

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Simo Matikainen

KESTOMAGNETOIDUN TAHTIMOOTTORIN ASENNON JA STAAT-
TORIRESISTANSSIN ESTIMOINTI

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 27.08.2009

Työn valvoja:

Prof. Jorma Luomi

Työn ohjaaja:

Dos. Marko Hinkkanen

Tekijä: Simo Matikainen

Työn nimi: Kestomagnetoidun tahtimoottorin asennon ja staattoriresistanssin estimointi

Päivämäärä: 27.08.2009

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 7+29

Tiedekunta: Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Professuuri: Sähkökäytöt

Koodi: S-81

Valvoja: Prof. Jorma Luomi

Ohjaaja: Dos. Marko Hinkkanen

Tässä työssä esitetään uusi vähennetyn kertaluvun havaitsija kestopagneettitahtimoottorille. Tahtimoottorin anturittomassa säädössä havaitsijan tarkoitus on tuottaa mitattujen staattorivirtojen ja jännitteiden avulla reaaliaikaista informaatiota moottorin asennosta takaisinkytkettyä säätöä varten. Työn alussa luvuissa 2-3 esitellään yleistä teoriaa tutkittavasta moottorityypistä, välijännitepiirillisestä taaajuusmuuttajasta ja anturittomasta säädöstä. Luvussa 4 esitellään ehdotetun havaitsijan yhtälöt ja johdetaan tälle stabiilisuusehdot analyttisesti. Luvussa 5 tutkitaan ehtoja simuloimalla ja tämän jälkeen luvussa 6 todetaan havaitsijan toimivuus laboratoriokokeilla. Täyden kertaluvun havaitsija estimoiki kaikkia moottorimallin tilamuuttujia. Täyden kertaluvun havaitsijat ovat monimutkaisia, joten niiden stabiilisuuden selvittäminen on yleensä vaikeaa. Vähennetyn kertaluvun havaitsija tarkoittaa rakenteeltaan sellaista tilaestimaattoria, jossa kaikkia järjestelmän tilamuuttujia ei estimoida, jos ne ovat mitattavissa. Työssä on esitetty joitakin esimerkkejä kummankin tyyppisistä havaitsijoista. Ehdotettu havaitsija on äärimmäisen yksinkertainen. Virtoja ei estimoida, koska ne ovat suoraan mitattavissa. Virtojen derivaatat ovat myös suoraan laskettavissa kahdesta viimeisestä näytteestä, joten niitäkään ei estimoida. Näin muodostuu havaitsija, jonka kertaluku on yksi. Havaitsijaan lisätään algoritmi staattoriresistanssin adaptointia varten. Tarvittavien viritysparametrien valinta selvitetään stabiilisuusanalyysin avulla. Ehdotetun havaitsijan viritäminen osoittautuu erittäin yksinkertaiseksi stabiilisuusehtojen ratkettua. Valittavana on käytännössä yksi parametri kulmaestimaattorille ja yksi resistanssin adaptointia varten. Lisäksi havaitsija osoittautui simuloinneissa ja laboratoriokokeissa erittäin hyvin toimivaksi aina prosenttiin nimellisuudesta asti.

Avainsanat: adaptointi, anturiton ohjaus, asennon estimointi, havaitsija, kestopagneettitahtimoottori, staattoriresistanssi, stabiilisuus

Author: Simo Matikainen

Title: Position estimation and stator resistance adaptation for PMSMs

Date: 27.08.2009

Language: Finnish

Number of pages: 7+29

Faculty: Faculty of Electronics, Communications and Automation

Professorship: Electric drives

Code: S-81

Supervisor: Prof. Jorma Luomi

Instructor: Dr. Marko Hinkkanen

A reduced-order observer for motion-sensorless permanent magnet synchronous motors (PMSMs) is proposed in this thesis. The function of the observer is to produce motor shaft angle information from measured stator voltages and currents. Stator currents do not need to be chosen as states of the observer because the currents are measured. The derivatives of the stator currents are calculated from their discrete samples. At the beginning of the thesis, a general theory of a PMSM and vector control is presented. Stator resistance adaptation is added to the observer. Relevant observers for position estimation are reviewed. Adequate selection of tuning parameters is made by means of the stability analysis. Stability criteria are confirmed by means of simulations. Operation of the observer is also tested in laboratory experiments. Tuning of the proposed observer is simple since stability criteria are known. There is only one parameter to tune for the angle estimator and one for resistance adaptation. The observer performs very well in simulations and also in laboratory experiments at very low speeds.

Keywords: Adaptation, angle estimation, observer, PMSM, sensorless control, stability, stator resistance

Esipuhe

Tämä työ on tehty Teknillisen Korkeakoulun sähkötekniikan laitoksella sähkökäyttöjen tutkimusryhmässä. Kiitos Professori J. Luomelle mahdollisuudesta saattaa opinnot päätökseen. Koko tutkimuskohteen ideoimisesta ja työn etenemisestä suurkiitos ohjaajalle Markolle, jota ilman ei tämä työ olisi koskaan valmistunut. Aikaa liikenä aina asiantuntevalle ohjaukselle - lehmän hermot tuolla miehellä. Käytännön avustusta ohjelmistojen kanssa kiitos tupatovereille Tuomoille Sipilälle ja Leppiselle, myös nämä herrat sietivät minua puolen vuoden ajan.

Kaiken takana on aina perhe, jonka vuoksi jaksaa taistella luontaista laiskuutta vastaan. Kiitos Pinkille, pikku-ehvantilille ja herra Puntti Römppäiselle. Kiitos myös maisteri Pekka-Johannekselle asiantuntija-avusta kosteahkoilla kalaretkillä. Otaniemi, 20.08.2009

Simo Matikainen

Sisältö

| | |
|---|------------|
| Tiivistelmä | ii |
| Abstract | iii |
| Esipuhe | iv |
| Sisällysluettelo | v |
| Symboliluettelo | vii |
| 1 Johdanto | 1 |
| 2 Järjestelmän malli | 2 |
| 2.1 Avaruusvektorit | 2 |
| 2.2 Kestomagneettitahtimoottorin rakenne | 3 |
| 2.3 Moottoriyhtälöt | 3 |
| 2.4 Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja | 4 |
| 2.5 Liikeanturiton vektorisäätö | 5 |
| 3 Havaittajat | 6 |
| 3.1 Täyden kertaluvun havaittajat | 6 |
| 3.2 Vähennetyt kertaluvun havaittajat | 7 |
| 4 Ehdotettu havaittaja | 9 |
| 4.1 Kulman estimointi | 9 |
| 4.2 Resistanssin adaptointi | 10 |
| 4.3 Estimointivirheen dynamiikka | 10 |
| 4.4 Havaittajavahvistuksen valinta | 11 |
| 4.5 Resistanssin adaptoinnin vahvistuksen valinta | 13 |
| 5 Simuloinnit | 14 |
| 5.1 Simulointimalli | 14 |
| 5.2 Havaittajavahvistuksen simulointi | 15 |
| 5.3 Resistanssin adaptoinnin simulointi | 19 |
| 5.4 Suunnanvaihdon simulointi | 21 |

| | |
|----------------------------|-----------|
| 6 Laboriomittaukset | 24 |
| 6.1 Laitteisto | 24 |
| 6.2 Mittaukset | 25 |
| 7 Johtopäätökset | 27 |
| Lähdeluettelo | 29 |

Symboliluettelo

| | |
|-------------------------------------|--|
| A, B | havaittajavahvistuksen stabiilisuusehtojen rajat |
| e | vastäsähkömotorinen voima |
| e_d, e_q | vasta-smv:n tahtikoordinaatiston komponentit |
| \mathbf{I} | identiteettimatriisi |
| i_a, i_b, i_c | kolmivaihevirratt |
| \mathbf{i}_{abc} | kolmivaihevirtavektori |
| i_d, i_q | virran tahtikoordinaatiston komponentit |
| \mathbf{i}_s | staattorivirtavektori |
| i_α, i_β | virran staattorikoordinaatiston komponentit |
| \mathbf{J} | rotaatiomatriisi |
| $\mathbf{k} = [g, 1]^T$ | havaittajavahvistusvektori |
| $\mathbf{k}_R = [k_{Rd}, k_{Rq}]^T$ | resistanssin adaptoinnin vahvistusvektori |
| \mathbf{L} | staattori-induktanssimatriisi |
| L_d, L_q | staattori-induktanssin komponentit |
| $L' = L_q - L_d$ | apumuuttuja |
| p | aikaderivaattaoperaattori |
| p | moottorin napapariluku |
| R_s | staattoriresistanssi |
| T_e | moottorin tuottama vääntömomentti |
| T_L | kuormamomentti |
| T_s | näytteenottoväli |
| u_d, u_q | jännitteen tahtikoordinaatiston komponentit |
| u_{dc} | välipiirijännite |
| \mathbf{u}_s | staattorijännitevektori |
| α_ω | kaistanleveys |
| θ_m | roottorivuon kulma |
| λ | viritysparametri |
| μ | viritysparametri |
| $\boldsymbol{\psi}_{pm}$ | kestomagneettivuovektori |
| ψ_{pm} | kestomagneetin vuon suuruus |
| $\boldsymbol{\psi}_s$ | staattorin käämivuovektori |
| ω_m | roottorin sähkökulmanopeus |
| ω_{mek} | roottorin mekaaninen kulmanopeus |

1 Johdanto

Kestomagneettitahtimoottorilla on suuri tehotehous ja hyvä hyötysuhde, koska magnetointivirtaa ei tarvita. Kestomagneettitahtimoottori on oikosulkumoottorin tavoin edullinen huoltaa, koska mekaanista kommutaattoria ei ole. Magneettien valmistustekniikan kehittyessä kestopomagneettimoottorista on tullut entistä houkuttelevampi vaihtoehto erilaisissa sähkökäytöissä. Kestomagneettimoottoreita on saatavilla miniaturisoiduista aina satoihin kilowatteihin saakka.

Kestomagneettitahtimoottori kuitenkin vaatii toimiakseen taajuusmuuttajan, koska sitä ei voida yleensä suoraan kytkeä verkkoon. Lisäksi moottorisäätö tarvitsee takaisin kytkettynä järjestelmänä toimiakseen roottorin kulmatiedon. Kulmatieto saadaan käyttämällä asentoanturia tai estimoimalla kestopomagneettivuon asentoa. Anturit ovat kalliita ja vikaantuvia komponentteja, joten niitä on yleensä mahdollisuuksien rajoissa syytä välttää.

Kulman estimointiin käytetyt menetelmät voidaan jakaa kahteen ryhmään: perusaaltomalleihin, jotka perustuvat roottorin vastasähkömotorisesta voimasta (vastasmv) saatuun informaatioon sekä signaali-injektiomenetelmiin, joissa avonapaisen roottorin asento saadaan selville sen induktanssin riippuvuudesta roottorin asennosta. Signaali-injektiomenetelmät ovat tarpeellisia pienillä nopeuksilla, jolloin perusaaltomallin tarvitsema moottorin vastasmv on liian pieni toimivan säädön toteuttamiseksi (Piippo 2008). Vastaavasti signaali-injektio on epätarkka suuremmilla nopeuksilla ja aiheuttaa ylimääräisiä häviöitä sekä melua.

Täyden kertaluvun havaitsijat hyödyntävät moottorimallia korvaten kaikki tilamuuttujat niiden estimaateilla. Näin syntyvän havaitsijan estimointivirheen dynamiikka on kuitenkin liian monimutkainen analyttisesti ratkaistavaksi. Täyden kertaluvun havaitsijoiden viritysparametrien valinta on muutenkin usein hankalaa, koska stabiilisuusehdoja suljetun silmukan järjestelmälle on vaikea määrittää muutoin kuin kokeellisesti tai numeerisesti laskemalla.

Tämän työn tavoite on ratkaista alemman kertaluvun havaitsijaa käytettäessä viritysparametrien valinta analyttisesti. Jos ehdot löytyvät, havaitsijan implementointi helpottuisi. Moottorin staattorikäämityksen resistanssin estimaatti on mallipohjaisessa kulman estimoinnissa välttämätön parametri. Virheellinen estimaatti vaikuttaa väistämättä myös kulmaestimaatin tarkkuuteen ja sitä kautta myös koko säädön toimivuuteen. Resistanssi elää kuormitussekvensseistä ja jäähdytysolosuhteista riippuen. Tässä työssä havaitsijaan lisätään resistanssin adaptointi, jonka viritys pyritään selvittämään myös analyttisesti stabiilisuusanalyysin avulla.

