



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

**TAAJUUSMUUTTAJAOHJATTU KESTOMAGNEETTI-
TAHTIKONE
OPETUSLABORATORIOKÄYTÖSSÄ**

**Frequency Converter Controlled Permanent Magnet
Synchronous Machine in Teaching Laboratory Use**

Teppo Vuorio

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Teppo Vuorio

Taajuusmuuttajaohjattu kestopagneettitahtikone opetuslaboratoriokäytössä

2013

Kandidaatintyö.

31 sivua, 16 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila

Kestomagneettien kehittyminen on mahdollistanut sähkökoneen rakentamisen perinteisistä menetelmistä poiketen ja on samalla luonut uudenlaisia ominaisuuksia ja käyttökohteita. Erityisesti kestopagneettitahtikone (PMSM) on kasvattanut suosiota hyvän hyötysuhteen ja luotettavuuden myötä.

Työssä esitellään kestopagneettitahtikonetta sen rakenteen ja toimintaperiaatteen avulla. Tarkastellaan kestopagneettien kehitystä ja tulevaisuuden näkymiä. Perehdytään myös taajuusmuuttajaan, mitä käytetään yleensä kestopagneettitahtikoneen ohjaukseen. Lisäksi esitetään taajuusmuuttajan erilaisia säätötapoja.

Työn kokeellisessa osuudessa yliopiston opetuslaboratorioon kehitetään koneikko, jonka avulla tutkitaan kestopagneettitahtikoneen toimintaan osana sähkökäyttöä. Työn tavoitteena on selvittää PMSM:n ominaisuuksia sekä suunnitella sähkötekniikan työkurssille soveltuva mittaussarja, mikä johdattaa opiskelijat tässä työssä käsiteltyihin aihealueisiin.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Electrical Engineering

Teppo Vuorio

Frequency Converter Controlled Permanent Magnet Synchronous Machine in Teaching Laboratory Use

2013

Bachelor's Thesis.
31 pages, 16 figures and 1 table

Examiner: Associate Professor Lasse Laurila

The development of permanent magnets has made possible the construction of an electrical machine unlike traditional methods creating new characteristics and applications for electrical machine. In particular, the permanent magnet synchronous machine (PMSM) has become more popular due to its high efficiency and reliability.

This thesis introduces the permanent magnet synchronous machine by exploring its structure and operation principle. Permanent magnets development and future prospects are considered. In addition, frequency converter is explored in detail, which is typically used to control the permanent magnet synchronous machine. Moreover, here is shown different kinds of control methods for frequency converter.

In practical part of this thesis is developed machinery to the university's teaching laboratory, to test PMSM as a part of the electrical drive. The goal in this thesis is to study characteristics of the PMSM and design suitable measurement series to the laboratory course of electrical engineering, which will guide students to explore the topics of this thesis.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|----|
| Käytetyt merkinnät ja lyhenteet | 5 |
| 1. JOHDANTO | 7 |
| 2. KESTOMAGNEETTITAHTIKONE..... | 8 |
| 2.1 Kestomagneettitahtikoneen toimintaperiaate | 8 |
| 2.2 Kestomagneettitahtikoneen rakenne..... | 9 |
| 2.3 Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentti | 11 |
| 2.4 Kestomagneettien kehitys..... | 11 |
| 2.5 Kestomagneettien tulevaisuuden näkymät..... | 12 |
| 3. TAAJUUSMUUTTAJA | 14 |
| 3.1 Taajuusmuuttajatyypit..... | 14 |
| 3.2 Taajuusmuuttajan ja sähkömoottorin yhteistoiminta | 14 |
| 3.3 Taajuusmuuttajan rakenne ja toimintaperiaate..... | 15 |
| 3.4 Taajuusmuuttajan säätötavat | 16 |
| 3.4.1 Skalaariohjaus ja -säätö | 16 |
| 3.4.2 Vektorisäätö | 18 |
| 3.4.3 Suora vääntömomenttisäätö | 19 |
| 4. MITTALAITTEISTO | 20 |
| 4.1 Käytettävä kestopagneettitahtikone | 21 |
| 4.1.1 Takaisinkytkentälaitte | 21 |
| 4.2 Käytettävä taajuusmuuttaja..... | 21 |
| 4.3 Käytettävä verkkovaihtosuuntaaja | 22 |
| 4.4 DATAFLEX- vääntömomenttianturi ja DF2- liitäntäkotelo..... | 23 |
| 5. MITTAUKSET JA MITTAUSTULOKSET | 24 |
| 5.1 Koneikon käyttöönotto | 25 |
| 5.2 Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentti | 25 |
| 5.3 Vääntömomenttiarvojen vertailu..... | 26 |
| 5.4 Momenttivaste skalaari- ja DTC-säädöillä | 27 |
| 5.5 Paikkasäätö | 28 |
| 6. JOHTOPÄÄTÖKSET | 29 |
| 7. YHTEENVETO | 29 |
| LÄHTEET | 30 |

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

| | |
|--------|---|
| AC | Alternating Current, vaihtovirta |
| DC | Direct Current, tasavirta |
| DTC | Direct Torque Control, suora vääntömomenttisäätö |
| FET | Field-effect Transistor, kanavatransistori |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor, eristehilabipolaaritransistori |
| MOSFET | Metal-oxide Semiconductor Field-effect Transistor, metallioksidikanavatransistori |
| PM | Permanent Magnet, kestopagneetti |
| PMSM | Permanent Magnet Synchronous Machine, kestopagneettitahtikone |
| PWM | Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio |
| SVM | Space Vector Modulation, avaruusvektorimodulaatio |

| | |
|------------------|------------------|
| E | jännite |
| f | taajuus |
| i | virta |
| L | induktanssi |
| n | pyörimisnopeus |
| P | teho |
| p | napapariluku |
| T | vääntömomentti |
| U | jännite |
| V | jännite |
| Ψ | käämivuo |
| $\cos \emptyset$ | tehokerroin |
| μ | permeabiliteetti |
| τ | aikavakio |
| ω | kulmanopeus |

Alaindeksit

| | |
|-----|--|
| d | direct, pitkittäinen |
| D | direct damping, pitkittäinen vaimennus komponentti |
| e | electric, sähköinen |
| m | magnetizing, magnetointi-, esim.virta |
| n | nominal, nimellinen |
| r | rotor, roottori |
| rms | root-mean-square, tehollisarvon kuvaus |

| | |
|----------|--|
| p | peak, huippu |
| PM | permanent magnet, kestmagneetti |
| Q | quadrature damping, poikittainen vaimennus komponentti |
| q | quadrature, poikittainen |
| s | stator, staattori |
| σ | stator leakage, staattorin haja-, esim.induktanssi |

1. JOHDANTO

Kestomagneettien kehitys on viime vuosikymmeninä johtanut uusien sovelluksien synty-miseen ja sovelluskohteiden kasvuun. Sähkökoneiden keskuudessa kestopagneetit ovat mahdollistaneet synkronikoneen rakentamisen perinteisistä menetelmistä poiketen. Erityi-sesti kestopagneettitahtikoneet (PMSM) ovat saavuttaneet suosiota luotettavuuden ja hyvän hyötysuhteen myötä sekä ominaisuudella tuottaa suurta vääntömomenttia myös pienillä pyörimisnopeuksilla. Nämä ominaisuudet ovat lisänneet kestopagneettitahtikonei-den sovellusmahdollisuuksia esimerkiksi hitaissa käytöissä, kuten työkonneissa ja tuulivoi-maloissa.

Tehoelektroniikan kehitys on vaikuttanut suoraan taajuusmuuttajien ominaisuuksien para-nemiseen sekä mahdollistanut niiden käyttämisen yhä useammassa sovelluksessa. Esi-merkiksi kestopagneettitahtikoneen tehokkaaseen ja yksinkertaiseen säätöön tarvitaan taajuusmuuttaja, millä vaikutetaan koneen pyörimisnopeuteen tai vääntömomenttiin. Li-säksi säätöön on kehitetty useita erilaisia menetelmiä, mistä yleisempiä ovat skalaari-, vektori- ja suora vääntömomenttisäätö (DTC).

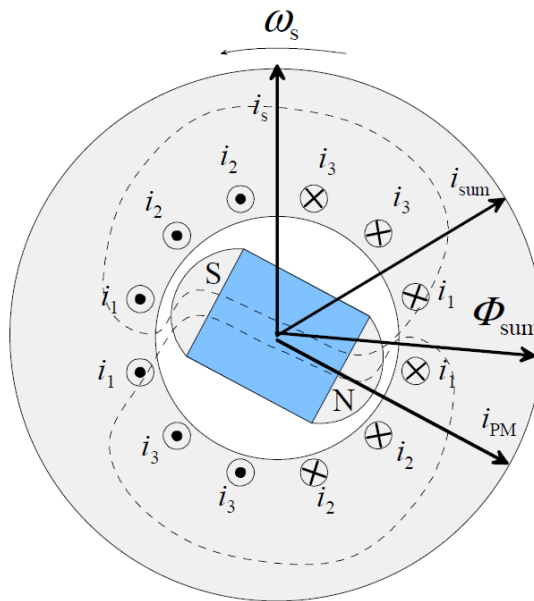
Kandidaatintyössä kehitetään yliopiston opetuslaboratorioon mittausjärjestelmä, missä kestopagneettitahtikoneetta säädetään taajuusmuuttajalla. Työn tavoitteena on tutustua kestopagneettitahtikoneen ominaisuuksiin rakennetun koneikon avulla. Tutkitaan kesto-magneettitahtikoneen vääntömomenttia, momenttivasteita sekä paikkasäätöä. Lisäksi tavoitteena on luoda laboratoriotyö, jonka suorittavat opiskelijat tutustuvat tässä työssä esiteltyihin aihealueisiin.

2. KESTOMAGNEETTITAHTIKONE

Kestomagneettitahtikone on synkronikone, missä roottorin käämitykset on korvattu kestomagneetein. Tällä tavoin magnetointi on pysyvää eikä erillistä magnetointivirtaa tarvitse syöttää roottoriin magnetointikämmityksiin, kuten yleensä tahtikoneissa. Näin ollen koneen hyötysuhde paranee, koska magnetointivirran aiheuttamaa lämpöhäviötä ei synny. Lisäksi hiiliharjojen käyttöä ei enää tarvita, mikä vähentää huoltokustannuksia ja lisää koneen luotettavuutta. (Rilla 2006)

2.1 Kestomagneettitahtikoneen toimintaperiaate

Kestomagneettitahtikoneissa, kuten muissakin tahtikoneissa, roottori pyörii koneen sisäisen magneettikentän ja silloin myös syöttävän verkon kanssa tarkalleen samalla nopeudella eli tahtinopeudella. Staattorin kolmivaihekäämitys synnyttää pyörivän magneettikentän. Roottorissa olevat kestomagneetit pyrkivät vallitsevan magneettikentän suuntaiseksi, minkä vuoksi roottori alkaa pyöriä staattorin magneettikentässä magnetomotorisen voiman vaikutuksesta. Toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 1.

