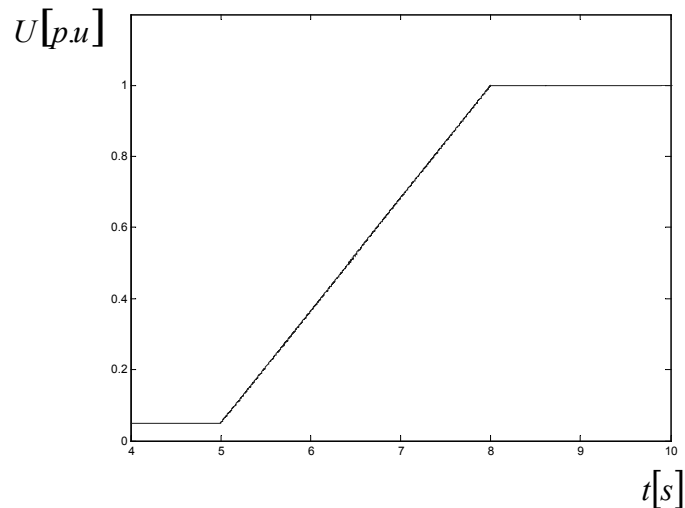


Kuva 5-5: Taajuusohje ( $\omega_{ref}$ ) nousee nimellisarvoonsa askelmaisesti kuorman ollessa moottorin nimellismomentin suuruinen. Jännite- ja virtasäätäjien toiminta saa kuvissa esiintyvät arvot värähtelemään. Taajuussäädön aiheuttama virran ( $i_s$ ) värähtely on skalaarisäädön suurimpia ongelmia. Kuvassa esiintyvä merkintä  $\omega_m$  on moottorin mekaaninen nopeus,  $u_{s,ref}$ -staattorijännitteen amplitudin ohjearvo ja  $T_e$  kuvaa moottorin sähköistä vääntömomenttia.

Kuvasta näkee selvästi, kuinka virta kasvaa moottoria kiihdytettäessä. Kun kiihdytys on ohi, virta  $i_s$  ja sähköinen momentti  $T_e$  tasaantuvat nimellisarvoihinsa.

$U/f$ -käyrän muodostuminen on havaittavissa tapauksesta, jossa taajuusohje lähtee kasvamaan tasaisella rampilla 5 %:sta nimelliseen. Taajuusohje ei mallin omien puutteiden johdosta voi lähteä nollassa, koska tällöin moottorin virta nousee liian nopeasti sekoittaen skalaarisäätimen toiminnan. Moottorin mallin ongelmiin palataan

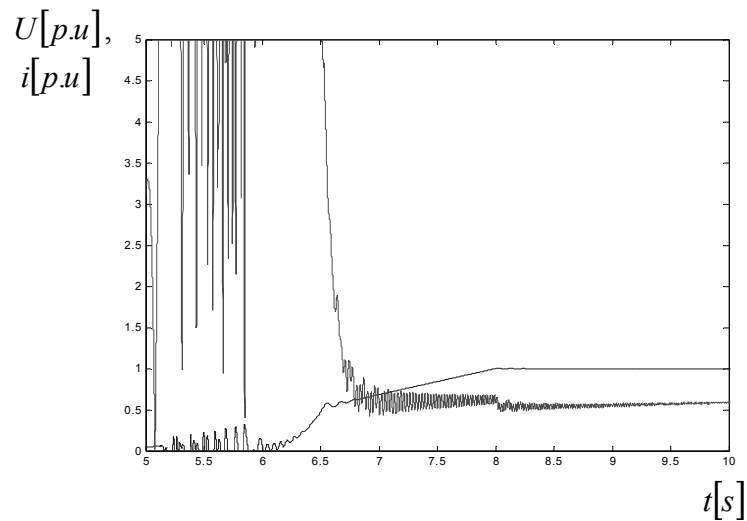
myöhemmin tässä luvussa. Kuvassa (5-6) kuvataan  $U/f$ -käyrän muodostumista, kun taajuus kasvaa rampilla 5 %:sta nimelliseen kolmessa sekunnissa.



Kuva 5-6:  $U/f$ -käyrän muodostuminen. Kuvassa staattorin jännite nousee kolmessa sekunnissa viidestä prosentista nimelliseen. Mallissa esiintyvien puutteiden takia jänniteohje ei voi lähteä nollassa.

### 5.3.2 Skalaariohjaus

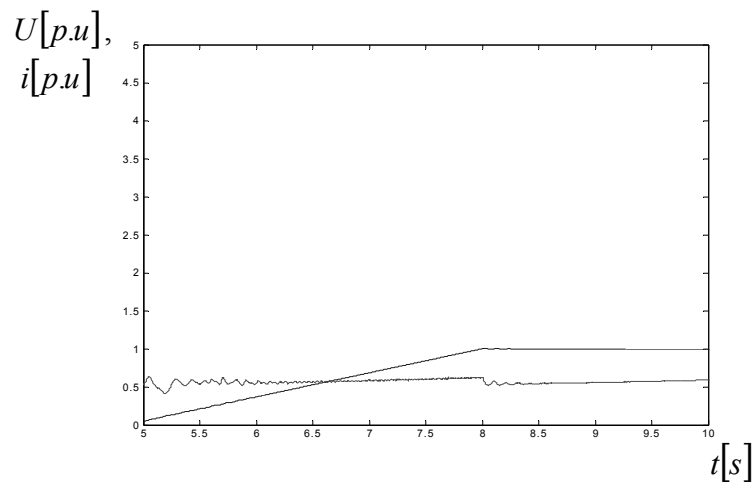
Järjestelmää simuloitiin myös pelkkänä skalaariohjauksena. Virta- sekä jännitesäätö kytkettiin pois toiminnasta. Taajuusohjeen annettiin nousta 5 %:stoa nimelliseen 3 sekunnin rampilla. Kuvasta (5-7) havaitaan virran (vihreä) nousevan nopeasti korkealle moottorin pyörimisnopeuden (sininen) väristessä. Taajuuden kasvettua tarpeeksi virta laskee ja moottori alkaa toimimaan oikein.



Kuva 5-7: Skalaariohjaus ilman jännite- ja virtasäätöä. Taajuusohje nousee kolmen sekunnin rampilla 5 prosentista nimelliseen. Ilman virta- ja jännitesäätöä virta (vihreä) nousee hallitsemattomasti, koska jännite (sininen) ei pääse nousemaan. Heti jännitteen noustessa virran tarve laskee.