Luvuissa 2-3 esitellään yleistä teoriaa tutkittavasta moottorityypistä, jännitevälipiirillisestä taajuusmuuttajasta ja anturittomasta säädöstä. Luvussa 4 esitellään ehdotetun havaitsijan yhtälöt ja johdetaan tälle stabiilisuusehdot analyttisesti. Luvussa 5 tutkitaan ehtoja simuloimalla ja tämän jälkeen luvussa 6 todetaan havaitsijan toimivuus laboratoriokokeilla. Luvussa 7 pohditaan aikaansaannoksia ja mahdollisia jatkotutkimuksia.

2 Järjestelmän malli

2.1 Avaruusvektorit

Jos kolmivaihejärjestelmässä ei ole paluujohdinta, tai muuten vaihevirtojen hetkelisarvojen summa on nolla s.e. $i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0$, kaikilla t , voidaan yksi jännite ilmaista kahden muun avulla ja käyttää jännitteiden, virtojen ja käämivoiden laskennassa kaksidimensioisia avaruusvektoreita. Kompleksiarvoisen avaruusvektorin määritelmä on

$$\underline{i}(t) = \frac{2}{3} \left[i_a(t) + e^{j\frac{2\pi}{3}} i_b(t) + e^{j\frac{4\pi}{3}} i_c(t) \right] = i_\alpha(t) + j i_\beta(t) \quad (1)$$

missä $i_\alpha(t)$ on avaruusvektorin reaaliosa ja $i_\beta(t)$ on avaruusvektorin imaginääriosaa. Yleisesti käytetty merkintätapa ajan suhteen paikallaan pysyvälle staattorikoordinaatistolle on $\alpha\beta$ -koordinaatisto, α -akselin suunta on määriteltä a-vaiheen positiivisen virran aiheuttaman käämivuon suuntaiseksi.

Vastaavasti dq-koordinaatisto on tahtinopeudella pyörivä roottorikoordinaatisto, jossa d-akseli on kestopagneetin vuon suuntainen. Kuvassa 1 näkyvä koordinaatistojen välinen kulma on θ_m . Koska kompleksisia avaruusvektoreita käytettäessä avonapaisen moottorin vuoyhtälö on vaikea esittää, käytetään tässä työssä reaaliarvoisia vektoreita. Vektorit esitetään pienillä, lihavoiduilla kirjaimilla ja matriisit isoilla, lihavoiduilla kirjaimilla. Virtavektori on

$$\mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Suureet voidaan muuttaa koordinaatistosta toiseen kiertämällä avaruusvektoreita kulmalla θ_m . Reaaliarvoisia vektoreita käyttämällä muunnos suoraan vaihevirroista roottorikoordinaatiston reaaliarvoiseksi pystyvektoriksi ja käänteinen toimenpide ovat

$$\mathbf{i}_s = \mathbf{T}_{dq} \mathbf{i}_{abc} \quad (3a)$$

$$\mathbf{i}_{abc} = \mathbf{T}_{abc} \mathbf{i}_s \quad (3b)$$

Virtavektorit ja muunnosmatriisit aukikirjoitettuna muunnokset ovat

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(-\theta_m) & \cos(-\theta_m + \frac{2\pi}{3}) & \cos(-\theta_m - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(-\theta_m) & \sin(-\theta_m + \frac{2\pi}{3}) & \sin(-\theta_m - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4a)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_m & -\sin \theta_m \\ \cos(\theta_m - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_m - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_m + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_m + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4b)$$

Pystyvektoreilla laskettaessa identiteettimatriisilla kertominen \mathbf{I} vastaa ykkösellä kertomista ja rotaatiomatriisilla \mathbf{J} kertominen avaruusvektorin kertomista imaginaariyksiköllä

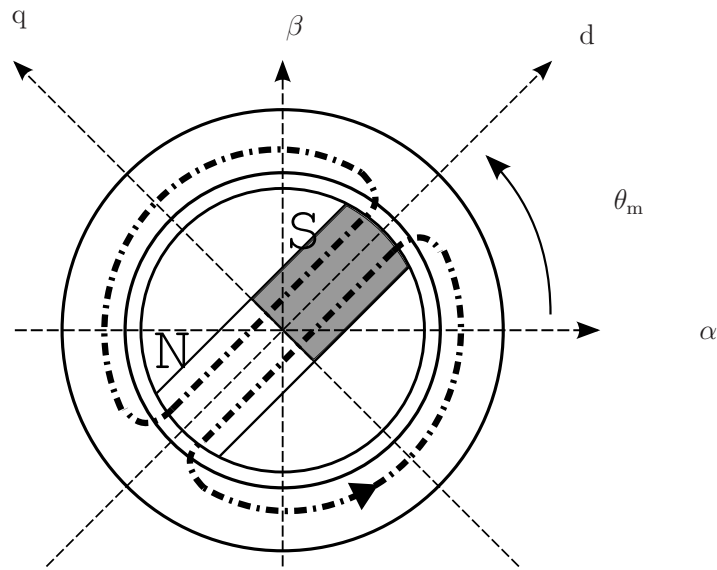
$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Pelkkä avaruusvektorin kiertäminen koordinaatistosta toiseen tapahtuu kertomalla matriisilla

$$\mathbf{T}(\theta_m) = e^{\mathbf{J}\theta_m} = \cos(\theta_m)\mathbf{I} + \sin(\theta_m)\mathbf{J} \quad (6)$$

2.2 Kestomagneettitahtimoottorin rakenne

Kestomagneettitahtimoottorin voi ajatella olevan kuin tasavirtamoottori käännettynä nurinpäin. Roottori on magnetoitu sisältäpäin kestopagneetilla ja käämit ovat staattorissa. Moottori saadaan pyörimään haluttuun suuntaan aiheuttamalla ilmeväliin pyörivä magneettivuo kolmivaihevirran avulla. Kuvassa 1 nähtävässä moottorin periaatepiirroksessa on esitetty sähköiset koordinaatistot.



Kuva 1: Kaksinapainen kestopagneettimoottori

2.3 Moottoriyhtälöt

Määritellään moottorimalli pyörivässä koordinaatistossa, jonka kulmanopeus $\hat{\omega}_m = \frac{d\hat{\theta}_m}{dt}$, missä $\hat{\theta}_m$ on koordinaatiston kulma suhteessa staattorikoordinaatistoon. Jännite- ja vuoyhtälöiksi saadaan

$$\frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} + \hat{\omega}_m \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_s = \mathbf{u}_s - R_s \mathbf{i}_s \quad (7a)$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = \mathbf{L} \mathbf{i}_s + \boldsymbol{\psi}_{pm} \quad (7b)$$

missä \mathbf{u}_s on staattorijännite, \mathbf{i}_s staattorivirta, $\boldsymbol{\psi}_s$ staattorin käämivuovektori ja R_s staattoriresistanssi. Staattori-induktanssi ja kestopagneettivuovektori ovat

$$\mathbf{L} = e^{-\tilde{\theta}_m \mathbf{J}} \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} e^{\tilde{\theta}_m \mathbf{J}} \quad (8a)$$

$$\boldsymbol{\psi}_{\text{pm}} = e^{-\tilde{\theta}_m \mathbf{J}} \begin{bmatrix} \psi_{\text{pm}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8b)$$

missä $\tilde{\theta}_m = \hat{\theta}_m - \theta_m$. Kestomagneettivuon sähköinen kulma on θ_m ja roottorin sähkökulmanopeus $\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$. Kestomagneetin aiheuttama d-akselin suuntainen vuo on ψ_{pm} . L_d on d-akselin suuntainen staattorin induktanssi ja L_q tätä vastaan kohtisuorassa oleva q-akselin suuntainen induktanssi. Jos L_d ja L_q ovat erisuuret, tällöin on kysymyksessä avonapainen roottori.

Kestomagneettimoottorin tuottama vääntömomentti on

$$T_e = \frac{3p}{2} [\psi_{\text{pm}} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (9)$$

missä p on napapariluku. Avonapaisen roottorin tapauksessa myös virran d-komponentti vaikuttaa vääntömomenttiin, kun $i_q \neq 0$. Moottorin sähköisen ja mekaanisen kulmanopeuden ω_{mek} välinen yhteys on $\omega_m = p\omega_{\text{mek}}$. Moottorin mekaanista dynamiikkaa kuvaa yhtälö

$$J \frac{d\omega_{\text{mek}}}{dt} = T_e - T_L - b\omega_{\text{mek}} \quad (10)$$

missä T_L on kuormamomentti, ja $b > 0$ on konservatiivisia kitkavoimia kuvaava vakio.

Kestomagneetin indusoima vasta-smv on

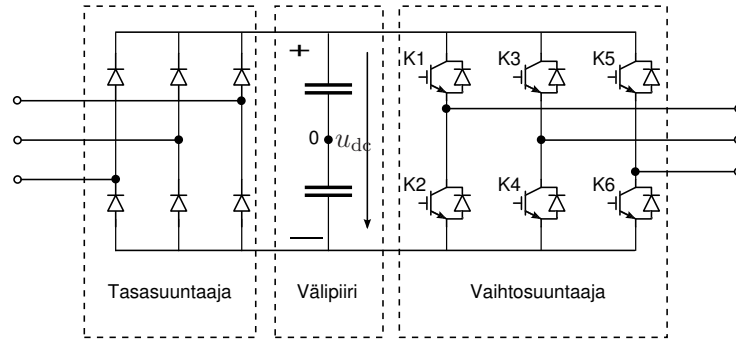
$$\mathbf{e} = \frac{d\boldsymbol{\psi}_{\text{pm}}}{dt} + \hat{\omega}_m \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_{\text{pm}} \quad (11)$$

Tätä käytetään jatkossa avuksi muodostettaessa roottorin asennon havaintisijaa. Toisaalta staattoripuolelta voidaan johtaa kestopagneetin vasta-smv yhtälöistä (7):

$$\mathbf{e} = \mathbf{u}_s - R_s \mathbf{i}_s - \frac{d(\mathbf{L} \mathbf{i}_s)}{dt} - \hat{\omega}_m \mathbf{J} \mathbf{L} \mathbf{i}_s \quad (12)$$

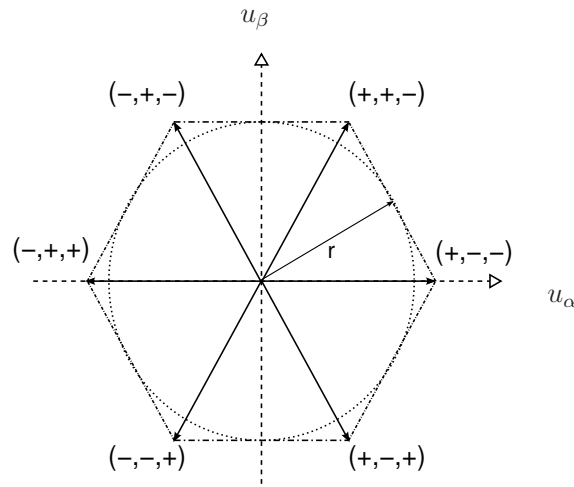
2.4 Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja

Moottorikäytöissä taajuusmuuttajalta vaaditaan portaaton jännitteen ja taajuuden ohjattavuutta toisistaan riippumatta. Kuvassa 2 nähtävä jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu kolmesta asteesta: tasasuuntaussillasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Tasasuuntaussiltana voi toimia myös diodisillan sijasta ohjattavilla komponenteilla toteutettu silta, jolloin välipiirijännite u_{dc} on säädettävissä (Kyyrä 2007). Lisäksi energian syöttö takaisin verkkoon on mahdollista käytettäessä tasasuuntaussillassa IGBT-kytkimiä tai MOSFET-kytkimiä.



Kuva 2: Taajuusmuuttaja

Samassa haarassa olevat kytkimet, esim. K1 ja K2, eivät voi olla yhtäaikaa johtavassa tilassa. Sallitut kytkinkombinaatiot, sekä näitä vastaavat avaruusvektorit on esitetty kuvan 3 diagrammissa. Lisäksi nollavektori saadaan aikaiseksi kombinaatioilla $(+, +, +)$ tai $(-, -, -)$.