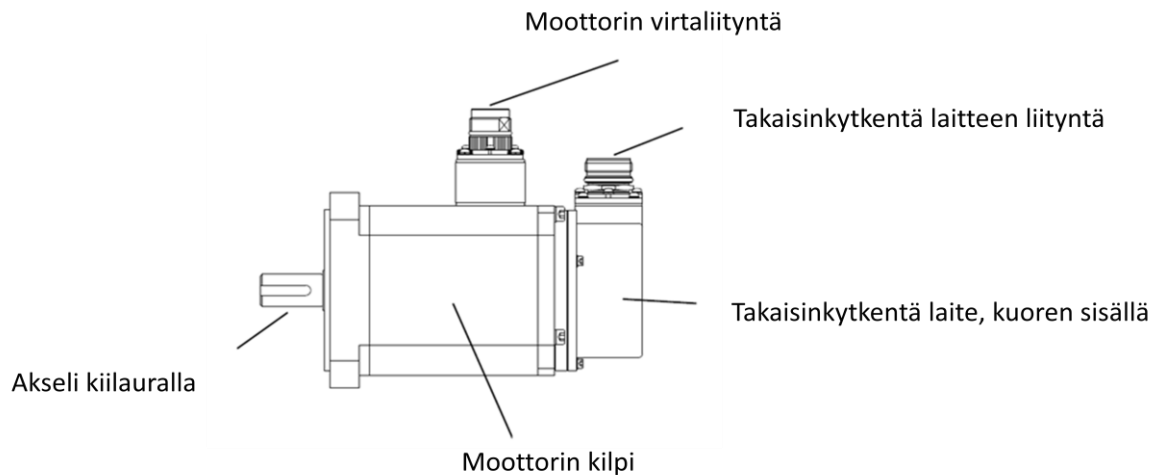


Kuva 1 Avonapaisen kolmivaiheisen kestomagneettitahtikoneen toimintaperiaate, missä piste tarkoittaa virran suunnan olevan kuvan tasosta kohtisuoraan ylöspäin ja risti kuvan tasosta suoraan alaspäin. Roottorin pyörimissuuntaa kuvaa muuttuja ω_s . Roottorin magneettiset navat on kuvattu muuttujilla S (South) ja N (North). (Pyrhönen 2006)

Kestomagneettitahtikoneen toiminta generaattorina on hyvin yksinkertainen. Koska roottori on varustettu kestomagneetein, indusoi pyörivä roottori staattoriin napajännitteen E_{PM} . Vastäsähkömotorinen jännite indusoituu myös koneen toimiessa moottorina, ja esimerkiksi kytkettynä taajuusmuuttajaan, syöttää moottori pyöriessään siihen jatkuvasti tehoa.

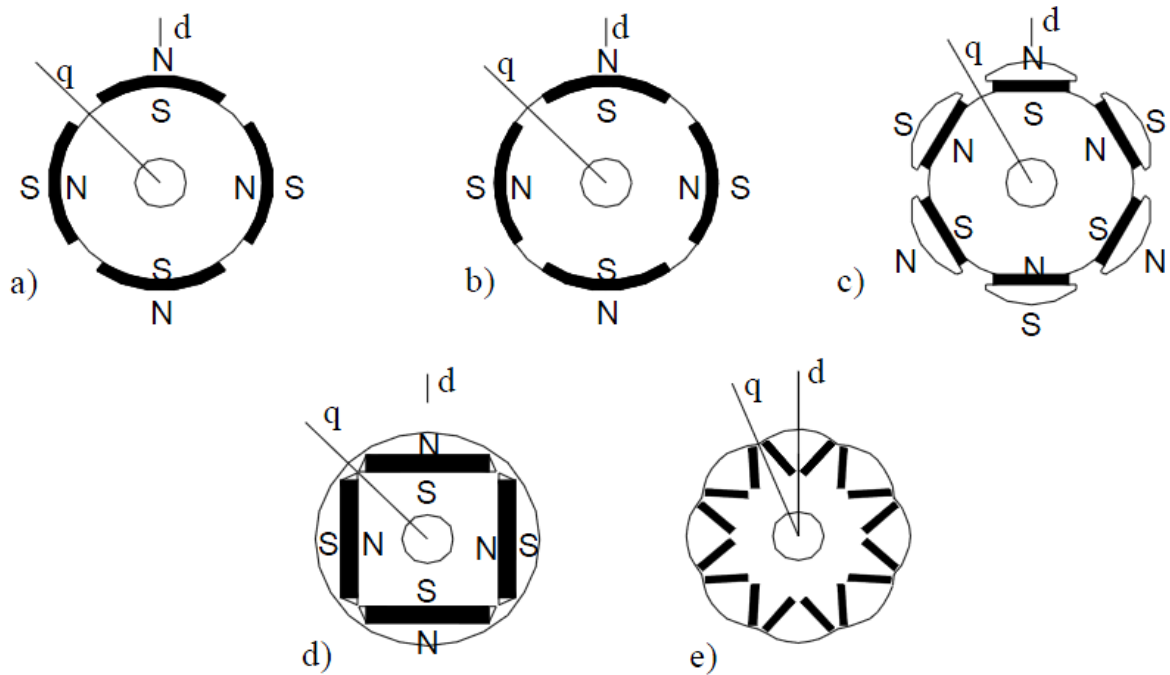
2.2 Kestomagneettitahtikoneen rakenne

Kestomagneettitahtikoneen staattori on rakenteeltaan samanlainen kuin muissakin tahtikoneissa. Staattorikäänitys on monivaiheinen ja se käämitään yleensä tavallisen vieras-magnetoidun tahtikoneen tapaisesti kolmivaiheisesti (Leppä 2001). Käänitys on usein symmetrinen ja se kytketään joko kolmioon tai tähteen. Kuvassa 2 on esitelty työssä käytettävän kestomagneettitahtikoneen rakennetta.



Kuva 2 Kestomagneettitahtikoneen rakenne. (ABB 2007)

Kestomagneettitahtikoneen rakenne on yksinkertainen, johtuen roottorin rakenteesta, mikä voi koostua jopa pelkästään kestomagneeteista. Yleisimmin kestomagneetit ovat kuitenkin asetettu rautaan joko upottamalla tai liimaamalla roottorin pinnalle. Magneettien asettelulla on tärkeä rooli koneen suunnittelussa, koska asettelulla voidaan vaikuttaa huomattavasti koneen ominaisuuksiin. Kuvassa 3 on esitetty erilaisia kestomagneettikoneiden roottorirakenteita. (Pyrhönen 2008)



Kuva 3 Kestomagneetikoneiden roottorirakenteita, missä kestopagneetit on sijoitettu roottoriin erilaisin tavoin. a) kestopagneetit on sijoitettu roottorin pinnalle, b) magneetit on upotettu aivan roottorin pinnalle, d) napakenkäroottori, c) tangentialisesti upotetut magneetit, e) kaksi magneettia napaa kohti. (Pyrhönen 2008)

Jos kestopagneetit asetetaan roottorin pinnalle, vastaa rakenne umpinapaisen tahtikoneen rakennetta, koska efektiivinen ilmväli on lähes yhtä suuri koko kehän pituudelta (Leppä 2001). Efektiivinen ilmväli on huomattavan suuri, koska kestopagneettien suhteellinen permeabiliteetti vastaa ilman suhteellista permeabiliteettia, esimerkiksi NdFeB-kestopagneeteilla $\mu_r = 1,04 - 1,05$. Toisaalta tällaisella rakenteella magneettiseen tilaan vaikuttaminen on vaikeaa, koska suuren ilmvälin johdosta magnetoitumisinduktanssi on pieni. (Pyrhönen 2008)

Magneettien upottaminen sen sijaan aiheuttaa väistämättä induktanssieron, poikittainen tahti-induktanssi on suurempi kuin pitkittäinen. Myös napakenkä rakenne aiheuttaa samanlaisen induktanssisuhteen. Toisaalta induktanssiero synnyttää koneeseen reluktanssi-vääntömomenttia. (Pyrhönen 2008)

Sijoittamalla magneettinen materiaali koneen sisälle hukataan merkittävä osa magneeteilla tuotetusta vuosta, tyypillisesti neljäsosa. Näin ollen magneettiset materiaalit hyödynnetään parhaiten pinnalle asennettavissa koneissa. Toisaalta sijoittamalla magneetit koneen sisälle, ovat magneetit suojassa sekä mekaanisesti että magneettisesti. Ilmvälivuontihe-

yttä voidaan kasvattaa uppoasennuksessa sijoittamalla kaksi magneettia napaa kohden. Toisaalta tämä lisää tarvittavan magneettimateriaalin määrää ja kasvattaa koneen kustannuksia. (Pyrhönen 2008)

Kestomagneetteja käytettäessä haittapuolena on se, että roottorin magneettikenttään ei pystytä vaikuttamaan, koska käytössä on kiinteä magneettikenttä. Tämä hankaloittaa mahdollisuutta päästä kentänheikennysalueelle.

2.3 Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentti

Kestomagneettitahtikoneen vääntöä ohjataan ristikenttäperiaatteen mukaisesti

$$T = \Psi_S \times i_S, \quad (1)$$

missä i_S on staattorivirtavektori ja Ψ_S on staattorikämmivuovektori. Yhtälö (1) voidaan esittää myös sähköisenä vääntömomenttina

$$T_e = \frac{3}{2} p \Psi_S \times i_S, \quad (2)$$

missä p on moottorin napapariluku. Yhtälö (2) esitetään yleensä roottorin magnetointikämmitykseen kiinnitettyssä kaksiakselikoordinaatistossa

$$T_e = \frac{3}{2} p [\Psi_{PM} i_{sq} - (L_{mq} - L_{md}) i_{sd} i_{sq} + L_{md} i_D i_{sq} + L_{mq} i_Q i_{sd}]. \quad (3)$$

Yhtälöstä (3) nähdään, että vääntömomentti muodostuu neljästä termistä perustuen ristikenttäperiaatteeeseen. Ensimmäinen termi on näistä tärkein, ja se on useissa kestopagneettikoneissa ainoa termi, joka riippuu kestopagneettien kämmivuosta ja sitä kohtisuoraan olevasta staattorivirrasta. Seuraava termi muodostuu induktanssierosta ja on merkittävä monissa koneissa, missä on suuri ero d- ja q-akselin induktansseissa. Termit, jotka riippuvat vaimennusvirroista ovat merkittäviä vain transienttitaloissa ja koneissa, missä vaimennusvirtoja voi syntyä. Vääntömomentti yhtälöä käytetään usein lähtökohtana erilaisten kestopagneettikoneiden säädön suunnittelussa. (Pyrhönen 2009)