Kun virta pääsee nousemaan näin vapaasti, laite vaatii enemmän tehoa, joten välipiirin jännite laskee rajusti. Tällöin välipiiri ei saa syötettyä invertterille tarpeeksi jännitettä ja moottori ei lähde käyntiin. Rajoittamalla virran nousua ja välipiirin jännitteen laskua moottorin pyörimisnopeus kasvaa tasaisemmin.

Vertailun vuoksi esitetään kuvassa (5-8) sama tapaus skalaarisäätönä eli välipiirin jännitettä ja staattorivirtaa säädetään.



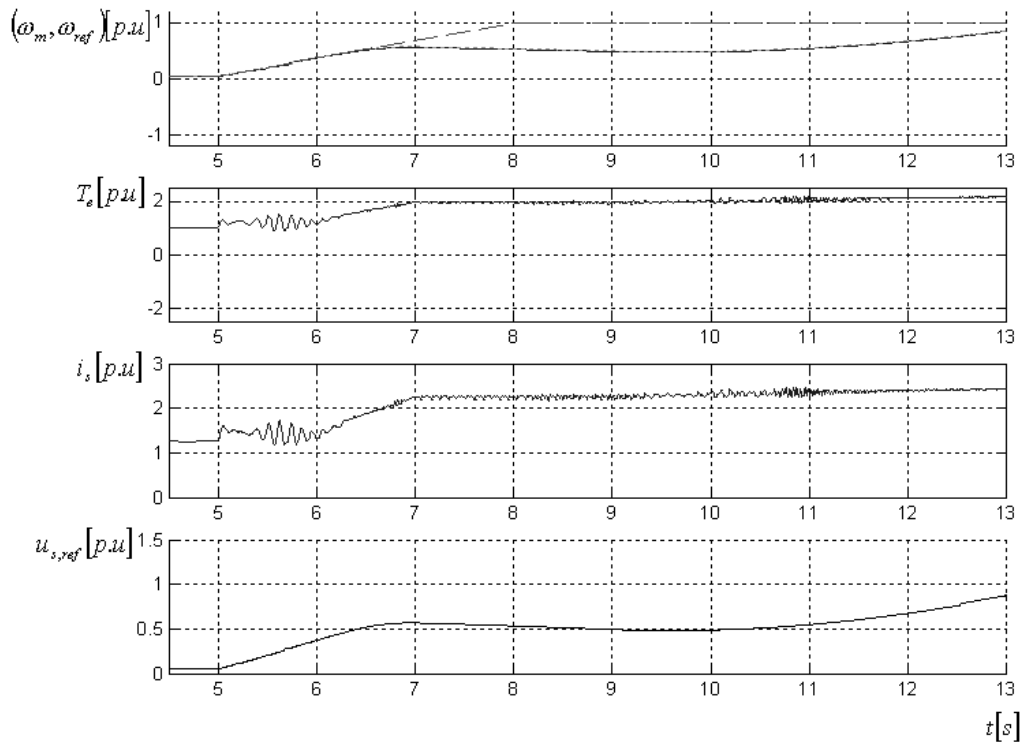
Kuva 5-8: Skalaarisäätö jännite- ja virtasäädöllä. Taajuusohje nousee kolmen sekunnin rampilla 5 prosentista nimelliseen. Virta- ja jännitesäätö rajoittavat taajuusohjeen ja näin myös jänniteohjeen (sininen) nousua. Säätö pitää staattorivirran (vihreä) muutokset vähäisinä.

### 5.3.3 Virtasäätö

Virtasäädön tavoitteena on pitää virta alle määrätyn rajan. Skalaarisäädössä taajuussäätö on ainoa tapa rajoittaa virtaa. Virran lähestyessä raja-arvoa tulee taajuusohjeen laskea tällöin myös virta laskee. Kuvan (5-9) ylimmästä osasta havaitaan taajuusohjeen ja moottorin pyörimisnopeuden käyttäytyminen lähestyttäessä virtarajaa. Säätimien parametrit pidettiin samana kuin edellisessä simuloinnissa vain kuormitusta lisättiin.

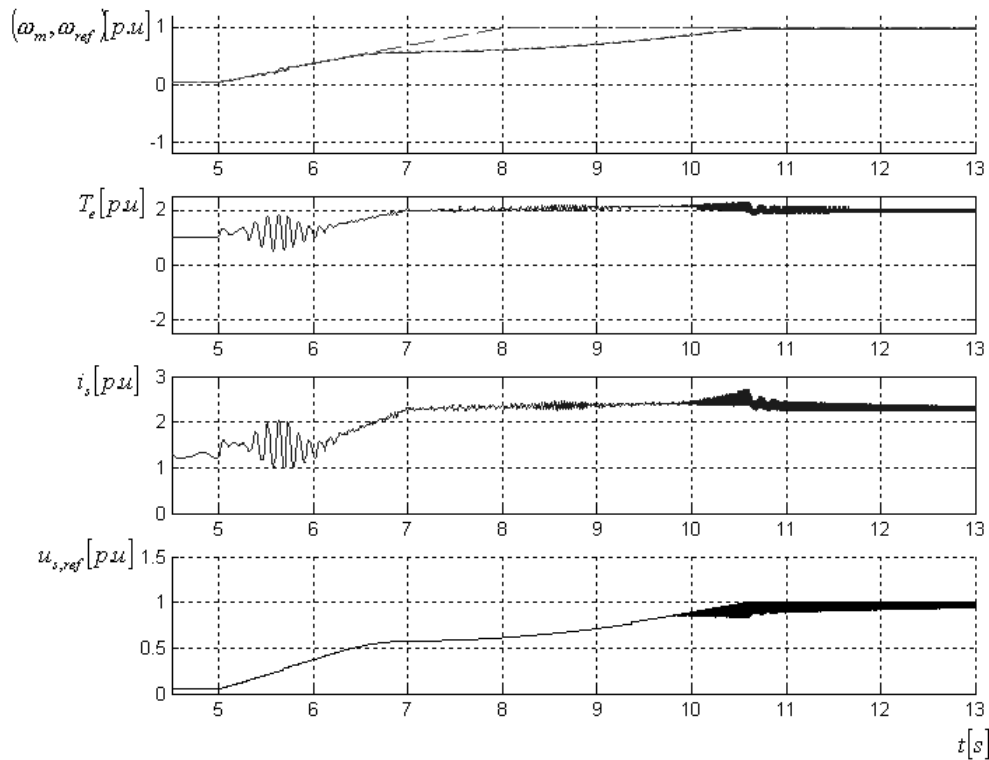
Kuvan (5-9) tilanne aiheutettiin antamalla kuuden sekunnin kohdalla nimellismomentin suuruinen isku. Passiivinen kuorma on koko ajan nimellismomentin suuruinen.