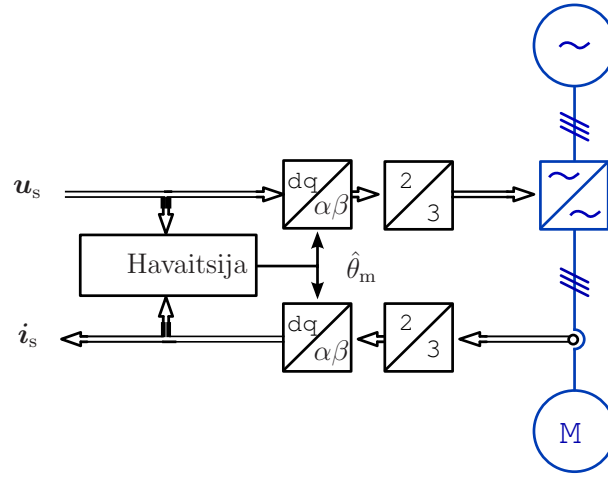
Kuva 3: Avaruusvektoridiagrammi

Käyttämällä diagrammin vektoreita mukaan lukien nollavektori voidaan mikä tahansa jännite kuusikulmion sisällä muodostaa keskiarvoistamalla. Tätä kutsutaan yleisesti moduloinniksi. Kuusikulmion sisällä oleva r -säteinen ympyrä rajoittaa sisäpuolelle lineaarisen moduloinnin alueen, jonka ylittäminen ei ole järkevää pysyvässä tilassa säröytymisen takia (Harnefors 2003).

2.5 Liikeanturiton vektorisäätö

Skalaariohjauksessa taajuudella määrätään moottorin pyörimisnopeus ja jännitteellä magnetointitila. Vektorisäädössä vuon ja momentin ohjaus pyritään saamaan tarkaksi moottorin vuomallin avulla, jolloin staattorivirran vuohon ja momenttiin vaikuttavat tekijät ovat erikseen ohjattavissa (Kyyrä 2007). Vektorisäädössä käytetään

hyväksi vaihtovirtamoottorin analogiaa tasavirtakoneen kanssa. Kun säätö toteutetaan roottorikoordinaatistossa, säädön kannalta oleelliset d- ja q-virtakomponentit muuttuvat tasavirroiksi (Harnefors 2003).



Kuva 4: Anturiton vektorisäätö

Kuvan 4 mukaisesti staattorivirrat mitataan ja muunnetaan avaruusvektoriksi ja muunnetaan roottorikoordinaatistoon. Vastaavasti säädöltä tuleva dq-tason jännitevektori muunnetaan ensin $\alpha\beta$ -koordinaatistoon ja tämän jälkeen kolmeksi vaihejännitteeksi. Koordinaatistomuunnoksiin tarvittava vuon kulmatieto estimoidaan mitatusta virrasta ja jännitteestä havaitsija-lohkossa.

3 Havaitisijat

3.1 Täyden kertaluvun havaitisijat

Yksi tapa estimoida tilaa on muodostaa täyden kertaluvun malli moottorin dynamiikalle. Tällöin käytetään moottoriyhtälöitä sellaisenaan ja korvataan kaikki tilamuuttujat estimaateilla. Havaitisijan muodostamiseen tarvitaan takaisinkytkentä todellisen prosessin mitatusta suureesta eli käytännössä virrasta (Franklin ym. 2002).

Piipon (2008) käyttämä nopeutta adaptoiva täyden kertaluvun havaitisija estimoidussa roottorikoordinaatistossa on

$$\frac{d\hat{\psi}_s}{dt} + \hat{\omega}_m \mathbf{J} \hat{\psi}_s = \mathbf{u}_s - R_s \hat{\mathbf{i}}_s + \mathbf{K}(\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s) \quad (13a)$$

$$\hat{\mathbf{i}}_s = \mathbf{L}^{-1}(\hat{\mathbf{q}}\hat{\psi}_s - \hat{\psi}_{pm}) \quad (13b)$$

missä \mathbf{i}_s on mitattu virta, $\hat{\psi}_s$ on estimoitu tilamuuttuja ja $\hat{\omega}_m$ on kulmanopeuden estimaatti. Kulmanopeuden estimaatti saadaan virtavirheestä PI-säätimellä

$$\hat{\omega}_m = -k_p(\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s) - k_i \int (\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s) dt \quad (14)$$

missä k_p ja k_i ovat säätimen viritysparametrit. Kestomagneettivuon estimaatti on

$$\hat{\psi}_{\text{pm}} = \begin{bmatrix} \psi_{\text{pm}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

joka oletetaan d-akselin suuntaiseksi, koska todellista kulmaa ei tunneta. Havaittajavahvistus on

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \quad (16)$$

jonka sopivalla valinnalla saadaan aikaan haluttu dynamiikka. Tilahavaintsija estimoiki koko tilavektorin käyttämällä mittausdataa virroista.

Täyden kertaluvun havaintsijoiden stabiilisuudelle on erittäin vaikea johtaa analyytisiä ehtoja, jotka antaisivat viritysparametreille yksikäsitteiset ehdot. Jos virran mittauksessa ei ole merkittävää häiriötä, on täyden kertaluvun havaintsija tarpeettoman monimutkainen. On perusteltua kyseenalaistaa niiden tilojen estimointi, jotka ovat suoraan mitattavissa.

Koonlaboon ym. (2005) muotoilivat avonapaiselle kestopagneettitahtimoottorille mallin käyttäen ns. fiktiivistä kestopagneettivuota, joka on samansuuntainen todellisen vuon kanssa. Malli on täysin lineaarinen, jos oletetaan, että $\frac{di_d}{dt} = 0$. He muodostavat uudesta mallista täyden kertaluvun havaintsijan, jossa tilamuuttujina ovat virran ja fiktiivisen vuon estimaatit. Tälle havaintsijalle stabiilisuusehdot on johdettu, mutta ehdoista huolimatta valittavana on kuusi parametria kulmanopeuden adaptointi mukaan lukien.

3.2 Vähennetyin kertaluvun havaintsijat

Vähennetyin kertaluvun havaintsijassa ei estimoida moottorimallin kaikkia tiloja, vaan käytetään mitattuja virtoja suoraan havaintsijan yhtälöissä. Havaintsijan kertaluku vähenee mitattujen tilojen määrällä. Tällöin paitsi havaintsijan yhtälöt myös estimointivirheen dynamiikan yhtälöt yksinkertaistuvat.

Consoli ym. (1994) muodostivat yksinkertaisen alennetyin kertaluvun havaintsijan avonapaiselle kestopagneettitahtimoottorille. Vasta-smv:t lasketaan staattorikoordinaatistossa kaikille kolmelle vaiheelle. A-vaiheen suuntainen ja q-suuntainen komponentti dq-koordinaatistossa ovat määritelty samansuuntaisiksi, jonka jälkeen d-komponentti on laskettu vasta-smv:n a- ja b-komponenteista. Kestomagneetin kulmaestimaatti saadaan d- ja q-vastasmv:n suhteesta käänteistangenttifunktiolla. Havaintsijan stabiilisuutta ei ole tutkittu, vaan käytön toimivuus on todettu askelmaisilla sekvensseillä kuorman ja nopeuden suhteen simuloiden sekä laboratoriomittauksissa suhteellisen suurilla nopeuksilla.

Eskola ja Tuusa (2003) vertailivat MRAS-menetelmään perustuvan havaintsijan suorituskykyä muodostamaansa vähennetyin kertaluvun havaintsijaan. MRAS-menetelmässä on rinnakkain referenssimalli ja adaptoituva malli, joiden tuottamien estimaattien erotus pakotetaan nolnaan. Eskolan ja Tuusan havaintsija soveltuu käytettäväksi vain pintamagneettimoottorille. Muodostetussa havaintsijassa jännitteistä

ja virroista laskettu vasta-smv ja estimoitavan kulmanopeuden aiheuttama liikejännite pakotetaan samansuuntaiseksi s.e. niiden ristitulo pakotetaan nolaksi. Laboratoriokokeissa muodostettu havaintija osoittautui toimivammaksi kuin MRAS-menetelmä. Käyttö pysyy stabiilina erilaisissa kuormitustilanteissa aina kolmen prosentin nopeuteen saakka.

Piippo ym. (2004) käyttivät signaali-injektiomenetelmän rinnalla kestopagneetin vuota estimoivaa havaintijaa:

$$\frac{d\hat{\psi}_{pm}}{dt} = \hat{e}_d + \alpha(\psi_{pm} - \hat{\psi}_{pm}) \quad (17a)$$

$$\hat{\omega}_m = \frac{\hat{e}_q}{\hat{\psi}_{pm}} \quad (17b)$$

missä vasta-smv:n komponentit estimoitiin yhtälöillä

$$\hat{e}_d = u_d - R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \hat{\omega}_m L_q i_q \quad (18a)$$

$$\hat{e}_q = u_q - R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \hat{\omega}_m L_d i_d \quad (18b)$$

Tämän havaintijan suorituskykyä verrataan myöhemmin esitettävän ehdotetun havaintijan suorituskykyyn.

Kumar ym. (2006) esittivät epälineaarisen vähennetyin kertaluvun havaintijan harjattomalle kestopagneettimoottorille. Kyseisen moottorityypin vasta-smv ei ole sini-muotoinen vaan puolisuunnikkaan muotoinen. Havaintijassa mitatut virrat saadaan suodatettua muuttujanvaihdoksella siten, että mittauskohina ei alenna havaintijan suorituskykyä merkittävästi. Havaintijan toimintaa tarkastellaan ainoastaan yhdellä simuloinnilla, jossa moottori käynnistetään ilman kuormaa. Harjatonta kestopagneettimoottoria ei käsitellä tässä työssä tämän enempää.

Harnefors ym. (2003) muotoilivat yhdistetyn moottorimallin oikosulkukoneelle ja kestopagneetikoneelle. Malliin pohjautuen on muodostettu kaksi vähennetyin kertaluvun havaintijaa: staattisesti kompensoitu jännitemalli (SCVM) ja vaihelukittuun silmukkaan (PLL) perustuva havaintija. Kestopagneetikoneen tarkastelu rajoittuu pintamagneettimoottoriin, missä $L_d = L_q$. Staattisesti kompensoitu jännitemalli johon havaintija perustuu on

$$\hat{\psi}_{pm}^s = \frac{\mathbf{I} - \mathbf{J}\lambda \text{sign}(\hat{\omega}_m)}{p + \lambda|\hat{\omega}_m|} \mathbf{e}^s \quad (19)$$

missä $p = d/dt$, $\hat{\psi}_{pm}^s$ on roottorivuo staattorikoordinaatistossa, \mathbf{e}^s on roottorivuo vasta-smv staattorikoordinaatistossa ja λ viritysparametri. Muuttamalla yhtälö (19) tahtikoordinaatistoon ja komponenttimuotoon on saatu yhtälöpari

$$\hat{\psi}_{pm} = \frac{\mu e_d + \lambda \text{sign}(\hat{\omega}_m) e_q}{p + \lambda|\hat{\omega}_m|} \quad \hat{\omega}_m = \frac{e_q - \lambda \text{sign}(\hat{\omega}_m) e_d}{\hat{\psi}_{pm}} \quad (20)$$

mihin on lisätty ylimääräinen vapausaste μ , jota ei kompleksisessa muodossa voida käyttää. Lopullinen havaitsija on saatu yhtälöistä (20) lisäämällä vielä alipäästösuo-
datin, jonka kaistanleveys on α_ω

$$\hat{\omega}_m = \frac{\alpha_\omega}{p + \alpha_\omega} \left(\frac{e_q - \lambda \text{sign}(\hat{\omega}_m) e_d}{\hat{\psi}_{\text{pm}}} \right) \quad (21)$$

Stabiilisuusanalyysi on tehty tutkimalla vuon ja kulman estimointivirheiden dynamiikkaa. Estimaatit $\hat{\mathbf{L}}$ ja \hat{R}_s oletetaan tunnetuksi tarkasti, ja roottorivuon on oletettu muuttuvan hitaasti s.e. sen aikaderivaatta voidaan merkitä nolllaksi. Lopputuloksena on saatu karakteristinen polynomi virheen dynamiikalle, jonka navat voidaan sijoitella mielivaltaisesti. Julkaisussa on johdettu samoilla yksinkertaistuksilla ehdot myös PLL-tyyppiselle havaitsijalle. Virheen dynamiikaksi saadaan jännitemallin kanssa identtinen, vaikka lähtökohdat ovat varsin erilaiset. Pienillä nopeuksilla havaitsijan suorituskykyä parantamaan on ehdotettu vahvistusparametreja muutettaviksi nopeuden mukaan.