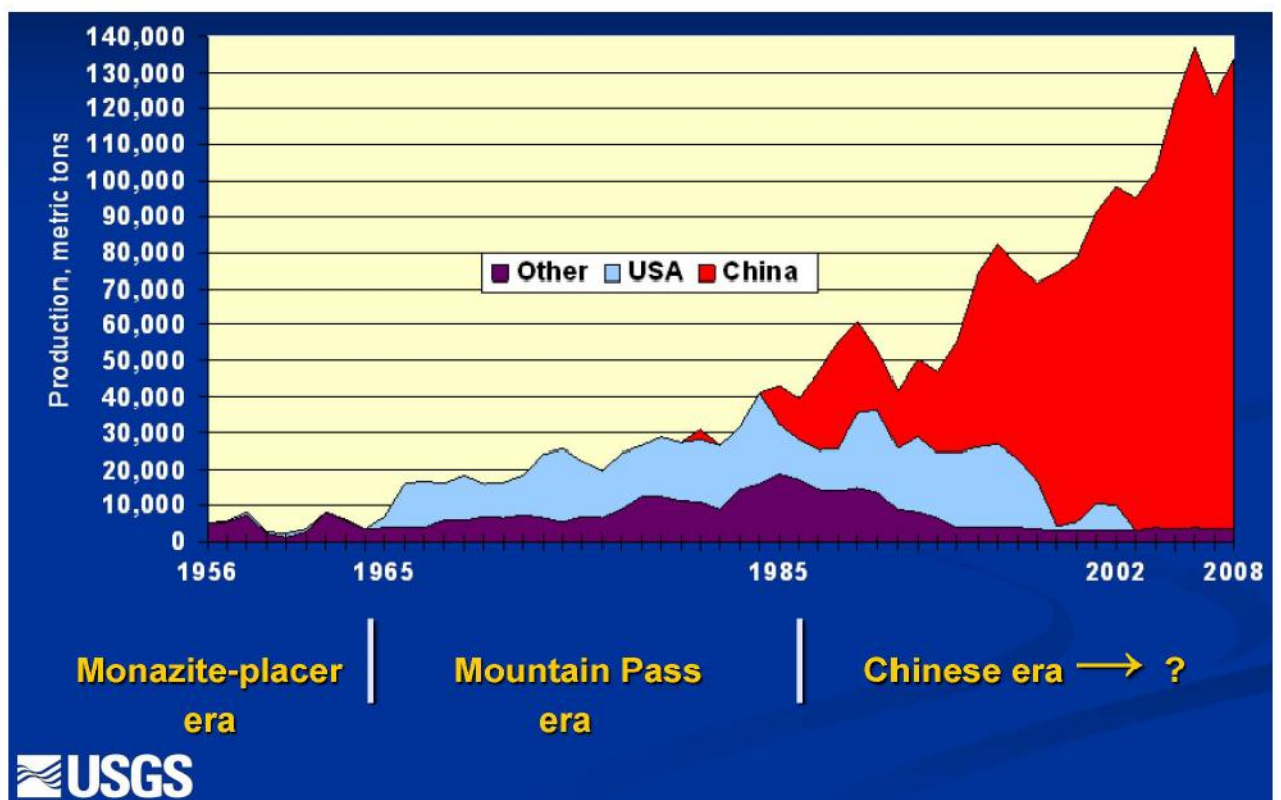
2.4 Kestomagneettien kehitys

Kestomagneettien kehitys alkoi 1900-luvulta, jolloin kestopagneettimateriaaleina käytettiin hiilikoboltti-, wolframi- ja kromiterästä, jotka pysyivät kymmeniä vuosia ainoana kestopagneettimateriaaleina. 1930-luvulla keksittiin AlNi- ja AlNiCo-materiaalit, jotka toivat parannuksen olemassa oleviin materiaaleihin. Seuraava edistysaskel saavutettiin 1960-luvulla,

kun harvinaisten maametallien ja koboltin yhdisteet keksittiin. Tämän jälkeen saavutettiin merkittävin keksintö, neodyymi-rauta-boori-kestomagneetti (NdFeB), joka on tälläkin hetkellä voimakkain magneettityyppi, jolla saavutetaan korkein energiatulo. (Pyrhönen 1992)

2.5 Kestomagneettien tulevaisuuden näkymät

Kestomagneettien tulevaisuuden näkymät ovat riippuvaisia niiden valmistamiseen tarvittavista harvinaisista maametalleista. Kiinalla on dominoiva rooli harvinaisten maametallien tuotannossa, sillä se valmistaa noin 95 % koko maailman tuotannosta. Kuva 4 havainnollistaa harvinaisten maametallien tuotannon aikakausia. (Tse 2011)



Kuva 4 Harvinaisten maametallien ajanjaksoja maailmassa. Vasemmalta oikealle monaziittikausi (1800-1865), Mountain Pass-kausi (1865-1980), välikausi (1980-1990) ja kiinalainen aikakausi (1990-). (Tse 2011)

Kiinan päätös rajoittaa vientiä on aiheuttanut huolta harvinaisten maametallien saannista tulevaisuudessa. Viennin säännöstely on aiheuttanut muissa teollisuusmaissa, kuten Japanissa, Yhdysvalloissa ja Euroopassa korkeampia hintoja sekä toimitusongelmia. Viennin säännöstelyn syynä ovat Kiinan mukaan ympäristönsuojeluinvestoinnit. (Nurmi 2011) Kiinan markkina-asema on niin merkittävä, että kilpaileminen sitä vastaan on hankalaa. Esimerkiksi Yhdysvaltojen Mountain Pass -kaivos oli suljettava kilpailukyvyttömyyden vuoksi. Lisäksi uusien kaivosten käyttöönotto on hidasta sekä jalostusprosessi on moni-

mutkainen ja energiaa kuluttavaa. Esimerkiksi Venäjältä löytyisi harvinaisia maametalli-esiintymiä, mutta jalostusosaamista ei ole kylliksi. (Nurmi 2011)

Kiina julisti epävirallisen vientikiellon Japaniin vuonna 2010. Tämän seurauksena Japani ja Yhdysvallat yhdistivät voimansa samana vuonna. Yhdysvallat avasi uudelleen Mountain Pass -kaivoksen. Japanilainen kumppani Hitachi Metals tukee kaivostoimintaa tarvittavassa jalostusteknologiassa ja valmistuslisenssillä. Pyrkimyksenä on tuottaa vuoteen 2012 mennessä 20 000 tonnia harvinaisia maametalleja ja myydä ylijäämä Japanin ja Euroopan markkinoille. (Nurmi 2011)

Harvinaisten maametallien hinnan kehitys on vaihdellut eri aikakausilla. Kiinan tultua mukaan markkinoille vuonna 1990 hinta putosi. 2000-luvulla sen sijaan hinta tasaantui ja jo vuonna 2003 lähti nousuun. Tämä trendi on jatkunut saatavuudesta ja Kiinan markkina-asemasta johtuen. Näin ollen myös kestopagneettien hinnan kehitys on ollut nousujohteista. Kestomagneettien osuus maametallien loppukäytöstä on vain noin 7 %, mutta määrän uskotaan kasvavan tasaisesti. (Nurmi 2011)

Suomessa sijaitsee Euroopan toiseksi suurin kestopagneettitehdas, Neorem Magnets, joka kasvattaa tuotantokapasiteettiaan koko ajan päämääränä yli 1000 tonnin tuotantokapasiteetti. Euroopan markkinajohtaja kestopagneettien valmistuksessa on saksalainen yritys Vacuumschmelze, joka osti Neorem Magnetsin osake-enemmistön vuonna 2007. Muita merkittäviä kilpailijoita VAC:lla ja Neorem Magnetsilla ei Euroopassa ole. Neorem Magnetsin tuotannon kannattavuus perustuu automatisoituun tuotantoon. Neorem Magnetsin kilpailukykyä on erikoismagneetit, standardituotteita ei valmisteta. Visiona ovat korkealaatuiset, suurikokoiset ja hankalan muotoiset magneetit (Tekniikka ja Talous 2000). Kilpailua käydään siis erityyppisillä markkinoilla ja Japanin kaltaiseen massatuotantoon ei ole järkevää ryhtyä.

Magneettiteollisuus on kasvanut tasaisesti viimeisen 20 vuoden aikana ja näkyvässä ei ole nousevaa teknologiaa, joka uhkasi kestopagneettiteollisuutta. Myös magneettimateriaalien eli harvinaisten maametallien varannot eivät ole vähissä, vaan niitä esiintyy runsaasti maaperässä. Ongelmana on pääosin louhinnan ja jalostamisen kannattavuus. Lisäksi koska maametalleja louhitaan yhdessä, vaikuttaa saantiin niiden suhteellinen esiintyminen malmissa. (Nurmi 2011)

3. TAAJUUSMUUTTAJA

Tehoelektroniikan kehitys on mahdollistanut taajuusmuuttajien toiminnan ja käyttöönoton. Erityisesti transistorien kehitys on ollut avainasemassa, koska transistorit toimivat taajuusmuuttajassa puolijohdetehokytkiminä. Transistorit voivat olla bipolaarisia transistoreja, tehoFETtejä tai IGB-transistoreja, riippuen tarvittavasta ominaisuudesta tai virtakestoisuudesta. Tässä työssä käytetyt taajuusmuuttajat sisältävät IGBT-transistoreja, jossa yhdistyvät MOSFET:ien helppo ohjattavuus ja bipolaaritransistorien hyvä virranjohtokyky. (Pyrhönen 2006)

Taajuusmuuttaja kytketään yleensä syöttävän verkon ja sähkökoneen väliin. Ilman taajuusmuuttajaa sähkömoottori pyörii verkon kanssa samassa tahdissa, eikä pyörimisnopeuteen tai moottorin vääntömomenttiin kyetä vaikuttamaan. Käytettäessä taajuusmuuttajaa syöttävän verkon taajuutta, virtaa tai jännitettä voidaan muokata halutulla tavalla ja säätää moottorin pyörimisnopeutta portaattomasti. Yleisesti taajuusmuuttaja on toiminnaltaan kolmivaiheinen.