Kuva 5-9: Kuvassa havainnollistetaan virtasäätimen toimintaa. Moottori kiihdytettiin viiden prosentin taajuusohjeesta ( $\omega_{ref}$ ) rampilla nimellistaajuuteen, kuorman ollessa nimellismomentin suuruinen. Lisäksi kuuden sekunnin kohdalla moottorin kuormaa kasvatetaan nimellismomentilla iskumaisesti. Virran ( $i_s$ ) kasvu pysähtyy hieman virtarajan yläpuolelle, koska virtasäätö rajoittaa taajuusohjeen kasvu nopeutta. Kuvassa esiintyvä merkintä  $\omega_m$  on moottorin mekaaninen nopeus,  $u_{s,ref}$ -staattorijännitteen amplitudin ohjearvo ja  $T_e$  kuvaa moottorin sähköistä vääntömomenttia.

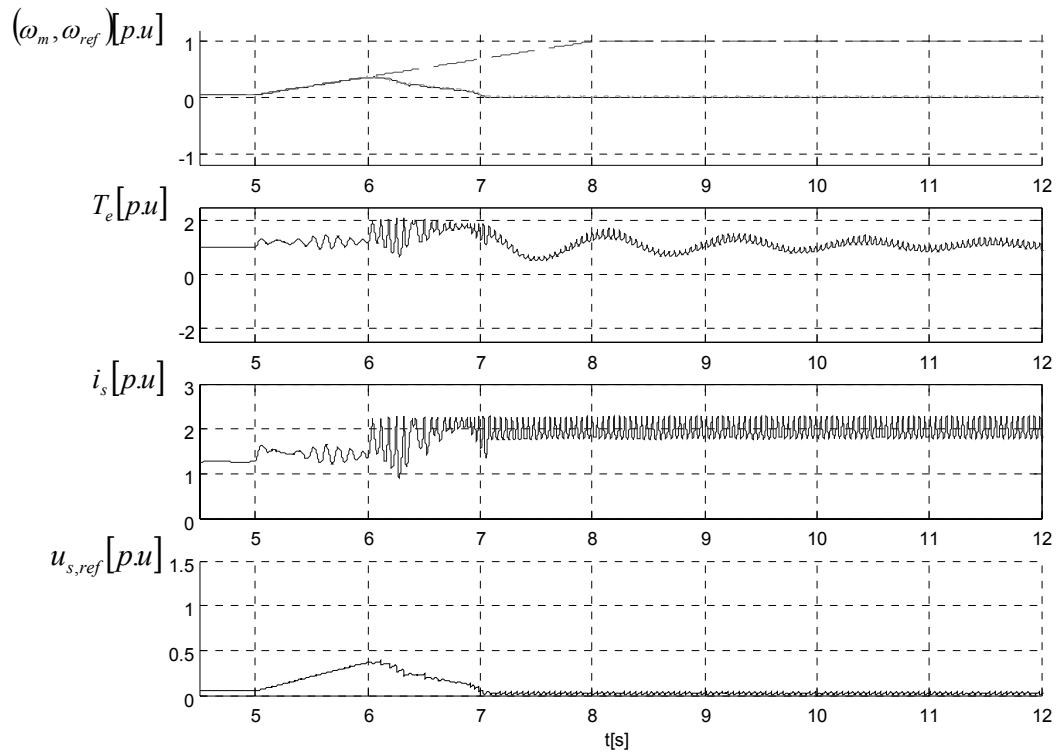
Virtasäädön toimivuuden mallintamiseksi suoritettiin sama simulaatio ilman virtasäätöä.



Kuva 5-10: Ilman virtasäätöä. Moottori kiihdytettiin viiden prosentien taajuusohjeesta ( $\omega_{ref}$ ) rampilla nimellistaajuuteen kuorman ollessa nimellismomentin suuruinen. Lisäksi kuuden sekunnin kohdalla moottorin kuormaa kasvatetaan nimellismomentilla iskumaisesti. Koska virtasäätö ei ole päällä, virta pääsee selvästi ylittämään annetun rajan  $2 \cdot i_{nom}$ . Kuvassa esiintyvä  $u_{s,ref}$  on staattorijännitteen amplitudin ohjearvo,  $i_s$  -staattorivirta,  $T_e$  -sähköinen vääntömomentti ja ( $\omega_m$ )-moottorin mekaaninen kulmanopeus.

Ilman virtasäätöä tehdyllä simuloinnilla taajuusohje nousee nopeammin haluttuun arvoon, mutta virta nousee korkeammalle ja jää värisemään. Jännitesäätäjä pystyy pitämään virran kurissa niin hyvin, ettei virta nouse liian nopeasti säätämättömänäkään.

Kuten edellisistä kuvista on huomattavissa, virrassa esiintyy hieman ylitystä. Jos ylitys halutaan poistaa, PID-säätimen P-termiä tulee kasvattaa. Tällöin virta saadaan rajattua tasan virtarajalle, kuten kuvassa (5-11) esitetään.