Jansson ym. (2006) muotoilivat havaitsijan, jonka suorituskykyyn resistanssin estimaatin tarkkuus ei ainakaan näennäisesti vaikuta. Havaitsija on sama kuin Harneforsin (2003) esittämä, mutta havaitsijavahvistus on valittu siten, että resistanssin estimaatti supistuu kokonaan pois asentokulman estimointivirheen dynamiikasta. Supistuminen edellyttää kuitenkin d-virran ohjaamista q-virran funktiona vääntömomentin optimoimisesta poikkeavalla tavalla. Tämän jälkeen virittäminen tapahtuu alipäästösuo-
don kaistanleveyden valinnalla. Havaitsijan toimivuutta on tutkittu erityisesti käynnistettäessä ja suunnanvaihdossa. Algoritmi sopii vain pintamagneettimoottorille ja d-virran valinnasta johtuen käytön hyötysuhde ei ole yleensä optimaalinen.

4 Ehdotettu havaitsija

4.1 Kulman estimointi

Induktanssimatriisin ja kestopagneetin vuovektorin estimaatit ovat

$$\hat{\mathbf{L}} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}, \quad \hat{\boldsymbol{\psi}}_{\text{pm}} = \begin{bmatrix} \psi_{\text{pm}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Näiden avulla esitettynä yhtälöiden (11) ja (12) vasta-smv:n estimaatit saavat muodon

$$\hat{e} = \hat{\omega}_m \mathbf{J} \hat{\boldsymbol{\psi}}_{\text{pm}} \quad (23a)$$

$$\mathbf{e}' = \mathbf{u}_s - \hat{R}_s \mathbf{i}_s - \hat{\mathbf{L}} \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} - \hat{\omega}_m \mathbf{J} \hat{\mathbf{L}} \mathbf{i}_s \quad (23b)$$

Virran derivaatta tiedetään käytännön toteutuksessa, koska se voidaan mitata tai laskea tämän hetkisestä ja edellisen askeleen arvosta. Jos näin ei olisi, tarvittaisiin täyden kertaluvun havaitsijaa.

Yhtälöistä (23) voidaan muotoilla havaitsija:

$$\mathbf{k}^T(\hat{\mathbf{e}} - \mathbf{e}') = 0 \quad (24)$$

missä $\mathbf{k} = [g, 1]^T$ on vahvistusvektori. Yhtälöstä (24) nähdään, että vahvistuksen q-komponentin valinnalla ei ole merkitystä, koska yhtälö voidaan aina kertoa puolittain q-komponentin käänteisluvulla. Sijoittamalla edelliseen yhtälöt (23) ja ratkaisemalla estimoitu kulmanopeus saadaan

$$\hat{\omega}_m = \frac{\mathbf{k}^T(\mathbf{u}_s - \hat{R}_s \mathbf{i}_s - \hat{\mathbf{L}} \frac{d\mathbf{i}_s}{dt})}{\mathbf{k}^T \mathbf{J}(\hat{\psi}_{\text{pm}} + \hat{\mathbf{L}} \mathbf{i}_s)} = \frac{u_q - \hat{R}_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} + g(u_d - \hat{R}_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt})}{\psi_{\text{pm}} + L_d i_d - g L_q i_q} \quad (25)$$

josta integroimalla saadaan kulman estimaatti. Valitsemalla $g = 0$ päädytään jännitemalliin. Havaitsijan kertaluku on yksi, ja viritettävänä on vain yksi parametri, g .

4.2 Resistanssin adaptointi

Resistanssin adaptointiin käytetään lakia

$$\frac{d\hat{R}_s}{dt} = \mathbf{k}_R^T(\hat{\mathbf{e}} - \mathbf{e}') \quad (26)$$

eli auki laskettuna komponenttimuodossa:

$$\frac{d\hat{R}_s}{dt} = k_{Rd}(\hat{R}_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \hat{\omega}_m L_q i_q - u_d) + k_{Rq}(\hat{\omega}_m \psi_{\text{pm}} + \hat{R}_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \hat{\omega}_m L_d i_d - u_q) \quad (27)$$

missä $\mathbf{k}_R = [k_{Rd}, k_{Rq}]^T$ on resistanssin adaptoinnin vahvistusvektori. Jos ohjausmenetelmästä johtuen d-virta on pieni suhteessa q-virtaan, vahvistus k_{Rd} voi olla perusteltua valita nollassa. Käyttö voi olla toimintapisteessä, jossa q-virta on liian pieni resistanssin adaptointiin. Tällöin on mahdollista lisätä adaptoinnin k_{Rd} -vahvistusta, sekä kasvattaa d-virtaa adaptoinnin mahdollistamiseksi.

4.3 Estimointivirheen dynamiikka

Stabiilisuusehdot havaitsijalle on tarkoitus määrittää siten, että havaitsijavahvistuksen ehdot määritetään linearisoidusta estimointivirheen dynamiikasta aluksi ilman resistanssin adaptoinnin vaikutusta dynamiikkaan. Tämän jälkeen adaptoinnin vahvistuksien ehdot johdetaan olettaen havaitsijavahvistus ennalta määräytyksi.

4.4 Havaitisjavahvistuksen valinta

Yhtälöistä (7) ja (25) voidaan ratkaista kulmaestimaatin virheen $\tilde{\theta}_m = \hat{\theta}_m - \theta_m$ dynamiikka:

$$\frac{d\tilde{\theta}_m}{dt} = -\frac{\mathbf{k}^T[\omega_m \mathbf{J}(\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{\text{pm}} + \tilde{\mathbf{L}}\mathbf{i}_s) + \tilde{\mathbf{L}}\frac{d\mathbf{i}_s}{dt} + \tilde{R}_s\mathbf{i}_s]}{\mathbf{k}^T[\mathbf{J}(\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{\text{pm}} + \tilde{\mathbf{L}}\mathbf{i}_s) + \frac{d\tilde{\mathbf{L}}}{d\theta_m}\mathbf{i}_s + \frac{d\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{\text{pm}}}{d\theta_m}]} \quad (28)$$

missä $\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{\text{pm}} = \hat{\boldsymbol{\psi}}_{\text{pm}} - \boldsymbol{\psi}_{\text{pm}}$, $\tilde{\mathbf{L}} = \hat{\mathbf{L}} - \mathbf{L}$ ja $\tilde{R}_s = \hat{R}_s - R_s$. Estimointivirheen lokaalia stabiilisuutta voidaan tutkia linearisoidun mallin avulla. Jatkossa alaindeksillä 0 viitataan toimintapisteen arvoihin, johon malli on linearisoitu. Kun määritellään $\tilde{R}_s = 0$ ja $(d\mathbf{i}_s/dt)_0 = 0$, virheen dynamiikaksi saadaan

$$\frac{d\tilde{\theta}_m}{dt} = \frac{\omega_{m0}\mathbf{k}_0^T[\boldsymbol{\psi}_{\text{pm}} + (\mathbf{L} + \mathbf{J}\mathbf{L}\mathbf{J})\mathbf{i}_{s0}]}{\mathbf{k}_0^T\mathbf{J}[\boldsymbol{\psi}_{\text{pm}} + (\mathbf{L} + \mathbf{J}\mathbf{L}\mathbf{J})\mathbf{i}_{s0}]} \tilde{\theta}_m \quad (29)$$

Jos $L_d = L_q$, yhtälö pelkisyys muotoon

$$\frac{d\tilde{\theta}_m}{dt} = g_0\omega_{m0}\tilde{\theta}_m \quad (30)$$

Tällöin järjestelmä on stabiili, kun vahvistusparametri g_0 valitaan erimerkkiseksi kuin kulmanopeus. Yhtälö (29) komponenttimuodossa esitettynä, kun $L_d \neq L_q$,

$$\frac{d\tilde{\theta}_m}{dt} = \omega_{m0} \frac{g(L'i_{d0} - \psi_{\text{pm}}) - L'i_{q0}}{L'i_{d0} + L'gi_{q0} - \psi_{\text{pm}}} \tilde{\theta}_m = \omega_{m0}C\tilde{\theta}_m \quad (31)$$

missä $L' = L_q - L_d > 0$. Ensimmäisen kertaluvun järjestelmä on stabiili silloin, kun

$$\begin{aligned} \omega_{m0}C < 0 &\Rightarrow \\ \begin{cases} \omega_{m0} > 0 \wedge C < 0 \\ \omega_{m0} < 0 \wedge C > 0 \end{cases} & \quad (32) \end{aligned}$$

Kun $\omega_{m0} > 0$, yhtälöistä (32) ja (31) saadaan ehdot

$$\begin{cases} g(L'i_{d0} - \psi_{\text{pm}}) - L'i_{q0} > 0 \\ L'i_{d0} + L'gi_{q0} - \psi_{\text{pm}} < 0 \end{cases} \quad (33)$$

tai

$$\begin{cases} g(L'i_{d0} - \psi_{\text{pm}}) - L'i_{q0} < 0 \\ L'i_{d0} + L'gi_{q0} - \psi_{\text{pm}} > 0 \end{cases} \quad (34)$$

Yhtälöparista (33) saadaan ehdot

$$g < \frac{L'i_{q0}}{L'i_{d0} - \psi_{\text{pm}}}, \quad \text{kun} \quad \begin{cases} i_{q0} > 0 \\ \omega_{m0} > 0 \end{cases} \quad (35a)$$

$$\frac{\psi_{\text{pm}} - L'i_{d0}}{L'i_{q0}} < g < \frac{L'i_{q0}}{\psi_{\text{pm}} - L'i_{d0}}, \quad \text{kun} \quad \begin{cases} i_{q0} < 0 \\ \omega_{m0} > 0 \end{cases} \quad (35b)$$

Yhtälöparista (34) vastaavasti saadaan ehto

$$g > \frac{\psi_{\text{pm}} - L'i_{\text{d0}}}{L'i_{\text{q0}}}, \quad \text{kun} \quad \begin{cases} i_{\text{q0}} > 0 \\ \omega_{\text{m0}} > 0 \end{cases} \quad (36)$$

Kun $\omega_{\text{m0}} < 0$, vastaavasti on oltava $C > 0$. Stabiilisuuehdoiksi saadaan

$$\begin{cases} g(L'i_{\text{d0}} - \psi_{\text{pm}}) - L'i_{\text{q0}} < 0 \\ L'i_{\text{d0}} + L'gi_{\text{q0}} - \psi_{\text{pm}} < 0 \end{cases} \quad (37)$$

tai

$$\begin{cases} g(L'i_{\text{d0}} - \psi_{\text{pm}}) - L'i_{\text{q0}} > 0 \\ L'i_{\text{d0}} + L'gi_{\text{q0}} - \psi_{\text{pm}} > 0 \end{cases} \quad (38)$$

Yhtälöstä (37) saadaan ehdot

$$\frac{L'i_{\text{q0}}}{L'i_{\text{d0}} - \psi_{\text{pm}}} < g < \frac{\psi_{\text{pm}} - L'i_{\text{d0}}}{L'i_{\text{q0}}}, \quad \text{kun} \quad \begin{cases} i_{\text{q0}} > 0 \\ \omega_{\text{m0}} < 0 \end{cases} \quad (39\text{a})$$

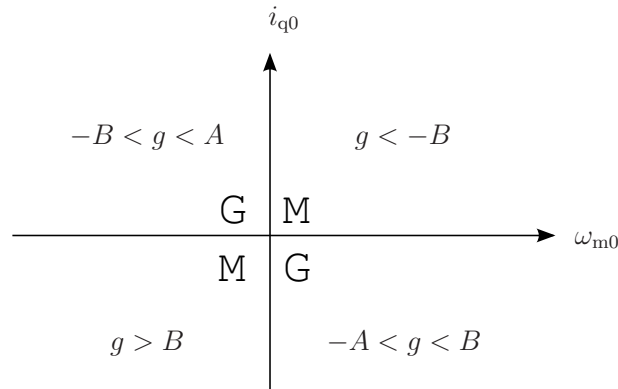
$$g > \frac{L'i_{\text{q0}}}{L'i_{\text{d0}} - \psi_{\text{pm}}}, \quad \text{kun} \quad \begin{cases} i_{\text{q0}} < 0 \\ \omega_{\text{m0}} < 0 \end{cases} \quad (39\text{b})$$