3.1 Taajuusmuuttajatyypit

Taajuusmuuttajat voidaan jakaa välipiirillisiin ja välipiirittömiin. Välipiirittömissä muuttajissa syöttävän verkon jännite katkotaan suoraan halutuksi taajuudeksi tai jännitteeksi puolijohdetehokytkimien avulla. Kun vaihtosähköstä muodostetaan suoraan haluttua vaihtosähköä ilman tasasuuntausta, puhutaan myös suorasta taajuusmuuttajasta. Tähän ryhmään kuuluvat esimerkiksi syklo- ja matriisikonvertterit. Syklokonvertterissa käytetään kytkiminä vastarinnankytkettyjä tyristoreita. Suorista taajuusmuuttajista vain syklokonvertterilla on kaupallisia sovellutuksia. Välipiirilliset taajuusmuuttajat sen sijaan käyttävät tasasuuntausta avuksi, eli syöttävän verkon jännitteestä muodostetaan ensin tasajännitettä, mikä vaihtosuunnataan halutuksi jännitteeksi tai taajuudeksi. (Farin 2009)

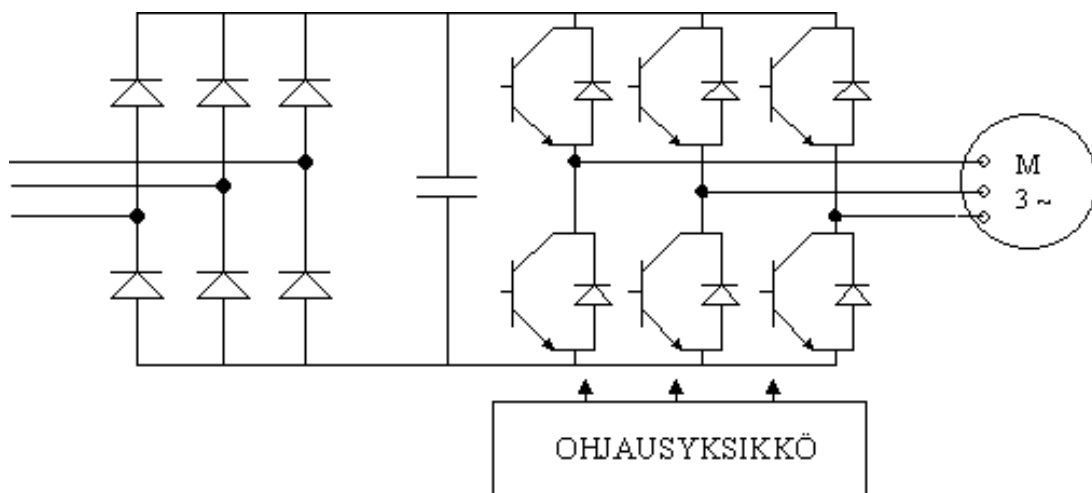
3.2 Taajuusmuuttajan ja sähkömoottorin yhteistoiminta

Taajuusmuuttajan ja sähkökoneen yhteistoiminnasta puhuttaessa, käytetään nimitystä sähkökäyttö. Taajuusmuuttaja toimii sähkökoneen ja verkon välillä energian välittäjänä. Energia siirtyy prosessiin moottorin akselin kautta. Taajuusmuuttaja säätää siirtyvän energian määrää akselilta saatavan tiedon perusteella. Säättöarvona voi olla joko vääntömomentti tai nopeus. Riippuen siitä kumpaa suuretta säädetään, puhutaan joko momentti- tai nopeussäädöstä.

3.3 Taajuusmuuttajan rakenne ja toimintaperiaate

Yleisesti taajuusmuuttaja koostuu neljästä eri osakokonaisuudesta: tasasuuntaajasta, välipiiristä, vaihtosuuntaajasta ja ohjausyksiköstä. Yleensä taajuusmuuttaja on varustettu tasajännitevälipiirillä, jolloin välipiirissä on LC-alipäästösuodatin. Tällöin amplitudia muutetaan joko välipiirin jännitettä säätämällä tai muuttamalla lähtöjännitteen pulssikuviota. Jälkimmäistä toimenpidettä kutsutaan pulssileveysmodulaatioksi (PWM). Tasajännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja soveltuu sekä yksittäismoottori- että monimoottorikäyttöihin. Ohjausyksikkönä on mikroprosessori. (ABB 2000)

Taajuusmuuttajassa syöttävän verkon jännite ensimmäiseksi tasasuunnataan esimerkiksi diodisillan avulla tasajännitteeksi. Koska suuntaajan jälkeen tasajännitteen tulisi sisältää mahdollisimman vähän jännitteen rippeliä, kytketään kondensaattori suodattimeksi välipiiriin. Välipiiri toimii myös energiavarastona. Välipiirin jälkeen vaihtosuuntaaja katkoo kytkinohjeiden perusteella puolijohdetehokytкимиä, jotka johtavat nopeassa tahdissa kukin pari vuorollaan. Taajuusmuuttajassa oleva ohjausyksikkö tuottaa kytkimille kyseiset kytkentäohjeet. Kuvassa 5 on selvitetty taajuusmuuttajan sisäistä rakennetta.



Kuva 5 Taajuusmuuttajan rakenne, missä verkon puolella ensimmäisenä diodisilta, joka toimii tasasuuntaajana, seuraavana välipiiri, missä energiavarastona kondensaattori sekä viimeisenä transistoripari jokaiselle vaiheelle.

Ohjausyksikön avulla voidaan jaksottaa puolijohdekomponenttien johtavuutta, jolloin vaihtovirtamoottorin erivaiheisiin voidaan kytkeä välipiirin jännite. Mitä suurempaa kytkentätaajuutta käytetään sitä puhtaampi on vaihejännitteen käyrämuoto. Toisaalta kasvattamalla kytkentätaajuutta, lisääntyvät tehohäviöt. (Ahtiainen 2009)

3.4 Taajuusmuuttajan säätötavat

Taajuusmuuttajalla voidaan vaikuttaa moottorin toimintatilaan erilaisia säätömenetelmiä käyttäen. Moottorin pyörimisnopeuteen tai vääntömomenttiin voidaan vaikuttaa usealla eri tavalla. Tarkastellaan kolmea perinteisintä säätötapaa: skalaarisäätöä, vektorisäätöä sekä suoraa vääntömomenttisäätöä (DTC).

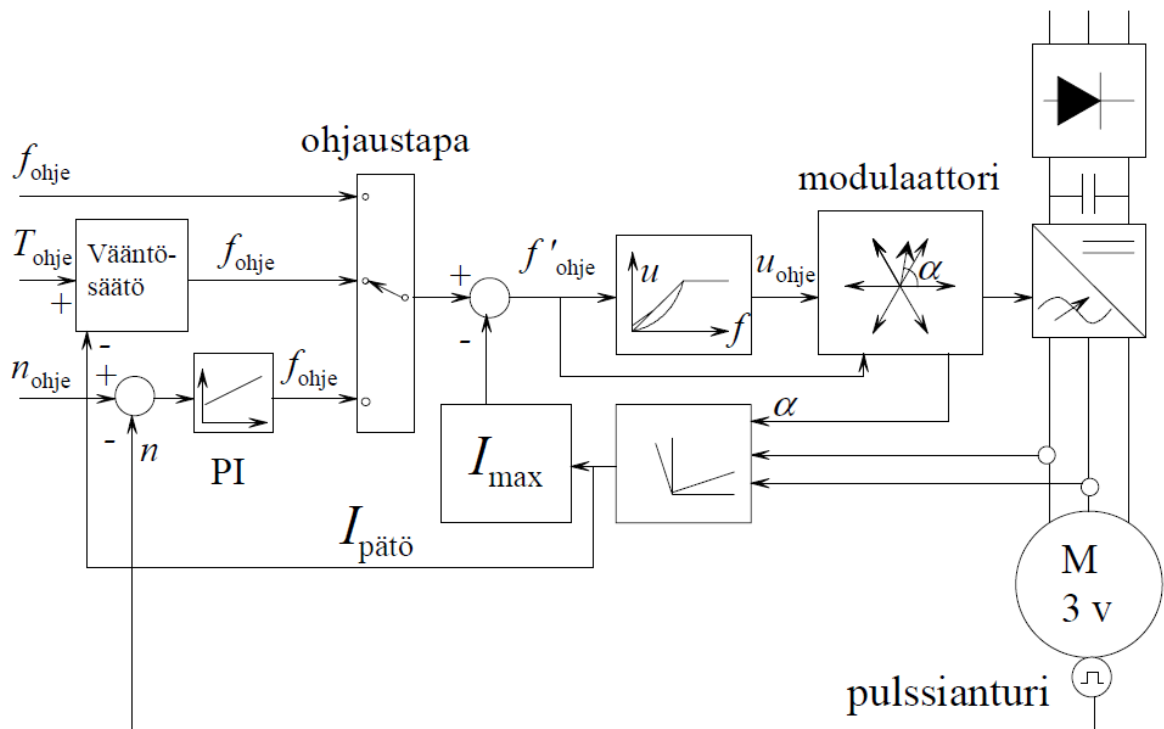
3.4.1 Skalaariohjaus ja -säätö

Skalaariohjaus on yksinkertaisin menetelmä tuottaa vaihtosähkökoneella vääntömomenttia. Ohjaus perustuu taajuusmuuttajan lähtötaajuuden muuttamiseen, jolloin pyörimisnopeuden arvon määrää taajuus sekä kuormitusvääntömomentti. Koska lähtöjännite on riippuvainen lähtötaajuudesta, kasvaa jännite taajuutta nostettaessa lineaarisesti nimellisjännitteeseen, minkä jälkeen jännite pysyy vakiona. Tätä nimitetään myös U/f-ohjaukseksi. Jännitteen ja taajuuden suhde pidetään vakiona kentänheikennysalueen alapuolella (Ahtainen 2009). Skalaariohjaus tarvitsee mittaustietona vaihevirratt. Lisäksi prosessorin avulla lasketaan pätövirtakomponentit. Koska pätövirtakomponentti on verrannollinen moottorin vääntömomenttiin, oletetaan myös että vääntömomentti on suoraan verrannollinen moottorin jännitteen ja pätövirran tuloon yhtälön (4) mukaisesti

$$U_m I_p = U_m I \cos \phi, \quad (4)$$

missä U_m on moottorin jännite ja I_p on pätövirta, joka on yhtälön oikealle puolelle muunnettu vektorista skalaarimuotoon. Tästä tulee myös nimitys skalaariohjaus. Skalaariohjaus ei siis ole vääntömomentti- eikä nopeussäätöä. Moottorin pyörimisnopeutta ei mitata, vaan tarkastellaan ainoastaan ohjearvoa nopeudelle. Skalaariohjausta käytetäänkin lähinnä käytöissä, missä moottorin dynamiikka ja suorituskyky eivät ole tärkeitä. Tällaisia käyttöjä ovat esimerkiksi pumppu- ja puhallinkäytöt.

Mikäli tehdään takaisinkytkentä moottorin ja ohjausyksikön välille, voidaan prosessia myös säätää, jolloin puhutaan skalaarisäädöstä. Voidaan siis säätää joko pyörimisnopeutta tai vääntömomenttia. Skalaarisäädöstä käytetään myös nimitystä taajuussäätö. Ohjaussuureena on joko taajuus, jännite ja niiden korjaukset virtamittauksilla, jotka syötetään staattorin käämeihin. Moottorin tilaa ei huomioida. Skalaarisäädössä ei siis säädetä prosessin tilaa akselitiedon perusteella vaan ohjearvona on moottorin ulkopuolinen ohjaussuure. Kuvassa 6 on esitetty skalaariohjauksen ja -säädön lohkokkaavio. (ABB 2007)



Kuva 6 Skalaariohjauksen ja –säädön toteuttavan taajuusmuuttajan lohkokaavio. (Pyrhönen 2006)

Ulkopuolisena ohjaussuureena on joko taajuus-, vääntömomentti- tai pyörimisnopeusohje. Taajuusohje syötetään jänniteohjearvolohkoon, mistä ulostulona saadaan jänniteohje. Taajuus- tai jänniteohje syötetään modulaattorille, mikä on usein pulssinleveysmodulaattori. Vääntömomenttiohjetta käytettäessä, syötetään ohjearvo vääntömomenttisäättimeen, mistä ulostulona saadaan taajuusohje. Vääntömomenttisäädin on usein PI-tyyppinen. Pyörimisnopeussäädössä sen sijaan verrataan ohjearvoa mitattuun arvoon. Erosuure syötetään myös PI-säättimeen, mikä antaa ulostulona jälleen taajuusohjeen. Koska taajuusohje voi aiheuttaa ylivirran, rajoitetaan virran maksimiarvoa ylikuormituksen estolohkolla. Skalaarisäädön etuna on yksinkertaisuus ja edullisuus (ABB 2001).