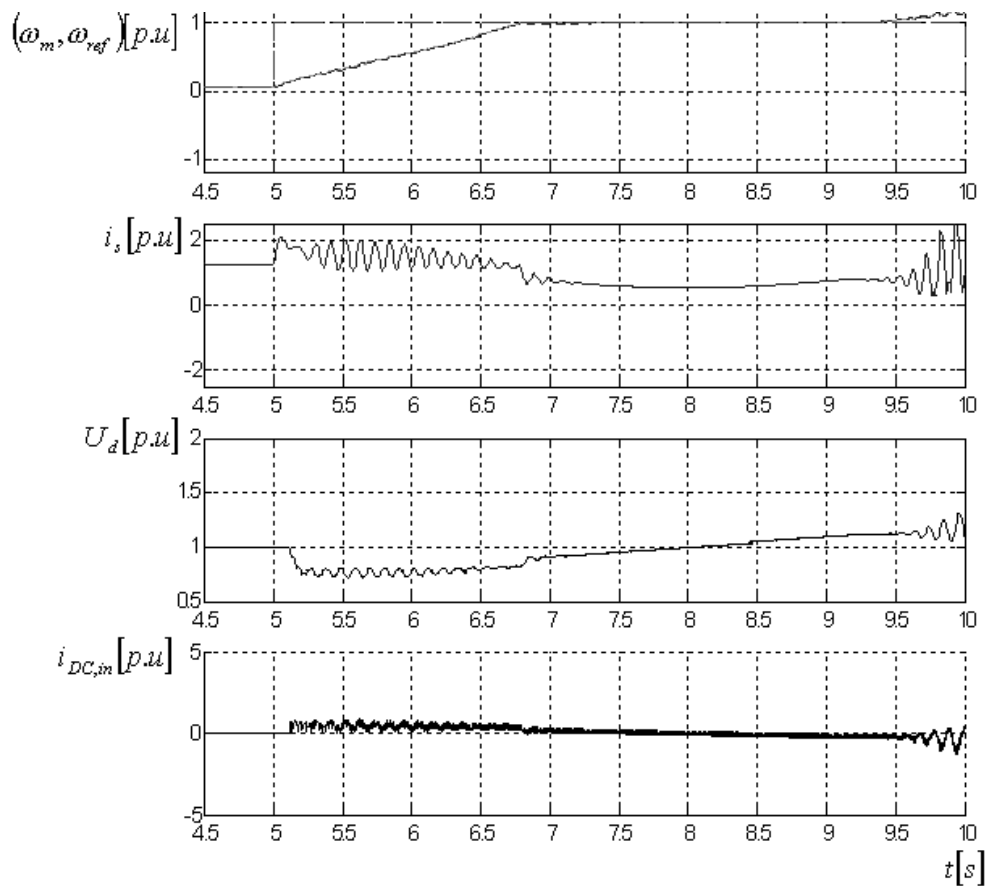


Kuva 5-11: Virtasäädön P-termin testaus. Moottori kiihdytettiin viiden prosentin taajuusohjeesta ( $\omega_{ref}$ ) rampilla nimellistaajuuteen, kuorman ollessa nimellismomentin suuruinen. Lisäksi kuuden sekunnin kohdalla moottorin kuormaa kasvatetaan nimellismomentilla iskumaisesti. P-termin kerroin asetetaan arvoon  $K_p = 0.1$ . Kuvista havaitaan, että P-termin ollessa liian suuri virtasäädin painaa jännitteen amplitudin ohjearvon ( $u_{s,ref}$ ) nolnaan virran lähestyessä rajaa  $2 \cdot i_{nom}$ . Merkintä  $i_s$  on staattorivirta,  $T_e$  -sähköinen vääntömomentti ja  $\omega_m$  -moottorin mekaaninen kulmanopeus.

Kuvasta (5-11) on selvästi havaittavissa, että P-termin ollessa suuri virtarajaa ei ylitetä, mutta taajuusohje ei pääse nousemaan.

### 5.3.4 Välipiirin jännitesäätö

Järjestelmää ohjataan askelmaisella nopeusohjeella kuorman ollessa alussa nimellinen  $T_{nom}$ . Kuuden sekunnin kohdalla kuorma alkaa jarruttaa verkkoon päin. Kuvassa (5-12) on kyseisen simuloinnin kuvaajia.

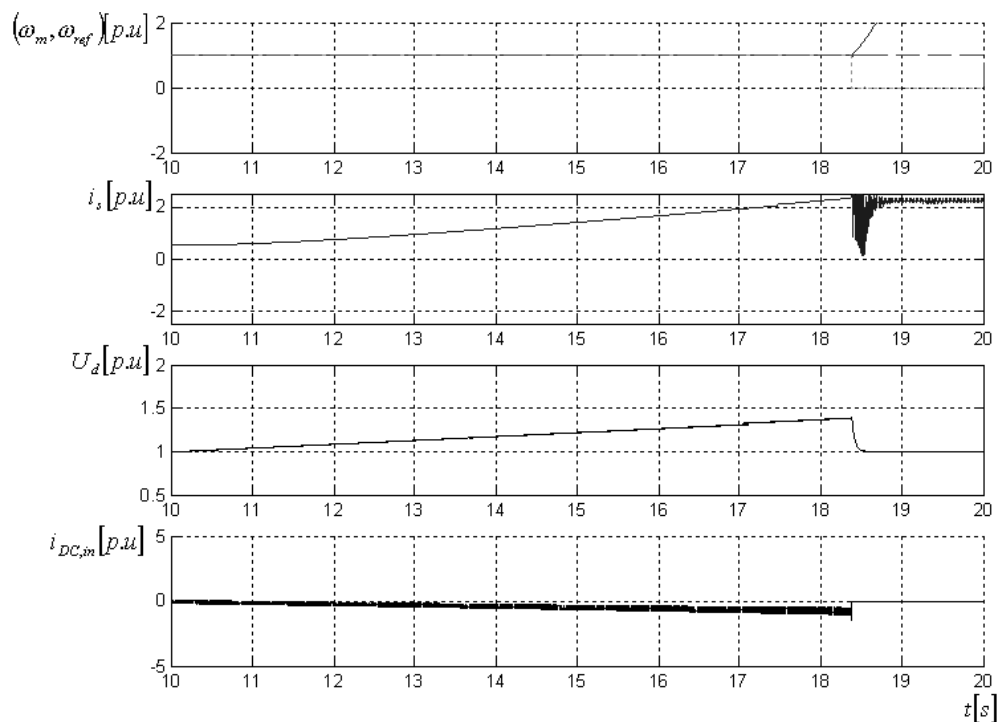


Kuva 5-12: Välipiirin jännitteen tutkimista. Moottorille syötetään askelmainen taajuusohje ( $\omega_{ref}$ ) kuorman ollessa nimellinen  $T_{nom}$ . Kuuden sekunnin kohdalla moottori alkaa jarruttaa verkkoon päin. Välipiirin virran ( $i_{DC,in}$ ) muutoksen suunnasta näkee jarruttaako moottori vai kiihdyttääkö se.  $U_d$  on välipiirin jännite,  $\omega_m$  moottorin mekaaninen kulmataajuus ja  $i_s$  staattorivirta.

Toiseksi alimmassa osassa on välipiirin tasajännite  $U_d$ , joka on skaalattu nimelliseen. Alimmassa kuvassa on välipiiriin tuleva tasavirta  $i_{DC,in}$ , jonka merkistä voi havainnoida syöttääkö moottori virtaa välipiiriin vai ottaako se sitä sieltä. Tasavirta on myös skaalattu moottorin nimellisvirran suhteen.