Yhtälöparista (38) löytyy ehto

$$g < \frac{\psi_{\text{pm}} - L'i_{\text{d0}}}{L'i_{\text{q0}}}, \quad \text{kun} \quad \begin{cases} i_{\text{q0}} < 0 \\ \omega_{\text{m0}} < 0 \end{cases} \quad (40)$$

Ehdot (35a) ja (39a) pätevät moottorikäytölle ja ehdot (35b) ja (36) sekä (39b) ja (40) generaattorikäytölle. Generaattorikvadranteissa toinen havaitsijavahvistusta rajoittava termi on muuttunut merkityksettömäksi. Ehtojen (36) ja (40) käyttö ei käytännössä ole mahdollista. Stabiilisuusehdot yhteenvetona kaikissa kvadranteissa on esitetty kuvassa 5. Kuvassa on käytetty merkintöjä

$$A = \frac{\psi_{\text{pm}} - L'i_{\text{d0}}}{L'|i_{\text{q0}}|} = \frac{1}{B} \quad (41)$$



Kuva 5: Stabiilisuusehdot havaitsijavahvistukselle

4.5 Resistanssin adaptoinnin vahvistuksen valinta

Resistanssin adaptointi vaikuttaa koko havaitsijan dynamiikkaan. Kulmaestimaatin ja resistanssin estimaatin virheen dynamiikka linearisoituna toimintapisteeseen on

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{\theta}_m}{dt} = \frac{\omega_{m0}\mathbf{k}_0^T\boldsymbol{\psi}_0}{\mathbf{k}_0^T\mathbf{J}\boldsymbol{\psi}_0}\tilde{\theta}_m - \frac{\mathbf{k}_0^T\mathbf{i}_{s0}}{\mathbf{k}_0^T\mathbf{J}\boldsymbol{\psi}_0}\tilde{R}_s \\ \frac{d\tilde{R}_s}{dt} = -\omega_{m0}\mathbf{k}_{R0}^T\left(\boldsymbol{\psi}_0 - \frac{\mathbf{k}_0^T\boldsymbol{\psi}_0}{\mathbf{k}_0^T\mathbf{J}\boldsymbol{\psi}_0}\mathbf{J}\boldsymbol{\psi}_0\right)\tilde{\theta}_m + \mathbf{k}_{R0}^T\left(\mathbf{i}_{s0} - \frac{\mathbf{k}_0^T\mathbf{i}_{s0}}{\mathbf{k}_0^T\mathbf{J}\boldsymbol{\psi}_0}\mathbf{J}\boldsymbol{\psi}_0\right)\tilde{R}_s \end{cases} \quad (42)$$

missä $\boldsymbol{\psi}_0 = \boldsymbol{\psi}_{\text{pm}} + (\mathbf{L} + \mathbf{J}\mathbf{L}\mathbf{J})\mathbf{i}_{s0}$.

Linearisoitu dynamiikka on toisen kertaluvun järjestelmä, joka on muotoa

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_m \\ \tilde{R}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_m \\ \tilde{R}_s \end{bmatrix} \quad (43)$$

Järjestelmän stabiilisuus voidaan selvittää esimerkiksi Routhin kaaviolla. Järjestelmä on stabiili, jos

$$-a - d > 0 \quad (44a)$$

$$ad - bc > 0 \quad (44b)$$

Kertoimet auki laskettuna ovat

$$a = \omega_{m0} \frac{g_0(\psi_{\text{pm}} - L'i_{d0}) + L'i_{q0}}{\psi_{\text{pm}} - L'(i_{d0} + g_0i_{q0})} \quad (45)$$

$$b = -\frac{g_0i_{d0} + i_{q0}}{\psi_{\text{pm}} - L'(i_{d0} + gi_{q0})} \quad (46)$$

$$c = -\omega_{m0} \left[k_{Rd} \left(\psi_{pm} - L'i_{d0} + L'i_{q0} \frac{g_0(\psi_{pm} - L'i_{d0}) + L'i_{q0}}{\psi_{pm} - L'(i_{d0} + g_0i_{q0})} \right) + k_{Rq} \left(L'i_{q0} + (L'i_{d0} - \psi_{pm}) \frac{g_0(\psi_{pm} - L'i_{d0}) + L'i_{q0}}{\psi_{pm} - L'(i_{d0} + g_0i_{q0})} \right) \right] \quad (47)$$

$$d = k_{Rd} \left(i_{d0} + L'i_{q0} \frac{g_0i_{d0} + i_{q0}}{\psi_{pm} - L'(i_{d0} + g_0i_{q0})} \right) + k_{Rq} \left(i_{q0} + (L'i_{d0} - \psi_{pm}) \frac{g_0i_{d0} + i_{q0}}{\psi_{pm} - L'(i_{d0} + g_0i_{q0})} \right) \quad (48)$$

Jos $k_{Rd} = 0$ ja $\psi_{pm} - L'(i_{d0} + g_0i_{q0}) > 0$ saadaan ehdosta (44a)

$$\begin{cases} k_{Rq} > \frac{\omega_{m0}(L'i_{q0} + g_0\psi_{pm})}{L'g_0i_{q0}^2} & , \text{ kun } g_0 > 0 \\ k_{Rq} < \frac{\omega_{m0}(L'i_{q0} + g_0\psi_{pm})}{L'g_0i_{q0}^2} & , \text{ kun } g_0 < 0 \end{cases} \quad (49)$$

Ehdosta (44b) saadaan

$$\omega_{m0} \frac{g_0(\psi_{pm} - L'i_{d0}) + L'i_{q0}}{\psi_{pm} - L'(i_{d0} + g_0i_{q0})} k_{Rq} \left(i_{q0} + (L'i_{d0} - \psi_{pm}) \frac{g_0i_{d0} + i_{q0}}{\psi_{pm} - L'(i_{d0} + g_0i_{q0})} \right) - \frac{g_0i_{d0} + i_{q0}}{\psi_{pm} - L'(i_{d0} + g_0i_{q0})} \omega_{m0} k_{Rq} \left(L'i_{q0} + (L'i_{d0} - \psi_{pm}) \frac{g_0(\psi_{pm} - L'i_{d0}) + L'i_{q0}}{\psi_{pm} - L'(i_{d0} + g_0i_{q0})} \right) > 0 \quad (50)$$

Jos $\psi_{pm} - L'(i_{d0} + g_0i_{q0}) > 0$, yhtälöstä (50) ratkeaa ehto

$$g_0i_{q0}\omega_{m0}k_{Rq} [i_{d0}(2g_0L'^2i_{q0} - 3L'\psi_{pm} + 2L'^2i_{d0}) + \psi_{pm}(\psi_{pm} - g_0L'i_{q0})] > 0 \quad (51)$$

Tavallisesti $L'^2 \approx 0$, jolloin yhtälö pelkistyy muotoon

$$g_0i_{q0}\omega_{m0}k_{Rq}(\psi_{pm} - g_0L'i_{q0} - 3L'\psi_{pm}i_{d0}) > 0 \quad (52)$$

Yleisimmille kestopagneettimoottorityypeille lienee $\psi_{pm} - g_0L'i_{q0} - 3L'\psi_{pm}i_{d0} > 0$, jolloin yhtälö saa yksinkertaisen muodon:

$$g_0\omega_{m0}i_{q0}k_{Rq} > 0 \quad (53)$$

Käytännössä ω_{m0} ja g_0 ovat erimerkkisiä, jolloin vahvistuksen k_{Rq} on oltava vastakaismerkkinen virran i_{q0} kanssa. Ehdot (49) eivät rajoita vahvistuksen valintaa.

5 Simuloinnit

5.1 Simulointimalli

Simuloinnit tehdään Matlabin Simulinkillä, jossa mallinnettavana moottorina on yhtälöihin (7) perustuva jatkuva-aikainen malli. Nopeussäätäjän kaistanleveys on 2 Hz

ja nopeussäätäjälle menevän nopeusestimaatin alipäästösuodon kaistanleveys on 0,5 Hz. Moottorin mekaanista dynamiikkaa kuvaa yhtälö (10). Virtasäätäjänä on tahitikoordinaatistossa toimiva digitaalinen PI-säätäjä, jonka näytteenottoväli $T_s = 0,1$ ms ja kaistanleveys 267 Hz. Simuloidun moottorimallin nimellisarvot ja parametrit ovat esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Moottorin arvot

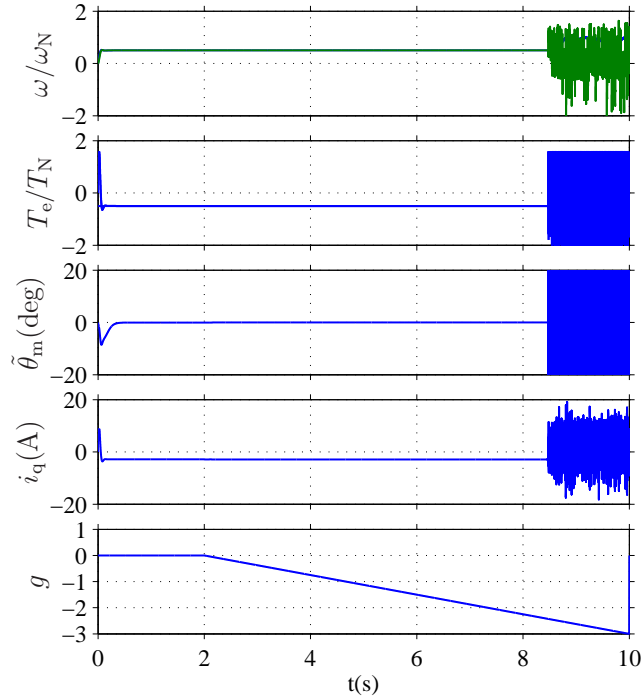
| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Nimellisteho | 2,2 kW |
| Nimellisjännite | 370 V |
| Nimellisvirta | 4,3 A |
| Nimellistaaajuus | 75 Hz |
| Nimelliskoosteus | 1 500 rpm |
| Nimellismomentti T_N | 14 Nm |
| Napapariluku p | 3 |
| Staattoriresistanssi R_s | 3,59 Ω |
| Pitkittäisinduktanssi L_d | 36 mH |
| Poikittäisinduktanssi L_q | 51 mH |
| Kestomagneetin vuo ψ_{pm} | 0,545 Vs |
| Kokonaishitausmomentti | 0,015 kgm ² |

5.2 Havait-sijavahvistuksen simulointi

Havait-sijavahvistuksen rajoja simuloimalla haettaessa malliin syötetyt havait-sijan parametrien estimaatit ovat tarkat. Käyttö on läpi simuloinnin samassa toimintapisteessä ja ohjausmenetelmäksi on yksinkertaisuuden vuoksi valittu $i_d = 0$. Havait-sijavahvistusta muutetaan hitaasti kohti epästabiilia aluetta, kunnes kulmavirheen kasvaminen on tulkittavissa epästabiilisuudeksi. Käytön toimintapiste on valittu siten, että joka kvadrantissa

$$|\omega_{m0}| = \frac{\omega_N}{2} \quad \text{ja} \quad |T_L| = \frac{T_N}{2} \quad (54)$$

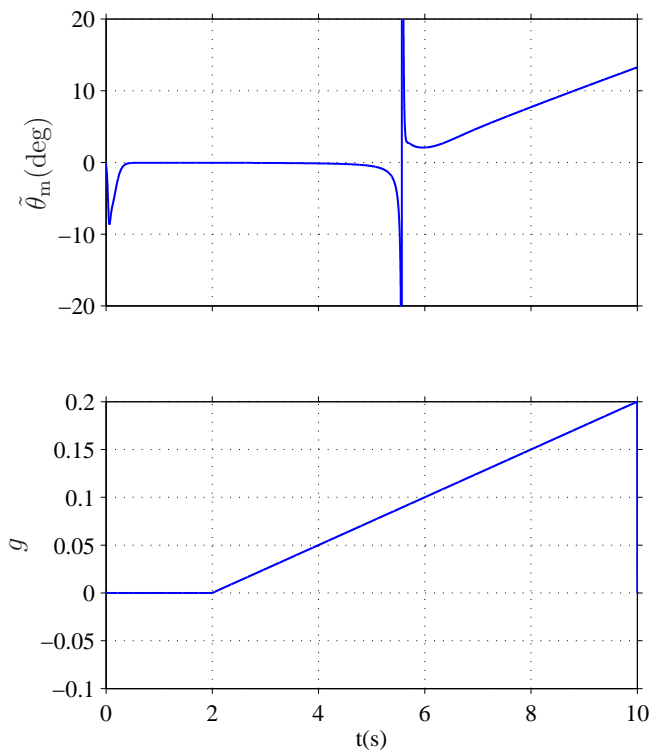
missä T_L on kuormamomentti sekä ω_N ja T_N kulmanopeuden ja vääntömomentin nimellisarvot.