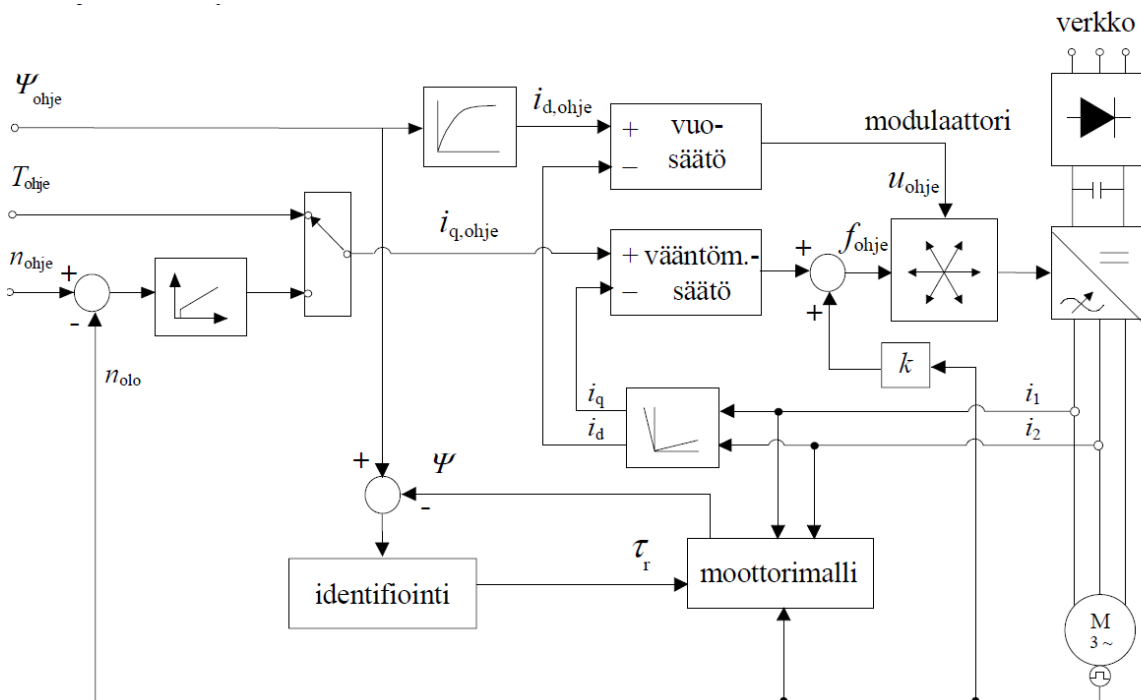
Jännitteen ohjearvolohko sisältää joko U/f -vakiosuhteen generoinnin, neliöllisen jännitekäyrän tai IR-kompensoidun jänniteohjearvokäyrän. IR-kompensointia käytetään erityisesti käytöissä, missä vaaditaan suurta vääntömomenttia myös pienemmillä pyörimisnopeuksilla. Kevyemmissä käytöissä sovelletaan U/f -vakiosuhdetta. Neliöllistä jännitekäyrää käyttämällä saadaan moottorijännitettä pudotettua pienemmillä taajuuksilla, joten energiansäästöä ajatellen menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi puhallinkäytöissä. (Pyrhönen 2006)

Skalaarisäätö ei hyödynnä moottorimallia, vaan vääntömomenttisäätö perustuu taajuudenmuuttajan pätovirtaan ja sen avulla saatavaan vääntömomenttiarvon estimaattiin.

Koska vääntömomenttia vain arvioidaan pätevän virran funktiona, ei säätö kykene reagoimaan tarkasti nopeisiin vääntömomenttiaskaaleisiin. Asettumisaika on tyypillisesti satoja millisekunteja. (ABB:n TTT-käsikirja 2007, Pyrhönen 2006)

3.4.2 Vektorisäätö

Vektorisäätö on magneettikenttäorientoitunut säätömenetelmä, mikä on perusuonteeltaan vääntömomenttisäätöä. Vektorisäätö edellyttää staattorin vaihevirtojen mittausta sekä yleensä roottorin asentotiedon mittausta, mikä edellyttää takaisinkytkentää ja tietoa pyörimisnopeudesta. Kolmannen vaiheen virta lasketaan vektorisäädössä kahden muun vaihevirran avulla. Mitatut vaihevirrat muunnetaan kaksivaihetasoon kaksiakselimallin avulla. Koneen staattorivirta jaetaan pitkittäiseen i_d ja poikittaiseen komponenttiin i_q . Pitkittäinen virtakomponentti on konetta magnetoiva ja poikittainen virtakomponentti tuottaa koneen vääntömomentin (Pyrhönen 2006). Tarkastellaan vektorisäätöä alla olevan kuvan 7 avulla.



Kuva 7 Vektorisäädön toteuttavan taajuusmuuttajan lohkokaavio. (Pyrhönen 2006)

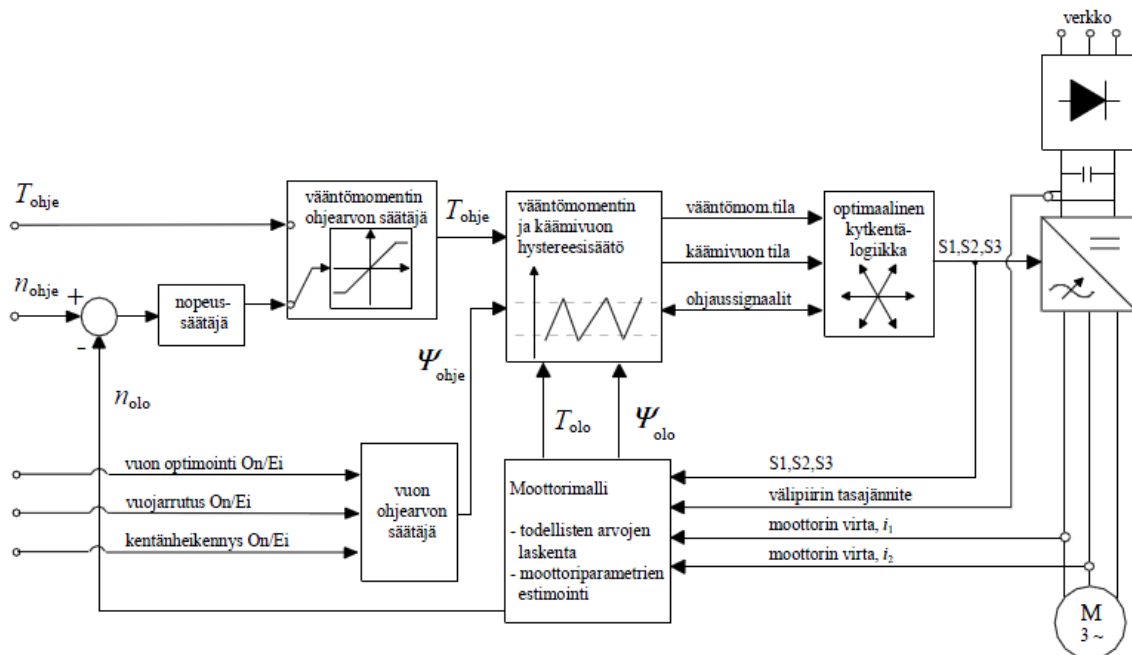
Kuvasta nähdään, että skalaarisäätöön verrattuna vektorisäätö sisältää moottorimallin ja identifioinnin. U/f-ohjauksen tilalla on vuo- ja vääntömomenttisäätö sekä ohjaussuureena on taajuuden oloarvon tilalla käämivuon oloarvo. Kyseiset eroavaisuudet perustuvat esitettyyn kaksiakselimalliin. Moottorimalli pohjautuu i_d - ja i_q -komponenttien sijaiskytkentään. Identifiointilohko sen sijaan hallitsee moottorin dynaamista tilaa laskemalla roottorin aikavakiota τ_r . Pyörimisnopeusohje saadaan takaisinkytkennästä, käämivuon oloarvo saadaan pitkittäiskomponentista i_d ja vääntömomentin oloarvo poikittaiskomponentista i_q . Myös vektorisäädössä käytetään modulaattoria kytkinkomponenttien ohjaukseen. Nyt

pulssinleveysmodulointia soveltuvampi menetelmä on avaruusvektorimodulointi (SVM), missä kytkinohjeet määräytyvät pyörivän vektorin perusteella, mikä on kiinnitetty esimerkiksi roottorikäänivuokoordinaatistoon. Ohjaussuureet lasketaan moottorimallin ja takaisinkytkentöjen avulla. (Pyrhönen 2006)

Vektorisäädön etuna on hyvä momenttivaste ja tarkka nopeudensäätö. Vektorisäätö edellyttää kuitenkin takaisinkytkentää sekä modulaattoria (ABB 2001).

3.4.3 Suora vääntömomenttisäätö

Suorassa vääntömomenttisäädössä vaikutetaan suoraan moottorin vääntömomenttiin ja käänmivuohon. DTC-teknikka on ABB:n kehittämä patentoitu säätömenetelmä, mikä perustuu Takahashin ja Noguchin 1980-luvun puolivälissä esittämään säätöteoriaan, missä integroidaan staattorijännitettä staattorikäänmivuon määrittämiseksi (Farin 2009).