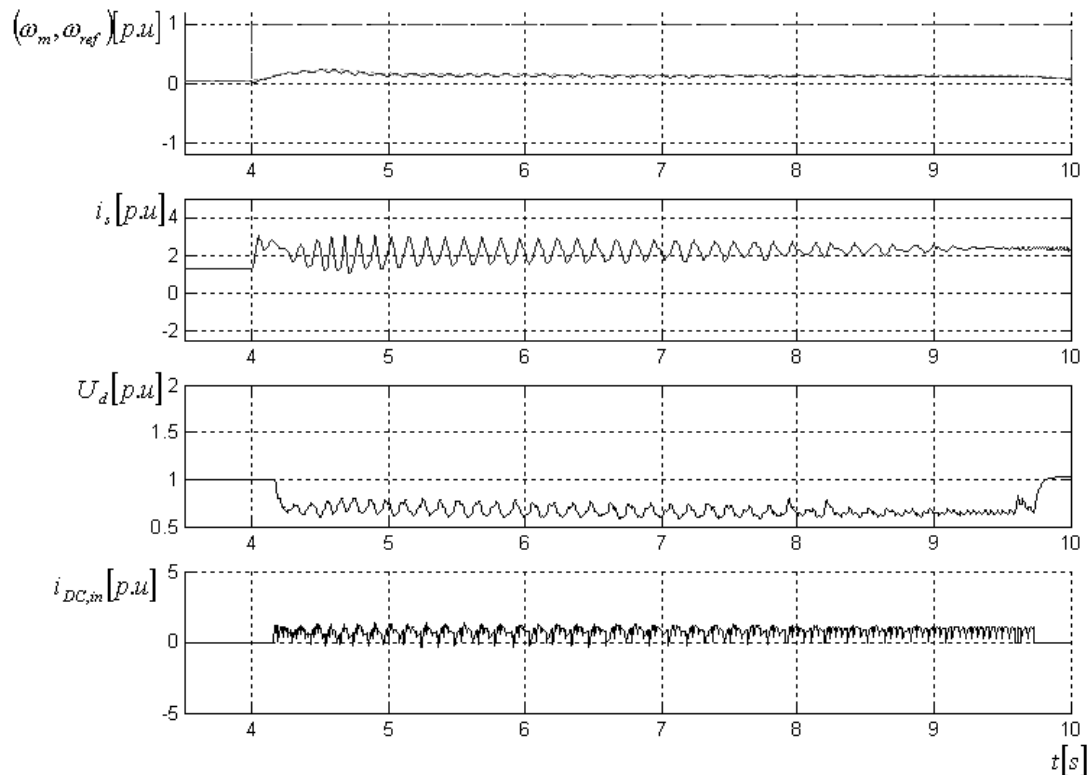
Välipiiristä on havaittavissa, että virran  $i_{DC,in}$  laskiessa jännite  $U_d$  nousee samaa vauhtia. Kuvassa oleva värinä johtuu virtasäätimen toiminnasta virran lähestyessä ylärajaa. Havaittavissa on myös jännitesäätäjien toiminta. Taajuusohjeen kasvu on näin hidasta, koska alijännitesäätjä laskee taajuusohjetta, ettei välipiirin jännite pääsisi laskemaan alle sallitun rajan. Ylijännitesäätjä taas alkaa kasvattaa taajuusohjetta, välipiirin jännitteen saavutettua ylärajan 18 sekunnin kohdalla.

Kuvasta (5-13) on havaittavissa, että ilman ylijännitesäätöä virtasäätö painaa taajuusohjeen nolnaan. Tämä johtuu siitä seikasta, että ylijännitesäätjä ei ollut laskemassa taajuusohjetta välipiirin jännitteen ylittäessä ylärajan ja täten hidastanut samalla myös virran nousua.



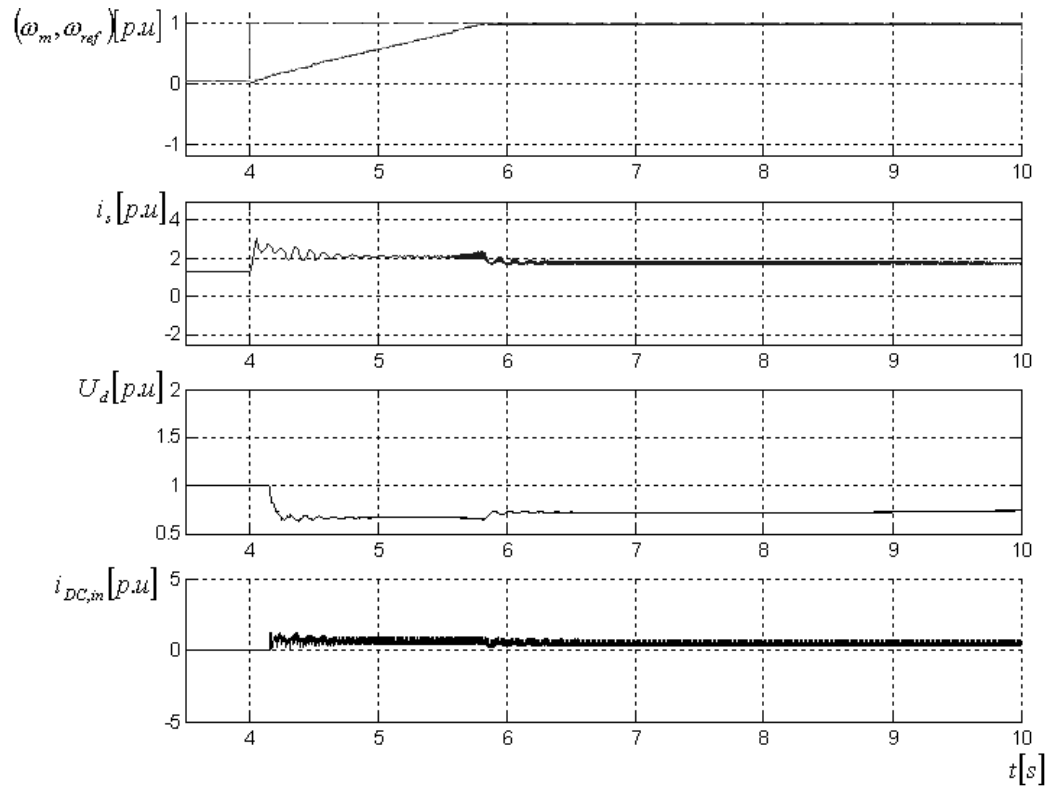
Kuva 5-13: Toiminta ilman ylijännitesäätöä. Moottorille syötetään askelmainen taajuusohje ( $\omega_{ref}$ ) kuorman ollessa nimellinen  $T_{nom}$ . Kuuden sekunnin kohdalla moottori alkaa jarruttaa verkkoon päin. Ilman ylijännitesäätöä taajuusohje pääsee kasvamaan liian nopeasti ja virta mennee yli rajan  $2 \cdot i_{nom}$ . Tällöin virtasäädin painaa jänniteohjeen nolnaan. Jos jännitesäätö olisi päällä, se rajoittaisi taajuuden kasvua, jolloin virta ei pääsisi kasvamaan niin korkealle.  $U_a$  on välipiirin jännite,  $\omega_m$  moottorin mekaaninen kulmataajuus ja  $i_s$  staattorivirta.