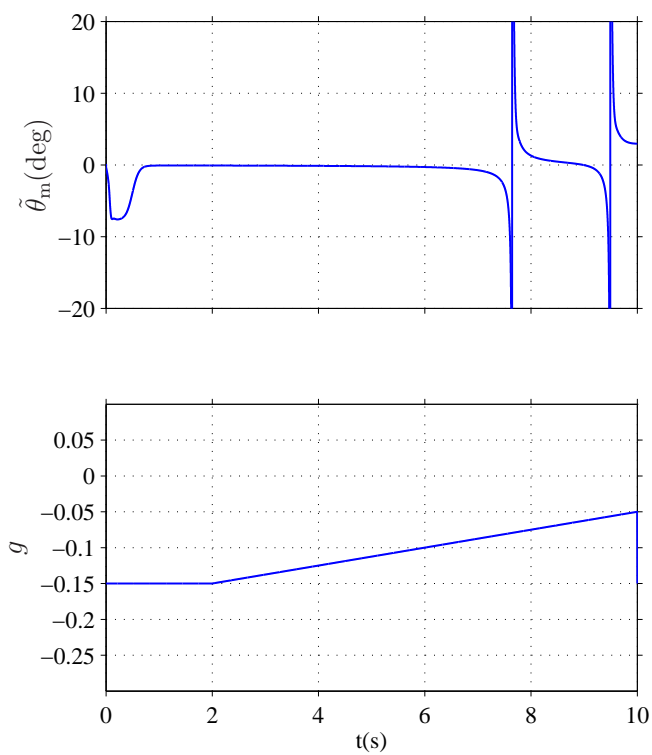
Kuva 6: Negatiivinen raja vahvistukselle g , kun $\omega_m > 0 \wedge i_q < 0$ Ylhäältä alaspäin luettuna kuvassa ovat: sähköisen kulmanopeuden suhteellisarvo, vääntömomentti suhteessa nimelliseen, kulmavirhe asteina, q-virta estimoidussa roottorikoordinaatistossa ja havaitsijavahvistus.

Kuvassa 6 on simuloitu negatiivinen raja vahvistukselle g , kun $\omega_m > 0 \wedge i_q < 0$. Jatkossa vastaavissa simuloinneissa on esitetty vain kulmavirhe ja havaitsijavahvistus. Kuvasta on luettavissa, että havaitsija muuttuu epästabiiliksi ajan hetkellä 8,43 s havaitsijavahvistuksen ollessa $g \approx -2,43$.

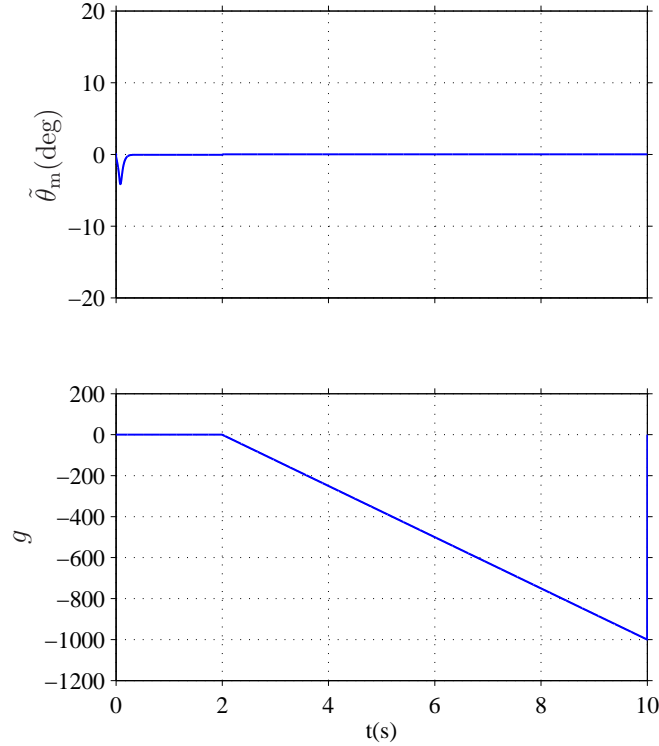
Haetaan seuraavaksi vastaavalla menetelmällä positiivinen raja havaitsijavahvistukselle, joka on esitetty kuvassa 7. Rajaksi on luettavissa $g \approx 0,088$, kun $t = 5,52$ s. Kuvassa 8 on haettu kvadrantin $\omega > 0 \wedge i_q > 0$ raja, mistä saadaan hetkellä $t = 7,52$ s rajaksi $g \approx -0,081$. Teorian mukaan tässä toimintapisteessä havaitsijavahvistuksella ei ole lainkaan negatiivista alarajaa. Tämä on vahvistettu kuvan 9 simuloinnilla.



Kuva 7: Positiivinen raja vahvistukselle g , kun $\omega_m > 0 \wedge i_q < 0$



Kuva 8: Raja vahvistukselle g , kun $\omega_m > 0 \wedge i_q > 0$

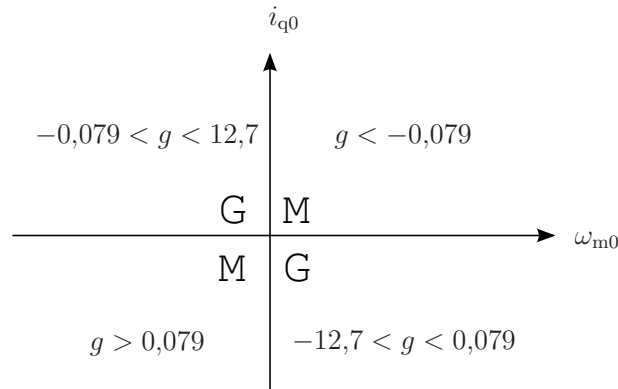


Kuva 9: Raja vahvistukselle g , kun $\omega_m > 0 \wedge i_q > 0$

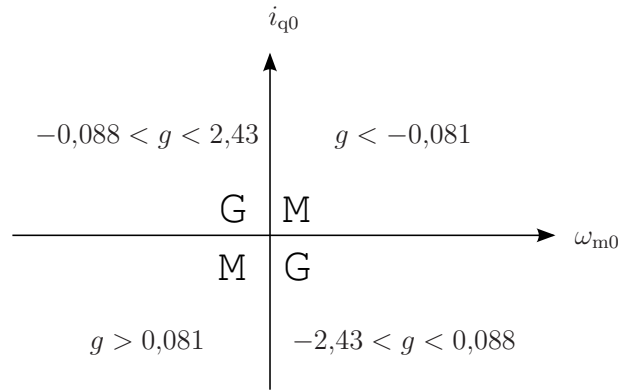
Toimintapisteet joissa $\omega_m > 0$, on simuloitu. Samalla menetelmällä on haettu rajat myös toimintapisteissä, joissa pyörimisnopeus on negatiivinen. Kuvissa 11 ja 10 on yhteenveto numeroarvoina simuloimalla saaduista sekä analyyttisesti lasketuista stabiilisuusehdoista. Simuloidulle käytölle analyyttisesti laskettujen stabiilisuusehtojen itseisarvot on laskettu sijoittamalla moottorin arvot yhtälöön (41):

$$A = \frac{\psi_{pm} - L' i_{d0}}{L' |i_{q0}|} = \frac{0,5447}{0,015 \cdot 2,857} \approx 12,7 \quad (55a)$$

$$B = \frac{1}{A} \approx 0,079 \quad (55b)$$



Kuva 10: Ehdot analyytisesti



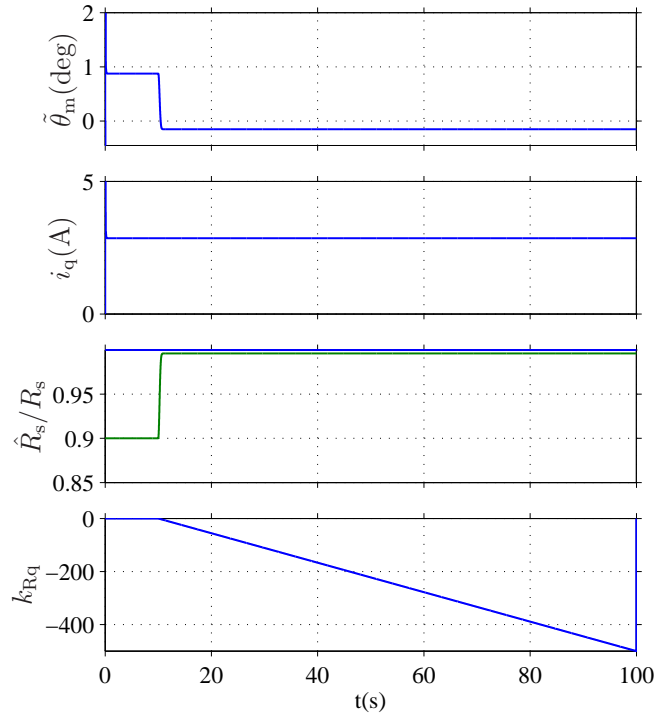
Kuva 11: Ehdot simuloimalla

Generaattorikvadranteissa itseisarvoltaan suurempi simuloitu raja on merkittävästi pienempi kuin laskennallinen arvo. Suurilla vahvistuksen arvoilla havaitsijan kaistanleveys on suuri ja tällöin muuttuu herkäksi diskretoinnin aiheuttamalle kohinalle. Simuloimalla määritetyt stabiilisuusehdot myös riippuvat näytteenottotaajuudesta. Näytteenottotaajuutta nostettaessa edellinen raja pienenee entisestään.

5.3 Resistanssin adaptoinnin simulointi

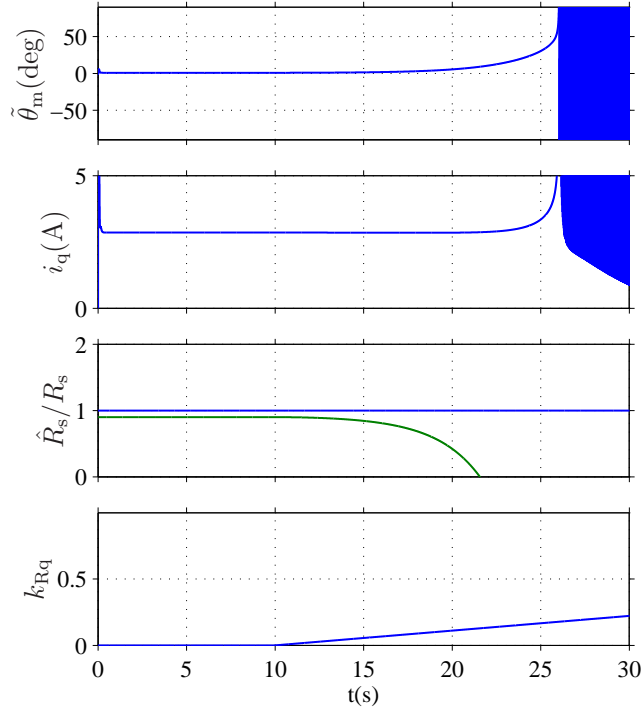
Adaptointivahvistuksen rajoja haettaessa simuloitavan käytön toimintapiste on sama kuin havaitsijavahvistuksen simuloinneissa kohdassa 5.2, eli kuormamomentti ja kulmanopeus ovat puolet nimellisestä. Havaitsijavahvistus on kiinnitetty siten, että $|g| = 0,5$. Adaptoinnin algoritmista johtuen estimoitu resistanssi ei lähde ajautumaan virheelliseksi, jos se kerran saavuttaa tarkan todellisen arvon. Tämän takia havaitsijan induktanssit ovat asetettu virheelliseksi siten, että havaitsijan L_d ja L_q ovat 1,01-kertaiset moottorin todellisiin arvoihin verrattuna.

Resistanssin estimaatti on asetettu simuloinnin alkaessa virheelliseksi ja adaptiivivahvistus nolaksi. Vahvistusta lähdetään muuttamaan hitaasti, jolloin nähdään asettuvatko resistanssin ja kulman estimaatit todellisiin arvoihin vai muuttuuko järjestelmä epästabiiliksi. Teorian mukaan resistanssin adaptiivisen vahvistuksen itseisarvolla ei ole suuruutta rajoittavaa ehtoa, kunhan vain etumerkki on oikea eli vastakkainen virran i_q kanssa. Tämä on todettu ensimmäisessä simuloinnissa kuvassa 12.