Kuva 8 Suoran vääntömomenttisäädön toteuttavan taajuusmuuttajan lohkokkaavio. (Pyrhönen 2006)

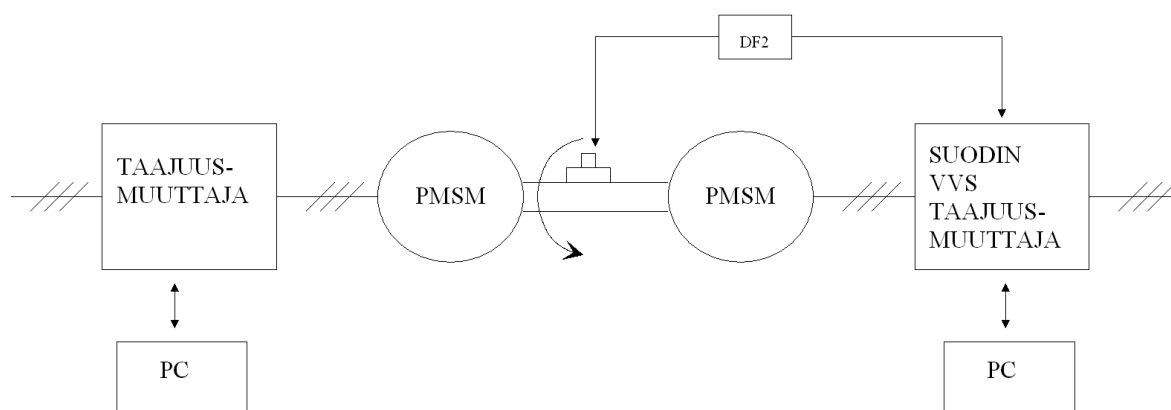
Myös DTC:ssä käänmivuota ja vääntömomenttiä säädetään toisistaan riippumatta, kuten vektorisäädössä. DTC:ssä ei kuitenkaan käytetä modulaattoria, vaan moottorimalli laskee käänmivuon ja vääntömomentin estimaatit, joita verrataan ohjearvoihin. Vääntömomentin ja käänmivuon erosuuret syötetään hystereesisäätäjälle. Optimaalinen kytkentälogiikka valitsee vääntömomentin ja käänmivuon erosuureiden perusteella parhaiten haluttua toimintatilaa vastaavan kytkentävektorin. Näin ollen DTC-säätö ei vaadi roottorin asento tai nopeustietoa. DTC:ssä mitataan usein kaksi vaihevirtaa ja välipiirin tasajännite. Akselin nopeus lasketaan moottorimallissa roottorikäänmivuon derivaatista. Näin ollen takometriä ei tarvi-

ta, mikäli staattinen nopeustarkkuus on riittävä. Kuitenkin säädön dynamiikkaa voidaan parantaa lisäämällä takaisinkytkentä. (Farin 2009, Pyrhönen 2006)

DTC-säädön nopea vaste perustuu optimaalisen kytkentälogiikan nopeuteen. Kytkin-asennon laskeminen moottorimallissa vie noin 25 μ s, mikä on sähköisiä aikavakioitakin nopeampaa. Nimellinen vääntömomenttivaste saavutetaankin yleensä noin 2-3 millisekunnissa. (Pyrhönen 2006)

4. MITTALAITTEISTO

Laboratoriotyössä käytetty mittalaitteisto koostuu kahdesta ABB:n ACSM1-04 taajuusmuuttajasta, kahdesta ABB:n MS4813 kestopagneettitahtikoneesta, KTR:n DATAFLEX 16/10-vääntömomenttianturista ja DF2-liitäntäkotelosta, ABB:n WFU-01 suodattimesta ja ABB:n ACSM1-204 verkkovaihtosuuntaajasta, kahdesta tietokoneesta ja laitteiden välisistä kaapeleista. Kestomagneettitahtikoneita ohjataan DriveStudio 1.5 -ohjelmiston avulla. Mittausjärjestelmä on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9 Mittausjärjestely.

Kuvasta 9 nähdään rakennetun koneikon periaatteellinen kytkentä. Vasemman puoleista taajuusmuuttajaa ajetaan PC:n avulla, millä ohjataan kestopagneettitahtikonetta. Oikeanpuoleinen PMSM toimii mittausjärjestelmässä kuormana. Moottorit on yhdistetty akseleistaan vääntömomenttianturilla. Vääntötieto vietään DF2-liitäntäkotelon avulla oikeanpuoleisen taajuusmuuttajan analogialähtöön. Vääntömomentista saadaan -10 – 10 V jännitetieto.

Vasemmanpuoleinen PMSM toimii järjestelmässä moottorina. Sen sijaan oikeanpuoleinen PMSM toimii systeemissä generaattorina. Vasemmanpuoleisen moottorin pyörittäessä

oikeanpuoleista PMSM:ää indusoituu koneen navoille jännite, joka voidaan verkkovaihtosuuntaajan avulla syöttää takaisin verkkoon.

4.1 Käytettävä kestopagneettitahtikone

Kestomagneettitahtikoneena käytetään ABB:n MS4813 AC servomootoria. Moottori on harjaton ja 8 napainen. Moottorin parametrit on esitetty alla olevassa taulukossa 1.

Taulukko 1 Moottorin kilpiarvot.

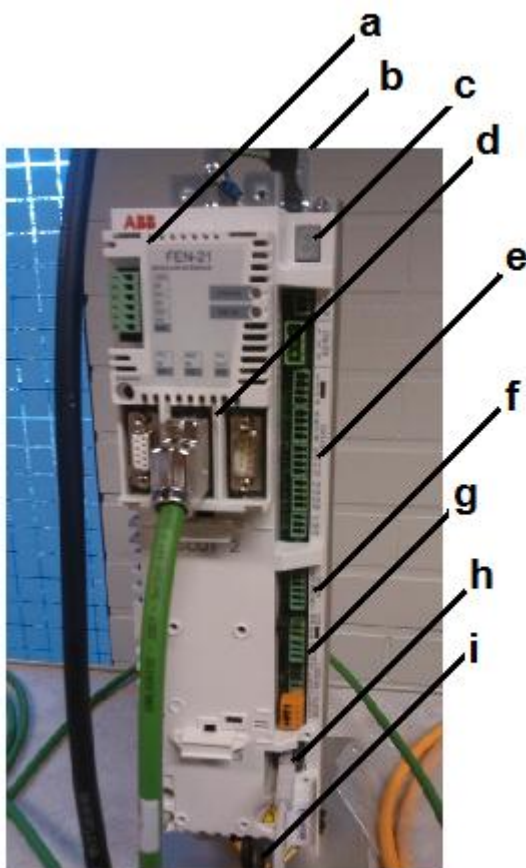
| Parametri | Symboli | Yksikkö | Arvo |
|-----------------------------------|----------|---------|-------|
| Teho | P_n | W | 1000 |
| Nimellinen pyörimisnopeus | n_n | rpm | 3000 |
| Nimellinen virta | I_n | A | 3.4 |
| Huippuvirta | I_p | A | 9.3 |
| Nimellinen vääntömomentti | T_n | Nm | 3.3 |
| Nimellinen taajuus | f_n | Hz | 200 |
| Induktoituva smv nimellisasteessa | E_{PM} | V | 202.3 |

4.1.1 Takaisinkytkentälaitte

Takaisinkytkentälaitteena on robusti harjaton resolveri, missä on yksi napapari, herätesignaalin amplitudi on $7 V_{\text{rms,AC}}$ ja herätetaajuus on 10 kHz. Resolveri on analoginen anturi, mikä on integroitu osaksi moottoria kuvan 1 mukaisesti. Sitä käytetään moottorin kulman mittaamiseen. Myös resolverissa on ensiö- ja toisiokäämitys. Toiminta perustuu toisiokäämeihin indusoituneiden jännitteiden suhteiden tarkasteluun. Tämä tarkastelu tehdään ACSM1-04 taajuusmuuttajassa, mihin resolverin jännitteet johdetaan. (NAI 2001)

4.2 Käytettävä taajuusmuuttaja

Koneikossa käytetään ABB:n ACSM1-04 taajuusmuuttajaa. Taajuusmuuttaja on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10 ASCM1-04 taajuusmuuttaja. Kuvassa esitelty liitännämahdollisuuksia, missä a on FEN-21 moduuli resolveriliitännää, b on AC-syöttöliitännää, c on 7 segmenttinen näyttö, d on moottorin resolveriliitännää, e on digitaalitulot/-lähdöt, f on analogiatulot, g on analogialähdöt, h on ohjauspaneelin/PC:n liitännää ja i on moottoriliitännää.

Kestomagneettitahtikone on kytketty suoraan vaihtosuuntaajan lähtöön (kuvassa moottoriliitännää). AC-syöttöliitännää on kytketty 3-vaiheinen 400 V syöttöjännite. PC on kytketty PC:n liitännää OPCA-02 kaapelilla. Korttipaikkaan 1 on liitetty I/O-laajennus FEN-21 resolveriliitännää varten.

4.3 Käytettävä verkkovaihtosuuntaaja

Rakennetun koneikon toinen kestopagneettitahtikone on kytketty verkkovaihtosuuntaajaan. Tämä koostuu edellä esitellystä taajuusmuuttajasta, ACSM1-204 verkkovaihtosuuntaajasta sekä WFU-01 suodinyksiköstä. Tämä järjestelmä on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11 Vasemmalta oikealle: WFU-suodinyksikkö, ACSM1-204 verkkovaihtosuuntaaja ja ACSM1-04 taajuusmuuttaja.

Moottoriliitäntä on kytketty suodinyksikköön, mikä poistaa moottorin napajännitesignaalisista ylijännitepiikkejä sekä muita häiriösignaaleja. Suodinyksikköön integroitu tuuletin on kytketty 24 voltin tasajännitelähteeseen. Suodinyksikön lähtö on kytketty ACSM1-204:n tuloon. Lisäksi verkkovaihtosuuntaajan ja taajuusmuuttajan välijännitepiirit on yhdistetty. Verkkovaihtosuuntaajan ja taajuusmuuttajan hälytysreleet on yhdistetty siten, että vian tullessa jompaankumpaan, kytketyvät molemmat pois päältä.

4.4 DATAFLEX- vääntömomenttianturi ja DF2- liitäntäkotelo

Käytetyt PMSM:t on yhdistetty akseleistaan KTR:n DATAFLEX 16/10-vääntömomenttianturilla. Anturi on niin sanottu absoluuttianturi, mikä perustuu venymäliuskojen toimintaan. Vääntömomenttignaalin käsittelyresoluutio on 24 bittiä, mikä mahdollistaa 0,1 % tarkkuuden asteikon täydestä arvosta. Vääntömomenttignaali syötetään DF2-liitäntäkoteloon, mistä edelleen ASCM1-04 taajuusmuuttajaan analogiatuloon. Vääntömomenttignaali on jännitesignaalia -10 – 10 V väliltä. DATAFLEX 16/10-vääntömomenttianturissa 1 voltin jännitemuutos vastaa 1 Nm:ä. Näin ollen moottorin tuottamaa vääntöä voidaan tarkastella suoraan taajuusmuuttajan monitorista. Alla olevassa kuvassa 12 on esitelty käytettävä vääntömomenttianturi sekä liitäntäkotelo.



Kuva 12 DATAFLEX 16/10-vääntömomenttianturi (vasemmalla) ja DF2 liitäntäkotelo (oikealla).

5. MITTAUKSET JA MITTAUSTULOKSET

Työssä tehdään mittauksia, joilla havainnollistetaan kestopagneettitahtikoneen ja siihen tarkoitetun ohjauselektronikan toimivuutta. Ennen varsinaisten mittausten aloittamista tehdään koneikolle initialisointiajo (ID-RUN). Taajuusmuuttajaa ohjataan tietokoneen avulla paikallisesti DriveStudio-ohjelman avulla. Ohjelma mahdollistaa ABB:n ACSM1 taajuusmuuttajan sekä samantyyppisten AC-käyttöjen käyttöönoton ja ylläpidon (ABB 2009). DriveStudio:n avulla voidaan seurata valittujen parametrien käyttäytymistä vääntö- tai nopeusohjeen vaikutuksesta. Mittausdata voidaan myös tallentaa, minkä jälkeen suureiden esittäminen ja muokkaaminen on helppoa.