Alijännitesäätäjää voidaan testata lisäämällä kuormaa aktiivisesti. Kuuden sekunnin kohdalla lisätään nimellismomentin suuruinen kuorma. Kuorman kasvaessa välipiirin jännite laskee. Tällöin jännitesäätäjä laskee taajuusohjetta, ettei jännite laskisi enempää. Seuraukset on havaittavissa kuvasta (5-14).



Kuva 5-14: Alijännitesäätiön testaus. Moottorille annetaan askelmainen taajuusohje ( $\omega_{ref}$ ), joka kasvaa viidestä prosentista nimelliseen. Kuuden sekunnin kohdalla lisätään nimellismomentin suuruinen kuorma. Kuorman kasvaessa välipiirin jännite ( $U_d$ ) laskee. Tällöin jännitesäätiö laskee taajuusohjetta, ettei jännite laskisi enempää. Tästä johtuu ettei moottori pääse kiihdyttämään.  $\omega_m$  on moottorin mekaaninen kulmataajuus ja  $i_s$  staattorivirta.

Alijännitesäätiön ollessa poissa päältä, taajuusreferenssi pääsee nousemaan, mutta välipiirin jännite jää erittäin alhaiselle tasolle, mikä on huono asia. Parempi vaihtoehto on, että jännitesäätiö estää laitteen toiminnan, jos toiminta edellytyksiä ei ole. Kuvassa (5-15) on havainnollistettu järjestelmän toiminta ilman alijännitesäätiötä.

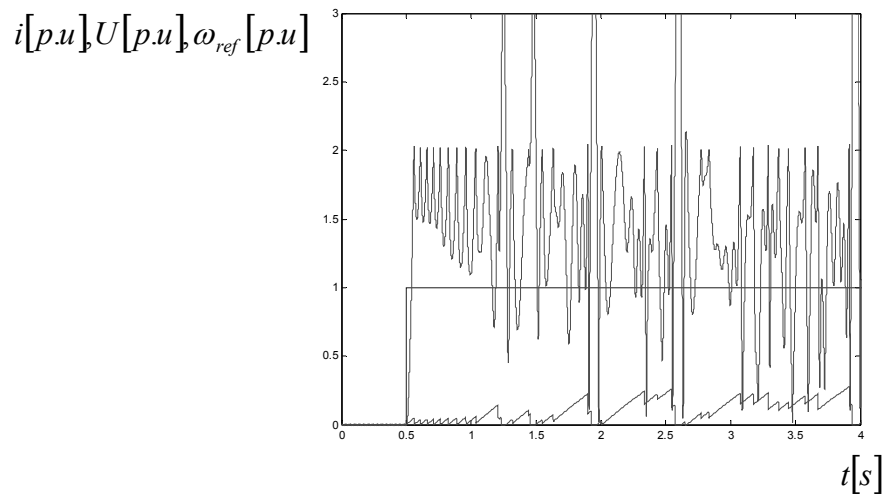


Kuva 5-15: Toiminta ilman alijännitesäätöä. Moottori kiihdytetään askelmaisella taajuusohjeella  $\omega_{ref}$  viidestä prosentista nimelliseen kuorman ollessa nimellismomentin suuruinen. Ilman alijännitesäätäjää, taajuusreferenssi pääsee nousemaan, mutta välipiirin jännite jää erittäin alhaiselle tasolle.  $U_d$  on välipiirin jännite,  $\omega_m$  on moottorin mekaaninen kulmataajuus,  $i_{dc,in}$  välipiirin virta ja  $i_s$  staattorivirta.



### 5.3.5 Moottorin mallin ongelma

Mallilla havaittiin selkeitä ongelmia käynnistettäessä. Vuon ollessa pieni, virran nousu saattaa olla erittäin aggressiivista. Kuvassa (5-16) esitetään käynnistys askelmaisella taajuusohjeen muutoksella nollasta nimelliseen.



Kuva 5-16: Simuloinneissa lähdettiin aina viiden prosentin taajuusohjeesta liikkeelle, koska lähdettäessä nollostajuudesta kuorman mallinnuksessa esiintyvien ongelmien johdosta staattorivirta (punainen) nousee nopeasti virtarajalle  $2 \cdot i_{nom}$ , jolloin virtasäädin ei salli koneen kiihdyttää. Täten staattorin jänniteohje (vihreä) ei pääse nousemaan.

Virta (punainen) nousee välittömästi rajalle. Täten staattorijännitteen ohje (vihreä) ei pääse nousemaan, koska virtasäätäjä rajoittaa sitä. Tästä syystä simuloinneissa lähdetään liikkeelle muualta, kuin nollasta.

## 6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli mallintaa skalaarisäätö vaihtovirtakuormalle. Säätö ei tarvitse toimiakseen kuin kuorman nimellistaajuuden ja –jännitteen. Kirjallisuus skalaarisäädöstä on erittäin suppeaa. Se keskittyy lähinnä erilaisten jättämien kompensointien tutkimiseen nopeusestimaattoreiden tai nopeustakaisinkytkennän kautta tai skalaarisäädöstä mainitaan vektorisäädön rinnalla ns. ”hyvä tietää” asiana.

Totuus on, että skalaarisäätö on dynamiikaltaan huomattavasti heikompi kuin vektorisäätö, mutta se on hyvä vaihtoehto sovelluksiin joissa vektorisäätöä ei jostain syystä saada toimimaan.

Kokemuksesta tiedettiin että ACS800 taajuusmuuttajan skalaarisäädössä esiintyy seuraavia ongelmia seuraavissa asioissa:

1. Virran rajoitus ja värinä
2. Välipiirin jännitteen pitäminen rajojen sisäpuolella
3. Kompensointi lähellä nollanopeutta

Simulointi osuudessa havainnollistettiin näitä ongelmia. Tosin kompensointia nollanopeuden lähellä ei pystytty todentamaan mallin moottorissa esiintyneiden ongelmien johdosta.

Tulevissa malleissa virran rajoitusta tulisi pehmentää, koska usein virtasäädössä käytetty PID-säädin on liian aggressiivinen taajuussäätöön. Tätä aggressiivisuutta tulisi pehmentää kehittämällä PID:in paikalle itsevirittyvä säädin, joka pystyy sopeuttamaan toimintansa minkä tahansa toimintapisteen mukaan.