Kuva 12: Negatiivinen raja k_{Rq} :lle, kun $i_q > 0$

Kuvassa 12 resistanssin ja kulman estimaatin pysyvän tilan poikkeama johtuu virheellisistä induktansseista. Riippumatta vahvistuksen k_{Rq} suuruudesta käyttö pysyy stabiilina, kunhan vahvistus on negatiivinen. Kuvassa 13 on esitetty vastaava simulointi, mutta vahvistusta on muutettu hitaasti positiiviseksi hetkestä $t = 10$ s alkaen.

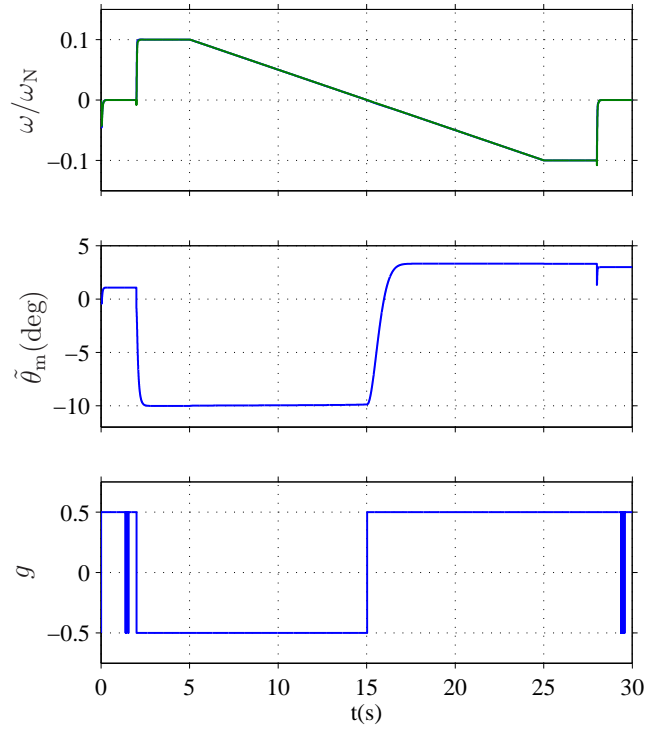


Kuva 13: Positiivinen raja k_{Rq} :lle kun $i_q > 0$

Jos toimintapistettä muutetaan siten, että q-virta muuttuu vastakkaismerkkiseksi, täytyy myös adaptoinnin vahvistuksen etumerkkiä muuttaa. Simulointitulokset ovat tällöin peilikuvat edellisistä, joten niitä ei tässä esitetä.

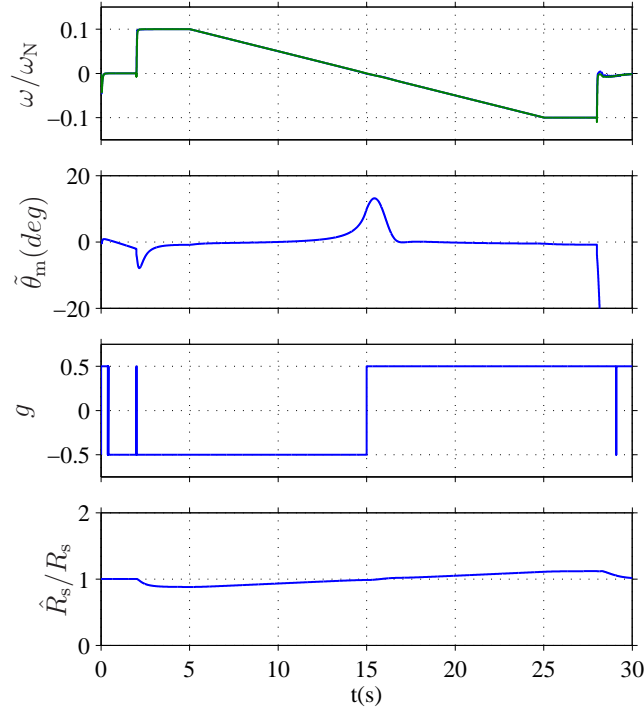
5.4 Suunnanvaihdon simulointi

Tässä osiossa on tarkoitus vertailla käytön toimivuutta suunnanvaihdossa resistanssin adaptoinnin kanssa ja ilman. Resistanssin estimaatit ovat molemmissa simuloinneissa lähtötilanteessa oikeat, eikä moottorin resistanssia muuteta simuloinnin aikana. Induktanssien estimaatteihin on aseteltu virheet siten, että $\hat{L}_d = 0,9L_d$ ja $\hat{L}_q = 0,9L_q$. Kestomagneetin vuon estimaatti $\hat{\psi}_{pm} = 1,05\psi_{pm}$. Suunnanvaihto toteutetaan siten, että kuormamomentti on puolet nimellisestä koko suunnanvaihdon ajan. Havaitisijavahvistus $|g| = 0,5$ ja stabiilisuusehtojen edellyttämällä tavalla vastakkaismerkkinen pyörimisnopeuden kanssa. Adaptoinnin $|k_{Rq}| = 0,5$ ja vastakkaismerkkinen q-virran kanssa. Nopeus käännetään kymmenestä prosentista yhtäsuureksi ja vastakkaismerkkiseksi kahdenkymmenen sekunnin simuloinnin aikana. Ensimmäinen suunnanvaihdon simulointi on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14: Suunnanvaihto ilman adaptointia. Ylhäältä alaspäin luettuna nopeuden p.u.-arvo, kulmavirheasteina ja havaittajavahvistus.

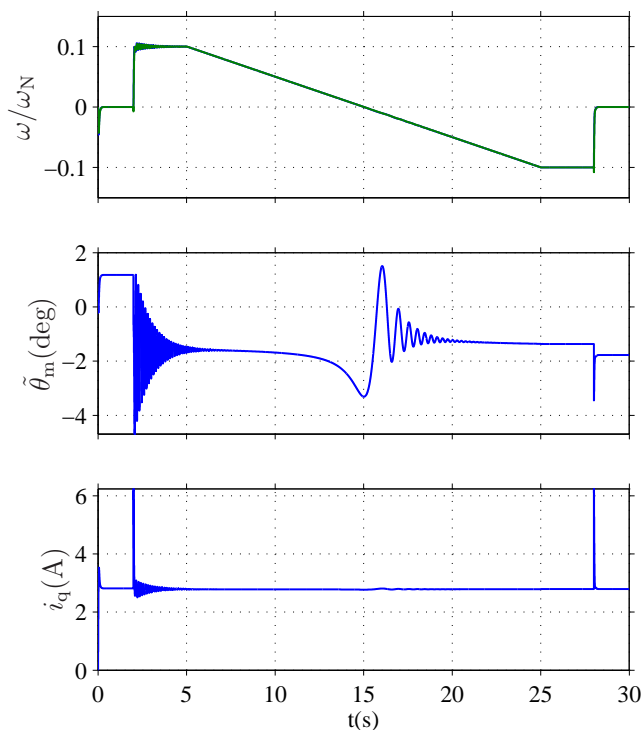
Kuvassa 14 havaittaja suoriutuu suunnanvaihdosta hyvin ilman adaptointia tarkalla staattoriresistanssin estimaatilla. Vaikka suunnanvaihtoa hidastaa, kulmavirhe ei kasva suuremmaksi.



Kuva 15: Suunnanvaihto adaptoinnin kanssa. Alimpana resistanssin estimaatin ja todellisen resistanssin suhde.

Kuvasta 15 nähdään, että adaptoinnin lisääminen ei ainakaan merkittävästi huononna havaitsijan dynamiikkaa. Kulmavirhe käyttäytyy eri tavalla, mutta pysyy molemmissa tapauksissa likipitään yhtäsuurena. Käytännössä staattoriresistanssi muuttuu jatkuvasti, jolloin tilanne kääntyy adaptoinnin eduksi pienelläkin estimaatin virheellä. Resistanssin estimaatissa on havaittavissa likipitään lineaarinen muutos, joka johtuu induktanssien virheellisyydestä. Simulointiaikaa pidennettäessä estimaatti löytää kuitenkin pysyvän tilan arvonsa.

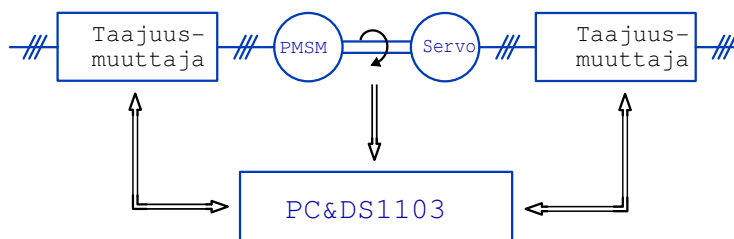
Vertaillaan suorituskykyä vielä kokonaan toisentyyppiseen havaitsijaan. Verrokkina toimii yhtälöissä (18) ja (17) esitelty havaitsija. Sama suunnanvaihto simuloituna tälle havaitsijalle on esitetty kuvassa 16. Simuloinnissa kaikki parametrivirheet ovat samat kuin kahdessa aikaisemmassa simuloinnissa. Viritysparametri on optimoitu haarukoimalla siten, että kulmavirheen itseisarvo pysyy läpi simuloinnin mahdollisimman pienenä. Näiden simulointien perusteella ehdotettu havaitsija suoriutuu kyseisestä sekvenssistä verrokkiaan paremmin.



Kuva 16: Suunnanvaihto vertailtavalle havaitsijalle. Kuvassa on esitetty nopeuden ja kulmavirheen lisäksi virran q-komponentti.

6 Laboratoriomittaukset

6.1 Laitteisto

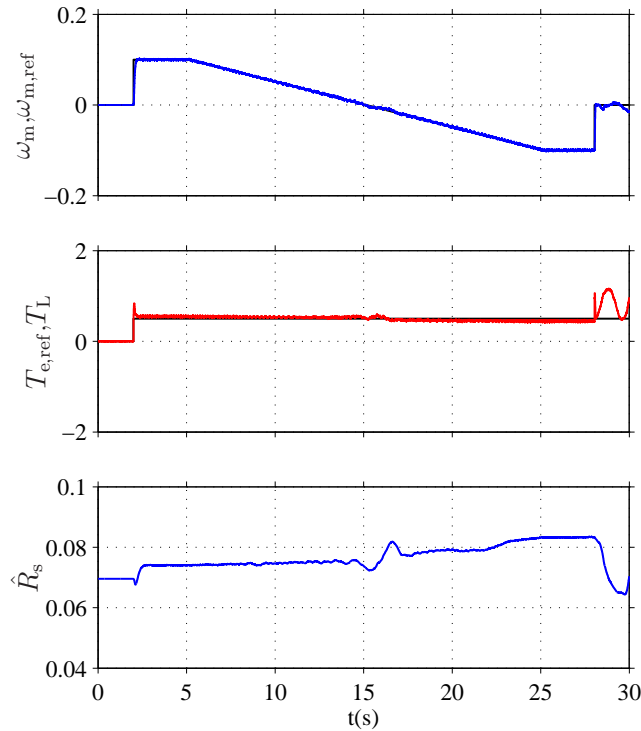


Kuva 17: Mittausjärjestely

Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 17. Mittauksissa käytetyn kuusinapaisen keskomagneettitahtimoottorin nimelliarvot ja mitatut parametrit ovat esitetty taulukossa 1. Moottoria syötetään taajuusmuuttajalla, jota ohjataan dSPACE DS1103 PPC/DSP laitteistolla. Kuormamomentti saadaan aikaan servokäytöllä, jossa on myös keskomagneettitahtimoottori. Todellisen roottorin kulmanopeuden määrittämiseen käytetään akselille kiinnitettyä enkooderia. Taajuusmuuttajan nimellinen välipiirijännite on 540 V. Kytkenätaajuus ja näytteenottotaajuus ovat 5 kHz.