Koneikon käyttöönoton lisäksi työssä tutkitaan kestopagneettitahtikoneen vääntömomenttia tietyllä pyörimisnopeusohjeella. Vertaillaan myös taajuusmuuttajan laskemaa vääntömomenttia DATAFLEX 16/10-vääntömomenttianturin antamaan arvoon.

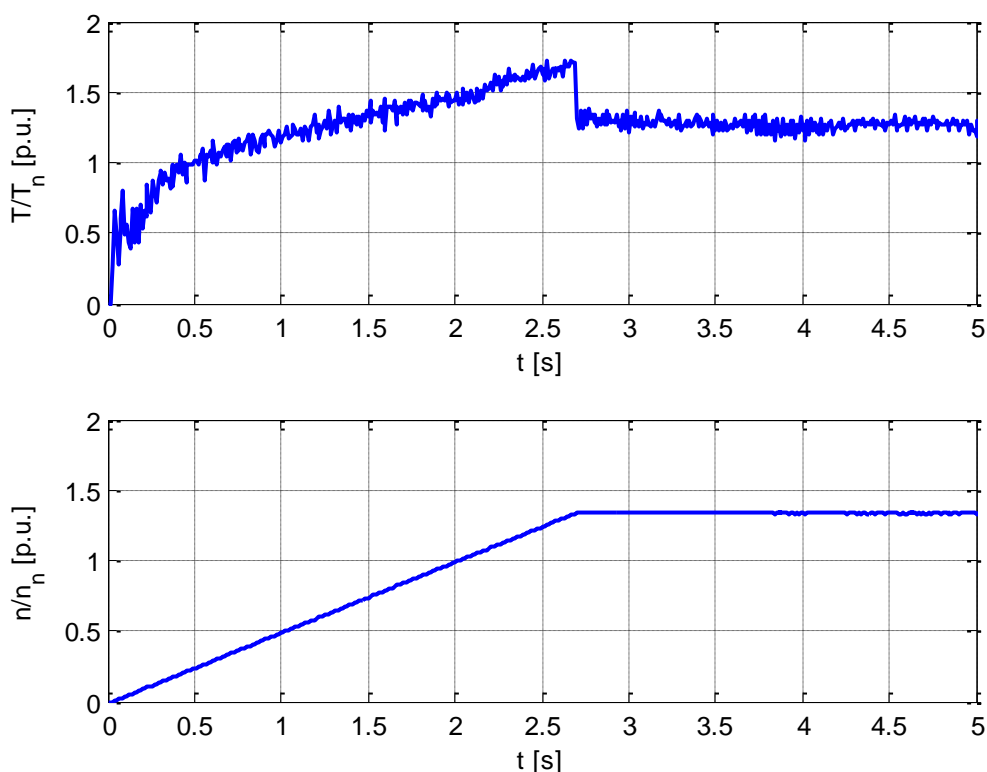
Lisäksi tarkastellaan moottorin ohjausta taajuusmuuttajan avulla. Vertaillaan momenttivastetta skalaari- ja DTC-säädön välillä, kun moottoria ajetaan nopeusohjeella. Lisäksi tarkastellaan kestopagneettitahtikoneen toimivuutta servokäyttönä eli paikkasäädettynä.

5.1 Koneikon käyttöönotto

Ennen varsinaisten mittausten aloittamista tehdään koneikolle initialisointiajo (ID-RUN). Moottorin tunnistusajon aikana taajuusmuuttaja tunnistaa moottorin ominaisuudet optimaalista ohjausta varten (ABB 2008). Tärkeimmät initialisointiajon aikana tunnistettavat parametrit ovat staattorin resistanssi R_s , staattorin hajainduktanssi $L_{s\sigma}$ sekä magnetointiinduktanssi L_m . ID-ajo parantaa huomattavasti moottorimallin tarkkuutta verrattuna moottorimalliin, mikä perustuu pelkästään kilpiarvoihin. (Pyrhönen 2009)

5.2 Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentti

Tehdään mittaus, minkä avulla voidaan analysoida kestopagneettitahtikoneen vääntömomentintuottokykyä, kun moottorille syötetään tietty pyörimisnopeusohje. Annetaan nyt moottorille nopeusohjeeksi 4000 rpm. Kuvassa 13 on esitetty suhteellisilla vääntömomentti- ja nopeuskäyrät ajan suhteen.



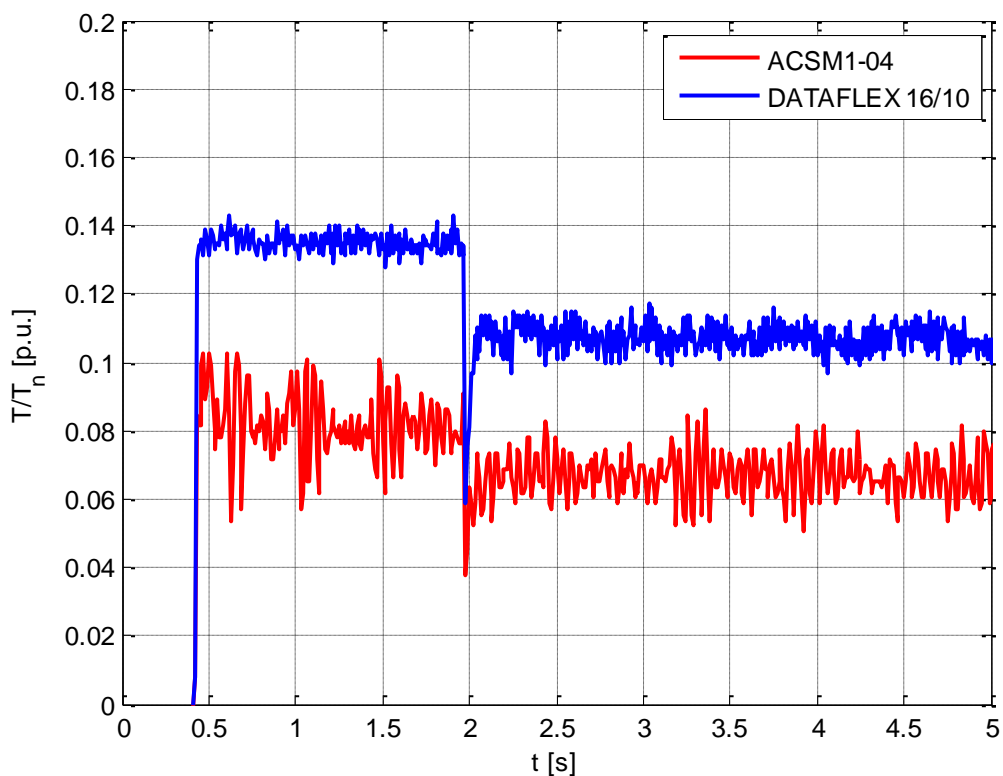
Kuva 13 Kestomagneettitahtikoneen vääntömomentti ja pyörimisnopeus suhteellisarvoina ajan funktiona, kun nopeusohjeena 4000 rpm.

Kuvasta 13 nähdään, että taajuusmuuttajan pyörimisnopeusohje käyttäytyy lineaarisesti. Huomataan myös, että vääntömomentti käyttäytyy melko lineaarisesti. Aluksi vääntömomentti kasvaa todella jyrkästi, kun kone alkaa pyöriä. Jyrkin piikki on nollasta 80 prosenttiin nimellisestä vääntömomentista. Tämän jälkeen vääntö kasvaa lähes lineaarisesti

huippuarvoon, noin 1,7-kertaiseksi nimellisarvosta. Tällöin saavutetaan haluttu 4000 rpm:n nopeus, minkä jälkeen moottoria ei enää tarvitse kiihdyttää ja vääntömomentti puutoaa noin 1,1-kertaiseen arvoon nimellisestä, mikä riittää ylläpitämään haluttua 4000 rpm:n pyörimisnopeutta.

5.3 Vääntömomenttiarvojen vertailu

Tutkitaan DATAFLEX 16/10-vääntömomenttianturin tuottamaa vääntömomenttiarvoa taajuusmuuttajan laskemaan arvoon verrattuna. Kuvaan 14 on piirretty molempien mittaustapojen vääntömomenttien arvot.



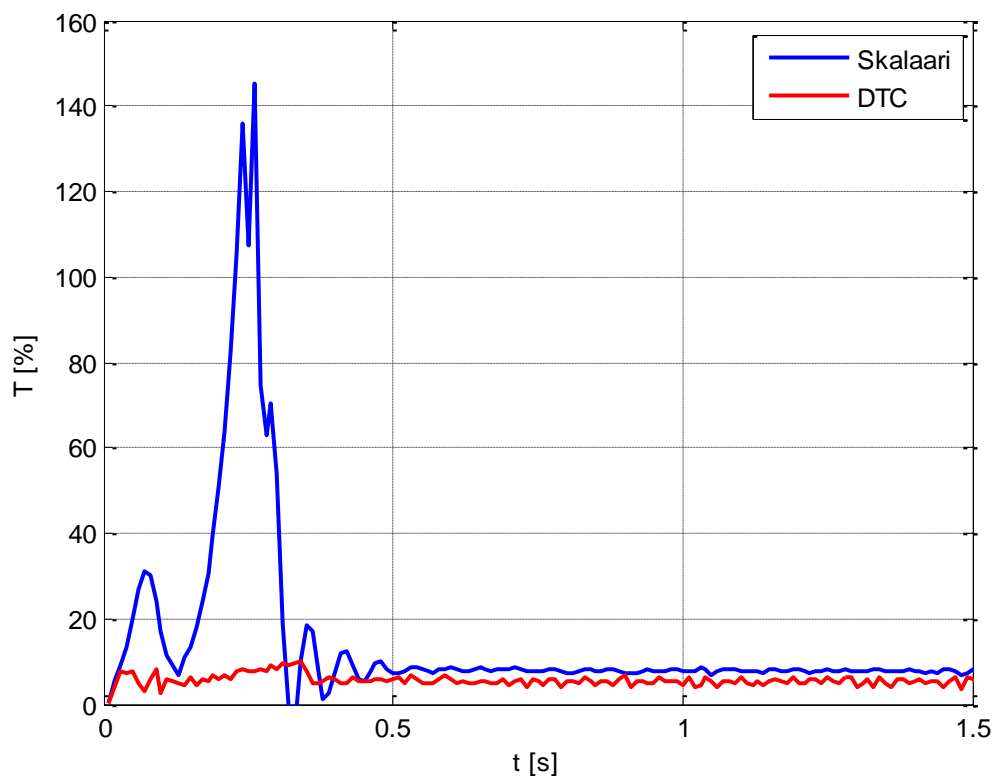
Kuva 14 Taajuusmuuttajan ACSM1-04 ja DATAFLEX 16/10-vääntömomenttianturin vääntömomentit ajan suhteen 10 %:n vääntöohjeella.