Välipiirin jännitesäädöllä on samat ongelmat kuin virtasäädöllä. Taajuussäädön toiminnan ollessa aggressiivista pienet muutokset taajuusohjeessa muuttavat lopputulosta selvästi. Alijännitesäätäjä painaa nousevan taajuusohjeen liian helposti alas eikä

ylijännitesäätäjäkään saa aikaan haluttua lopputulosta. Tosin ylijännitesäätäjän tutkiminen ei ollut parasta mahdollista, koska välipiirin jännitteen kasvu ei pääse rajoittumaan kuljettamalla jännitettä takaisin sähköverkkoon eikä minkäänlaista jarruvastusta ole mallinnettu, vaan jännite varastoituu välipiirin kondensaattoriin nopeuttaen jännitteen nousua.

Kuten simuloinneista havaittiin virran säätäminen virtarajan alle ei ole yksinkertaista. Systeemiin jäi ylitystä ohjearvoista. Tosin simuloinnissa käytetyt kuormat olivat todella suuria, koska säätimien toiminnan virheitä haluttiin korostaa. Harvoin reaalisessa tilanteessa moottorilla ajetaan jatkuvasti kaksi kertaa nimellisen suuruisella kuormalla.

Toiminta lähellä nollanopeutta on kaikista moottorisäädön ongelmista suurin. Erityisesti skalaarisäädölle keinoja hyvän lopputuloksen aikaan saamiseksi on erittäin vaikea löytää. Säädön tulisi oppi tunnistamaan kuorman toimintamoodit ja säätää kompensointi niiden mukaan. Tämä vaatisi tiedon kuorman toimivan moottorin nopeudesta takaisinkytkennän tai nopeusestimaattorin kautta.

## LÄHTEET

- [1] ACS600 Operation & Maintenance Lesson Plan and Overhead Binder, Luentomoniste, Course G300, ABB Industry Oy 1997.
- [2] ACS800 Firmware manual, ACS800 Standard application program 7.x, Manual , ABB Oy 2002.
- [3] Aura Lauri, Tonteri Antti J., Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. WSOY, Porvoo, 1996, s 448.
- [4] Boys J.T. ja Walton S.J., Scalar control: An Alternative AC drive philosophy, IEE PROCEEDINGS, Vol 135, Pt. B, No 3, May 1988.
- [5] Bose B. K., Power Electronics and AC Drives, USA, 1986, Prentice Hall Inc., s 402., ISBN 0-13-686882-7.
- [6] DTC EMU, Technical specification, ABB:n sisäinen suunnittelu dokumentti, ei saatavilla.
- [7] Finch JW, Scalar and Vector: A Simplified treatment of induction motor control performance, Vektor control revisited (Digest 1998/1999), IEE Colloquim on, 1998, sivut 2/1-2/4.
- [8] Haapalainen Timo, Taajuusmuuttajaohjatun suuren oikosulkumoottori-käytön suorituskyvyn tutkiminen, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, 1990.
- [9] Harnefors L. ja Nee H, Control of Variable-Speed AC Drives, Opetusmoniste, Kunglig Tekniska Högskolan, Tukholma 1998.

- [10] Hinkkanen Marko, Oikosulkumoottorikäytön nopeusanturiton vektorisäätö, Diplomityö, TKK, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, 2000.
- [11] Lammi Mikko, Oikosulkumoottorin parametrien estimointi nollanopeudella, Diplomityö, TKK, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, 2000.
- [12] Lipo T.A. ja Novotny D.W., Vector and Dynamics of AC Drives, Oxford Science Publications, New York 1996, ISBN 0-19-856439-2 , s 440.
- [13] Luomi Jorma, Sähkökäyttöjen suunnittelu, Luentomoniste, Opintojakso S-81.320, Otaniemi, Kevät 2001, s 156.
- [14] Mohan, Undeland ja Robbins, Power electronics: converters, application and design, John Wiley & Sons 1989, ISBN 0-471-61342-8.
- [15] Muñoz-Carcia, Lipo, Novotny, A New induction motor open-loop speed control capable of low frequency operation, IEEE Industry applications society, annual meeting, New Orleans 1997.
- [16] Mård Matti, Sähkökäyttö ja tehoelektroniikka, Otatieto: Gummerus kirjapaino Oy, Jyväskylä 1993, 354 s.
- [17] Niiranen Jouko, Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus, Otatieto, 1999, ISBN 951-672-270-9.
- [18] Pyrhönen Juha. Sähkökäytöt, luentomateriaali osa 5, Lappeenranta, 1999.
- [19] Pyrhönen J ja Partanen J., Tehokas sähkön käyttö, opetusmoniste EN C-72, LTKK 1994.

- [20] Sensorless Control of AC Motor Drives, Section 1, IEEE Press 1996, ISBN 0-7803-1046-2
- [21] Stronach, Vas , Neuroth, The Desing and DSP implemation of Self-configuring Controllers for High Performance Electromechanical Drives, Power Electronics and Variable Speed Drives (Konferenssi julkaisu numero 456) , 1998, s 644-649.
- [22] Vas Peter, Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford Science Publications, New York 1998, ISBN 0-19-856465-1 , s 729.

## LIITE I

Tässä liitteessä on eri säätölohkojen C-koodit. Muuttujat joita ei ole määritelty in- tai outputiksi ovat säädön parametrejä.

### VIRTASÄÄDIN

```
/*Inputs. */
#define mruc                U(0)
#define is_abs              U(1)
#define wm                  U(2)
#define t                    U(3)

/* Taajuuspuoli */
mruc_gain = i_sc_ramp_coef*mruc;
if(wm<0)   {
                sig_mruc=-1;           }
        else   {
                sig_mruc=1;           }

/* Taajuusohjeen rajoitus */
if(mruc_gain > fN_gain*fN)   {
        mruc_gain_limit = fN_gain*fN;   }
else if(mruc_gain < -fN_gain*fN)   {
        mruc_gain_limit = -fN_gain*fN;   }
else   {
        mruc_gain_limit=mruc_gain;   }

/* Virtapuoli */
/* Alipäästösuodatus */
is_sc_filt = i_pos_stab*(is_abs-is_sc_filt)+is_sc_filt;

/* P-termi */
is_ei= sig_mruc*(is_lim-is_sc_filt);
```

```

        is_ep= sig_mruc*(is_lim*0.75-is_sc_filt);
/* Integrointi */
        is_int += Ts*is_ei;
/* Derivointi */
        is_der = is_ei-is_der_pre;
        is_der_pre=is_ei;
/* PID-säätäjä */
        is_sum = k_e*is_ep + k_int*is_int + k_der*is_der;
/* Kuuluu stabilointiin. Ylipäästösuodatus */
        is_stab = is_abs-is_sc_filt;
/* Taajuuden ja virran yhteenlasku ja tuloksen integrointi*/
        ramp_sc_i += Ts*gain_sc*(mruc_gain_limit-i_neg_stab*is_stab);
        d_ramp_sc_i = ramp_sc_i-ramp_sc_i_pre;
        ramp_sc_i_pre = ramp_sc_i;
if(d_ramp_sc_i>is_sum)  {
if(t<0)                {
        ref_out += d_ramp_sc_i;          }
else                    {
        ref_out += is_sum;              }
}
else                    {
        ref_out += d_ramp_sc_i;          }
/* Rajoitus ettei taajuusohjeen merkki muutu */
if(ramp_sc_i*ref_out<0) {
        ref_out=0;                      }
/* Outputs. */
        y[0]=ref_out;
        y[1]=is_sc_filt;