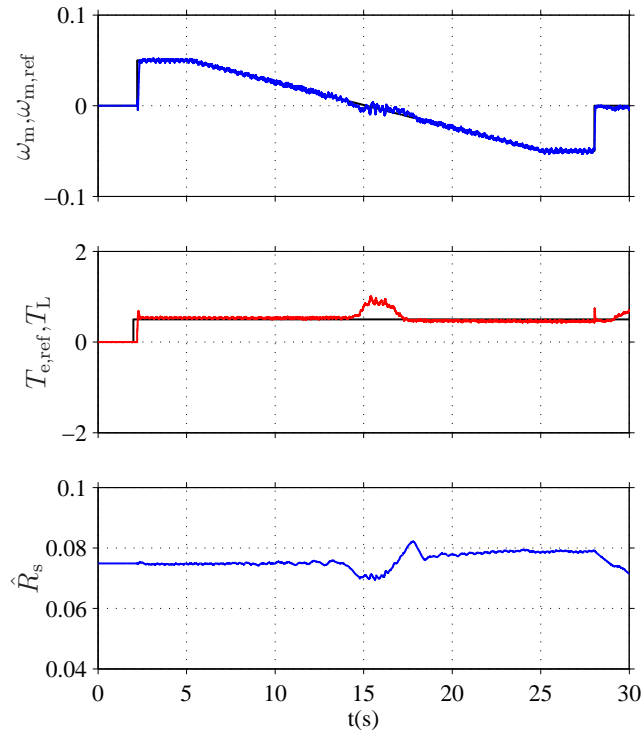
6.2 Mittaukset

Laboratoriomittauksissa ei ole tarkoitus yrittää hakea stabiilisuusrajoja kuten simuloinneissa, vaan osoittaa havaitsija käytännössä toimivaksi. Kaikki arvot ovat suhteellisarvoja. Mitataan aluksi sama suunnanvaihtosekvenssi kuin kuvan 15 simuloinnissa. Kiihdytyksen jälkeen nopeus muutetaan 20 sekunnin aikana kymmenestä prosentista yhtäsuureksi mutta vastakkaismerkkiseksi. Kuorma on puolet nimelliskuormasta.



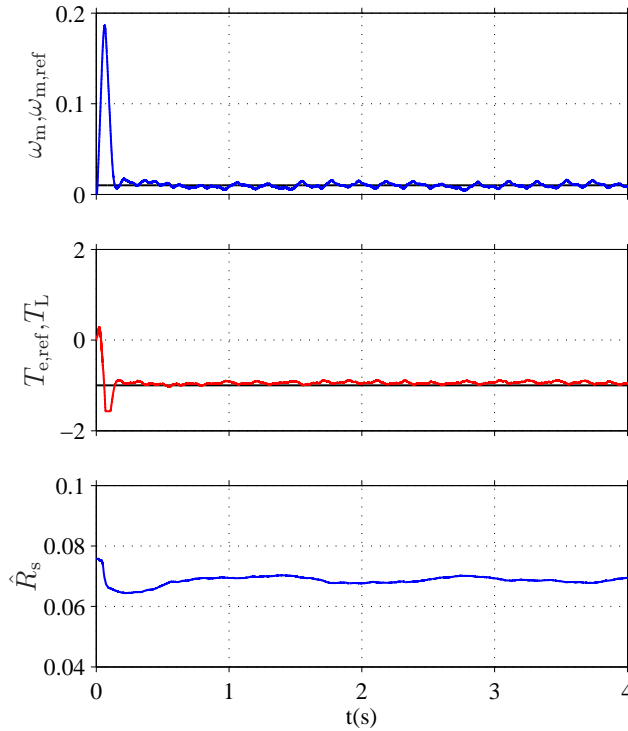
Kuva 18: Suunnanvaihto nopeudella 0,1 pu. Mittaustuloksissa on esitetty ylimpänä nopeusohje ja mitattu nopeus p.u.-arvona, keskellä nopeussäädöltä tuleva momenttiohje ja kuormamomentti p.u.-arvoina ja alimpana resistanssin estimaatin absoluuttinen arvo.

Käyttö selviää suunnanvaihdosta kunnialla, lukuunottamatta pientä värähtelyä nol-lanopeuden ympäristössä. Lisäksi simuloinnin loppupäässä, kun käyttö on pysähdyksissä, kulmatieto luonnollisesti menetetään ja tämä aiheuttaa epästabiilia käyttäytymistä. Kuvasta havaitaan, että resistanssin estimaatti käyttäytyy arveluttavalla tavalla hetkellä $t = 15$ s, kun nopeus on riittävän lähellä nollaa. Tämä voitaisiin välttää kytkemällä resistanssin adaptointi pois sopivaa raja-arvoa pienemmillä nopeuksilla. Tällöin todennäköisesti koko havaitsijan suorituskyky paranisi pienillä nopeuksilla. Resistanssin estimaatissa on havaittavissa samanlaista käyttäytymistä kuin simuloinnissa. Tätä selittänee virheelliset L_d ja L_q -induktanssien arvot. Käytön selvittyä edellisestä sekvenssistä, halusin demonstroida haasteellisemmän suunnanvaihdon vielä puolta pienemmällä nopeudella. Tämä on esitetty kuvassa 19



Kuva 19: Suunnanvaihto nopeudella 0,05 pu

Kuvasta nähdään, että aletaan liikkua jo stabiilisuuden rajoilla, mutta niin sanottua kippausilmiötä ei ajon aikana esiintynyt. Havaintsijan toimivuutta pienillä nopeuksilla on havainnollistettu nimelliskuormalla ja prosentien nimellisnopeudella kuvassa 20.



Kuva 20: 0,01 pu nopeus nimelliskuormalla

Käyttö pysyy stabiilina värähtelystä huolimatta. Värähtelyssä erityisesti kuudes yliaalto on helposti havaittavissa. Resistanssin adaptointi vaikuttaa myös toimivan, mutta olisi syytä käyttää pienempää vahvistusta näin pienillä nopeuksilla estimaatin huojumisen pienentämiseksi.

7 Johtopäätökset

Kestomagneettitahtimoottorin kulman estimointiin käytettävän havaitsijan stabiilisuusehtoja ei tavallisesti tunneta. Havaitsijan virittäminen on myös usein vaikea tehtävä, koska viritysparametreja voi olla useita, sekä käytön toimintapiste vaikuttaa parametrien valintaan.

Työssä muodostettiin yksinkertainen tahtikoordinaatistossa toimiva havaitsija, jonka kertaluvuksi tuli yksi ja viritysparametreja valittavana vain yksi. Kulmaestimaattorin rinnalle lisättiin myös dynamiikaltaan yksinkertainen resistanssin adaptointi. Stabiilisuusehdot ratkaistiin linearisoidun mallin avulla kulmaestimaattorin havaitsijavahvistukselle ensin ja tämän jälkeen resistanssin adaptoinnille. Resistanssin adaptoinnissa viritettävät parametrit olivat erotettavissa d- ja q-virran suuntaisiksi vahvistuksiksi, jolloin pienillä d-virran arvoilla on syytä valita d-suuntainen vahvistus nolllaksi.

Stabiilisuusehtoja tutkittiin tutkittiin Matlabin Simulinkillä ja verrattiin analyttisesti saatuihin. Simuloiden ja analyttisesti saadut rajat kuitenkin erosivat hieman

toisistaan, koska analyysi tehtiin jatkuva-aikaisena ja simulointimallin säätö oli digitaalinen. Näytteenottovälin pienentäminen ei myöskään pienentänyt loputtomiin eroa simuloiden ja analyytisesti saatujen ehtojen välillä, koska näytteenottoväliä pienennettäessä syntyi kohinaa, joka johtuu havaitsijan yhtälöissä esiintyvistä virran aikaderivaatoista. Simuloimalla testattiin myös havaitsijan suorituskykyä pienillä nopeuksilla hitaassa suunnanvaihdossa. Vertailun vuoksi sama suunnanvaihto tehtiin täysin toisentyyppiselle havaitsijalle.

Havaitsijan toimivuutta käytännössä kokeiltiin laboratoriossa. Käyttö suoriutui samoista suunnanvaihtosekvensseistä mitkä tehtiin simuloimalla. Lopuksi käyttöä pyöritettiin onnistuneesti nimelliskuormalla yhden prosentin nopeudella nimellisestä. Laboratoriokokeet vaikuttivat erittäin lupaavalta, mutta kokeissa käytetty prototyyppimoottori ei kyllästy kovinkaan voimakkaasti, jolloin välttyttiin ei-toivotuilta kyllästysilmiöiltä, joita ei havaitsijan rakenteessa ole otettu huomioon.

Vahvistuksille saadut stabiilisuusehdot ratkesivat yksikäsitteisesti. Vahvistusten sopiva valinta stabiilisuuden takaamiseksi riippuu lopulta käytön kvadrantista, jossa toimintapiste kulloinkin on. Vahvistusten sopiva valinta osoittautui suhteellisen helppoksi, koska kaikki vahvistukset olivat suoraan suhteellisarvoja. Vahvistusten etumerkin tulee tarvittaessa muuttua siirryttäessä kvadrantista toiseen.

Havaitsija osoittautui erittäin toimivaksi myös pienillä nopeuksilla. Tämän vuoksi havaitsija voisi olla perusaaltomallina käyttökelpoinen liikeanturittomille pintamagneettimoottorikäyttöille, joiden suorituskykyä ei voida parantaa signaaliinjektiomenetelmillä. Havaitsija on helppo toteuttaa yksinkertaisuutensa vuoksi, eikä se vaadi suurta laskentatehoa moottorisäädön laitteistolta.

Koska havaitsijan tuottaman kulmaestimaatin tarkkuus on riippuvainen malliin syötettyjen parametrien tarkkuudesta, voitaisiin havaitsijan suorituskykyä parantaa lisäämällä siihen kyllästysmalli, joka ottaisi huomioon induktanssien muuttumisen virran funktiona. Simuloinneissa ja laboratoriokokeissa havaitsijavahvistusten arvot pidettiin vakiona läpi sekvenssien. Kulman estimoinnin vahvistusta muuttamalla pyörimisnopeuden funktiona sopivalla tavalla voitaisiin käytön dynamiikkaa parantaa. Vaikka dynaamisten muutosilmiöiden yksikäsitteinen selvittäminen analyytisesti on käytännössä mahdotonta, havaitsijan stabiilisuutta voisi myös yrittää selvittää laajemmin erilaisissa kuormitussekvensseissä, koska saadut stabiilisuusehdot eivät ota mitään kantaa nopeisiin toimintapisteen muutostilanteisiin.

Lähdeluettelo

- Consoli, A., Musumeci, S., Raciti, A. ja Testa, A. (1994). Sensorless vector and speed control of brushless motor drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 41(1):91–96.
- Eskola, M. ja Tuusa, H. (2003). Comparison of mras and novel simple method for position estimation in pmsm drives. In *Proc. IEEE PESC'03*, volume 2, pages 550–555, Acapulco, Mexico.
- Franklin, G. F., Powel, J. D. ja Abbas, E. (2002). *Feedback control of dynamic systems*. Prentice-Hall, Upper Saddle river, New Jersey.
- Harnefors, L. (2003). *Control of Variable-Speed Drives*. Applied Signal Processing and Control, Department of Electronics, Mälardalen University, Västerås, Sweden.
- Harnefors, L., Jansson, M., Ottersten, R. ja Pietiläinen, K. (2003). Unified sensorless vector control of synchronous and induction motors. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 50(1):153–160.
- Jansson, M., Harnefors, L., Wallmark, O. ja Leksell, M. (2006). Synchronization at startup and stable rotation reversal of sensorless nonsalient pmsm drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 53(2):379–387.
- Koonlaboon, S. ja Sangwongwanich, S. (2005). Sensorless control of interior permanent-magnet synchronous motors based on a fictitious permanent-magnet flux model. In *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, volume 1, pages 311–318, Hong Kong.
- Kumar, R., Singh, N., Singh, J. ja Padmanaban, S. (2006). A nonlinear reduced order observer for rotor position estimation of sensorless permanent magnet brushless dc motor drive. In *Proc. IEEE IECON'06*, pages 235 – 240, Paris, France.
- Kyyrä, J. (2007). *Suuntaajatekniikka*. Power electronics, Department of Electronics, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.
- Piippo, A. (2008). *An adaptive observer with signal injection for interior permanent magnet synchronous motors*. Doctoral thesis, Dept. Elect. Commun. Eng., Helsinki Univ. Tech., Espoo, Finland.
- Piippo, A., Hinkkanen, M. ja Luomi, J. (2004). Sensorless control of PMSM drives using a combination of voltage model and HF signal injection. In *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, volume 2, pages 964–970, Seattle, WA.