Kuvasta 14 huomataan, että molemmat mittaustavat antavat toisiaan muistuttavat vääntömomenttikäyrät. Kuitenkin taajuusmuuttajan laskema arvo asettuu lähemmäksi 10 prosentin ohjearvoa. DATAFLEX 16/10-vääntömomenttianturi tuottaa jännitesignaalia, missä 1 voltti vastaa 1 Nm:ä. DF2-liitäntäkotelon takana olevat kytkimet on asetettu siten, että moottorin maksiminopeudeksi on määritetty 4000 rpm, jolloin anturin skaala on 400 rpm/V (KTR 2012). Kyseinen skaalaus aiheuttaa vääntömomentin arvoon epätarkkuutta, mikä näkyy mittauksessa liian pienenä vääntömomenttina. Virhettä on noin 3 prosenttiyksikköä ohjearvosta. Sen sijaan taajuusmuuttajan laskemassa arvossa virhettä on vain noin 1

prosenttiyksikkö. Anturin näyttämä vääntö ei ole myöskään yhtä tasaista, vaan värettä on noin 2-4 prosenttiyksikköä.

5.4 Momenttivaste skalaari- ja DTC-säädöillä

Tutkitaan taajuusmuuttajan säätöä käytössä olevilla skalaari- ja DTC-säädöillä ajamalla kestopagneettiä 500 rpm nopeusohjeella. Kuvassa 15 on esitetty molempien säätötapojen momenttivasteet kyseisellä ohjeella.

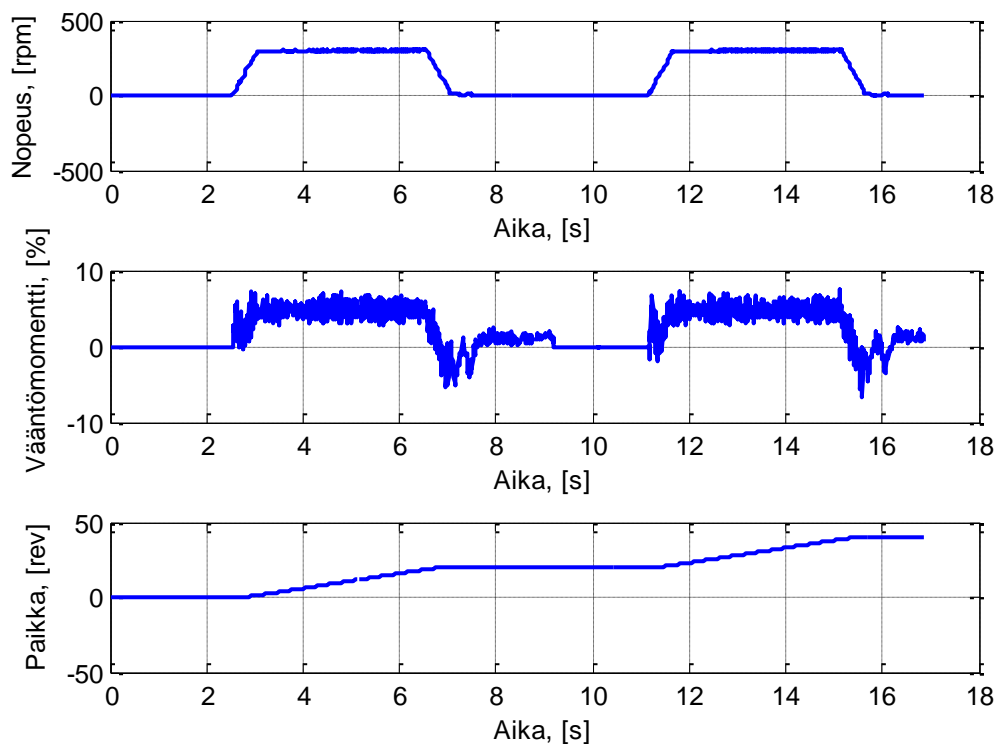


Kuva 15 Momenttivaste skalaari- ja DTC-säädöillä.

Kuvasta 15 voidaan huomata, että skalaarisäädön dynamiikka on huomattavasti heikompi verrattuna suoraan vääntömomenttisäätöön. DTC-säätö saavuttaa 3 ms nimellisen vastearvon, kun skalaarisäädöllä kestää noin 50 millisekuntia. Skalaarisäädön ylitys on reilusti yli 120 % lopullisesta arvosta. DTC-säätö sisältää sen sijaan vain noin 4 % ylitystä. Molemmat käyrämuodot saavuttavat tasaisen muodon vasta 50 ms jälkeen, mikä johtuu taajuusmuuttajaan asetetusta integrointi-ajasta. Pienentämällä integrointi-ajaa pienenee myös vasteen asettumisaika.

5.5 Paikkasäätö

Kestomagneettitahtikone on servomoottori, mikä soveltuu myös tarkkaan paikkasäätöön. Kuvassa 16 on havainnollistettu paikkasäädettyä sähkökäyttöä nopeuden ja vääntömomentin käyttäytymisen avulla.



Kuva 16 Nopeuden ja vääntömomentin käyttäytyminen paikan funktiona.

Kuva 16 havainnollistaa paikkaohjeen vaikutusta vääntömomentin sekä nopeuden käyttökseen. Paikkaohjeelle on annettu ohjeeksi 20, mihin pääsyyn on määritetty ajaksi 4 sekuntia. Tällöin käyttö ajaa kohti kyseistä paikkaa määriteltyyn aikaan sopivalla nopeudella ja vääntömomentilla. Kun määräpaikka lähestyy, jarrutetaan vastakkaisella vääntömomentilla. Nopeus kiihtyy sopivaan arvoon ja laskee nollaan jarrutettaessa. Esimerkkinä paikkasäädetyistä käytöstä on hissikäyttö, missä käyttöä ajetaan paikasta toiseen. Kuvassa 16 vääntömomentin vaihtelu on kuitenkin erittäin kulmikasta ja jyrkkää, mikä aiheuttaa nopeita kiihtyvyyden muutoksia, joten käytännön hissikäytön vääntömomenttia tulisi säätää pehmeämmin.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

DTC-käytössä täysi momentti saadaan myös nollanopeudella (ABB 2001). Kuvan 13 vääntömomenttikäyrän nousujyrkkyys johtuu taajuusmuuttajan asetuksista. Vääntömomentin käyrämuotoa voidaan jyrkentää pienentämällä kiihdytysaikaparametrin arvoa. Mikäli arvoksi määritetään nolla, saavutetaan täysi momentti myös nollanopeudella. Kohdan 5.3 perusteella voidaan myös todeta, että taajuusmuuttajan estimoima vääntömomentti on hyvin tarkkaa, virhettä esiintyy vain noin prosentin luokkaa.

Momenttivastemittaus havainnollistaa erittäin hyvin kuinka säätötavalla on vaikutusta säädön dynamiikkaan. Voidaankin todeta, että skalaarisäätö ei sovellu tarkkuutta vaativiin sovelluksiin. Säättömenetelmä on kuitenkin yksinkertaisempi ja edullisempi toteuttaa kuin suora vääntömomenttisäätö, joten se sopii hyvin pumppu- ja puhallintyyppisiin sovelluksiin, kuten esimerkiksi ilmastoinninsäätöön, missä säädön dynamiikalla ei ole niin suurta merkitystä. Sen sijaan vaativimmat sovellukset edellyttävät servokäyttöä, minkä avulla voidaan säätää tarkasti paikkaa. Esimerkkinä tällaisesta servokäytöstä on kappaleen käsittelyrobotti, missä säädön tarkkuudella ja dynamiikalla on erittäin tärkeä merkitys.

7. YHTEENVETO

Työssä esitellään kestromagneettitahtikoneen rakennetta ja toimintaperiaatetta. Tutkitaan myös moottorinohjaukseen soveltuvan taajuusmuuttajan toimintaa, rakennetta sekä yleisimpiä moottorinohjausmenetelmiä. Eräänä työn keskeisenä tuloksena on yliopiston opetuslaboratorioon kehitetty koneikko, minkä avulla tehtiin mittauksia vääntömomentin, moottorinohjausmenetelmien sekä paikkasäädön analysoimiseksi. Tehtyjä mittauksia sovelletaan myös sähkötekniikan työkurssille kehitettyyn laboratoriotyöhön, minkä myötä opiskelijoille tarjoutuu mahdollisuus tutkia kestromagneettitahtikoneen ja taajuusmuuttajan yhteistoimintaa sekä moderneja teollisuudessa käytettäviä komponentteja.

LÄHTEET

ABB. 2001. Tekninen opas nro1: *Suora momentinsäätö*.

ABB. 2007. *Hardware Manual MS-Series AC Servo Motors (1.1 to 35.8 Nm)*

ABB. 2008. *ACSM1 Motion Control –ohjelma*. Ohjelmointiopas.

ABB. 2009. *DriveStudio*. User Manual.

ABB:n TTT - Teknisiä Tietoja ja Taulukoita -käsikirja 2007. Luku 18: *Sähkömoottorikäytöt*. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.6.2013]. Saatavissa http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/18_S%84hk%94moottorik%84yt%94t.pdf

Ahtiainen, T. 2009. *Servokäytön nopeussäädön automaattinen viritys*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.

Farin, J., Peltonen, L., Pykälä, M., UskiJuotsenvuo, S. 2009. *Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä*. TUTKIMUSRAPORTTI. VTT. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.6.2013]. Saatavissa <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/TAMU-loppuraportti.pdf>

KTR. 2012. *DATAFLEX 16/... Torque Measuring Shaft Assembly-/Operating Instructions*.

Leppä, A. 2003. *Kestomagneettitahtikonekäytön soveltaminen paperiteollisuuden linjakäytöissä*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

NAI. 2001. *Synchro and resolver conversion*, 2nd edition.

Nurmi, T., Vähätalo, M., Saarimaa, R. 2011. *MAGNEETTITEKNOLOGIAKLUSTERI 2020*. Tulevaisuuden tutkimuskeskus. Turun yliopisto. ISBN: 978-952-249-127-5

Pyrhönen, J. 1992. *MAGNEETTISET MATERIAALIT*. Tutkimusraportti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. ISBN: 951-763-721-7

Pyrhönen, J. 2006. *Sähkökäyttökoneiden perusteet*. Luentomateriaalia.

Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V. 2008. *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-69516-6

Pyrhönen, J. 2009 Kurssin electrical drives luentokalvot.

Rilla, M. 2006. *Kestomagneettitahtikoneen lämpömallinnus*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Tekniikka ja Talous. 2000. *Ei seksiä vaan vetovoimaa*. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.6.2013]. Saatavissa

<http://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/neorem+magnets+ei+seksia+vaan+vetovoimaa/a25599>

Tse, P-K. 2011. China's Rare-Earth Industry. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.6.2013]. Saatavissa

<http://tvernedra.ru/RedkozemKit.pdf>