```



## JÄNNITESÄÄDIN

```
/* Inputs. */
#define Ud                U(0)
#define w                 U(1)

/* Välipiirin jännitteen suodatus */

if(Ud<=Uc_sc_filt)      {
    Uc_sc_filt = Uc_diff_gain*(Uc_filt_coef*(Ud - Uc_sc_filt))+Uc_sc_filt;
}
else {
    Uc_sc_filt = Uc_diff_gain*(Ud - Uc_sc_filt)+Uc_sc_filt;      }

/* D-termin laskenta,joka ylipäästösuodatetaan (alipäästösuodatus + nykyarvo */
/* derivaattori */
    d_term_in = Uc_sc_filt - Uc_sc_filt_pre;
    Uc_sc_filt_pre=Uc_sc_filt;

/* Alipäästösuodatus */
    d_term_filt=k_d_filt*(d_term_in-d_term_filt)+d_term_filt;

/* Ylipäästösuodatus = sisääntuleva arvo - alipäästösuodatettu arvo */
    d_term=d_term_in-d_term_filt;

/* Taajuuden merkin käsittely */
if(Uc_sc_filt>Uc_hi_lim) {
    Uc_sc_filt_lim= 2*Uc_hi_lim-Uc_sc_filt;
    Uc_term=g_over*(Uc_sc_filt-Uc_hi_lim);}
else if(Uc_sc_filt<Uc_lo_lim)      {
    Uc_sc_filt_lim=2*Uc_lo_lim-Uc_sc_filt;
    Uc_term=g_under*(Uc_sc_filt-Uc_lo_lim);      }
else      {
    Uc_sc_filt_lim=Uc_sc_filt;
```

```

                Uc_term=0;                }
/*      Säädin on PD-tyyppinen */
if(w>=0)  {
            sign=1;
            mruc = K_ucl_pos*sign*(Uc_sc_filt_lim)+Uc_term + d_term;    }
else      {
            sign=-1;
            mruc = K_ucl_neg*sign*(Uc_sc_filt_lim)+Uc_term + d_term;    }
/* Outputs. */
        y[0]=mruc;
        y[1]=Uc_sc_filt;

```

### U/f-käyrä

```

/* Inputs. */
#define ramp_sc_i                U(0)                /* Taajuusohje. */

/* Alkuarvojen laskenta */
        ramp_sc_abs=abs(ramp_sc_i)/(2*PI*fN);
        UsN_scale = UsN*ramp_sc_abs;
/* Vuokulman laskenta ja ir_kompensointi */
        theta += Ts*(ramp_sc_i);
/* U/f-käyrän rajoitus */
if(UsN_scale>UsN)    {
                    UsN_scale_limit=UsN;                }
else                {
                    UsN_scale_limit=UsN_scale;            }
/* IR-termin laskenta */

        ir=ir_gain*(w_lim-ramp_sc_abs)*UsN;
if(ir<0)    {

```

```

        ir=0;                }
if(ramp_sc_abs==0)        {
        ir=0;                }

/* vuoreferenssit */
        dFlx_ref = (UsN_scale_limit+ir)*cos(theta);
        dFly_ref = (UsN_scale_limit+ir)*sin(theta);
/* Outputs. */
        y[0]=dFlx_ref;
        y[1]=dFly_ref;

```

## POSITIONS

```

/* Inputs. */
#define da                U(0)        /* Switch positions */
#define db                U(1)
#define dc                U(2)

if(da>0.55)
        Sa=1;
else
        Sa=0;
if(db>0.55)
        Sb=1;
else
        Sb=0;
if(dc>0.55)
        Sc=1;
else
        Sc=0;

```

```

/* mikä kytkein asento */
/* 0 0 0    nolla vektori*/
if(Sa<0.6 && Sb<0.6 && Sc<0.6)    {
    Gx=0;
    Gy=0;
}
/* 1 0 0    Kulma 0    */
else if(Sa>0.6 && Sb<0.6 && Sc<0.6)    {
    Gx=0.6666666666666666;
    Gy=0;
}
/* 1 1 0    Kulma 60 */
else if(Sa>0.6 && Sb>0.6 && Sc<0.6)    {
    Gx=0.3333333333333333;
    Gy=1/sqrt_3;
}
/* 0 1 0    Kulma 120 */
else if(Sa<0.6 && Sb>0.6 && Sc<0.6)    {
    Gx=-0.3333333333333333;
    Gy=1/sqrt_3;
}
/* 0 1 1    Kulma 180 */
else if(Sa<0.6 && Sb>0.6 && Sc>0.6)    {
    Gx=-0.6666666666666666;
    Gy=0;
}
/* 0 0 1    Kulma 240 */
else if(Sa<0.6 && Sb<0.6 && Sc>0.6)    {
    Gx=-0.3333333333333333;
    Gy=-1/sqrt_3;
}
/* 1 0 1    Kulma 300 */
else if(Sa>0.6 && Sb<0.6 && Sc>0.6)    {
    Gx=0.3333333333333333;
    Gy=-1/sqrt_3;
}
/* 1 1 1    nolla vektori */
else /* if(Sa>0.6 && Sb>0.6 && Sc>0.6) */

```

```

{
    Gx=0;
    Gy=0;
}
/* Outputs. */
y[0]=Gx;
y[1]=Gy;

```

### *I<sub>dc,in</sub>* -laskenta

```

/* Inputs. */
#define isx          U(0)
#define isy          U(1)
#define Gx           U(2)
#define Gy           U(3)

/* Laskenta */
    idc_out = 0.666666666*(Gx*isx + Gy*isy);
/* Outputs. */
    y[0]=idc_out;

```