

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
BL10A1000 Kandidaatintyö ja seminaari

KANDIDAATINTYÖ

26.2.2010

TAAJUUSMUUTTAJAN OHJAUKSEN TOTEUTUS
DIGITAALISELLA SIGNAALIPROSESSORILLA
IMPLEMENTING CONTROL OF VARIABLE FREQUENCY DRIVE
WITH DIGITAL SIGNAL PROCESSOR

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET.....	3
Johdanto	5
1. Teoria	6
1.1 Induktiomoottori	6
1.2 Vaihtosähkömoottorin vektorimalli	7
2. Ohjaustavat.....	9
2.1 Skalaariohjaus	10
2.2 Skalaarisäätö	11
2.3 Vektorisäätö	12
3. Toteutus.....	14
3.1 Signaalien käsittely	15
3.2 Modulointi.....	15
4. Yhteenveto	18
LÄHTEET	20

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

f_s	Syöttötaajuus, staattoritaajuus
$f_{s,ref}$	Taajuuden ohjearvo
f_r	Roottoritaajuus
i_a, i_b, i_c	Vaihtovirrat
i_{s0}	Nollavirta
\vec{i}_m	Magnetointivirta
\vec{i}_r	Roottorivirta
\vec{i}_s	Staattorivirta
l_1, l_2, l_3	Vaihtovirran vaiheet
L_m	Magnetointi-induktanssi
L_r	Roottorin kokonaisinduktanssi
$L_{r\sigma}$	Roottorikäämin hajainduktanssi
L_s	Staattorin kokonaisinduktanssi
$L_{s\sigma}$	Staattorikäämin hajainduktanssi
n	Akselin pyörimisnopeus
n_s	Tahtinopeus
N_s	Staattorin kierrosluku
p	Napapariluku
R_r	Roottorikäämin resistanssi
R_s	Staattoriresistanssi
T	Vääntömomentti
\vec{u}_s	Staattorijännite
$u_{s,ref}$	Jännitteen ohjearvo
\vec{u}_r	Roottorijännite
τ_r	Roottorin tyhjäkäyntiaikavakio
ϑ	Roottorin ja a-vaiheen vektorin suunnan välinen kulma
φ	Vaihe-ero
$\vec{\psi}_m$	Staattorikäämityksen läpäisevän ilmavälin magneettivuovektori
$\vec{\psi}_r$	Roottorin käämivuo
$\vec{\psi}_s$	Staattorin käämivuo
$\psi_{s,ref}$	Staattorin käämivuon ohjearvo
$\vec{\psi}_{s\sigma}$	Staattorin hajakäämivuo
ω	Kulmataajuus
ω_{ref}	Kulmataajuuden ohjearvo

I2C	Inter-integrated circuit
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
CAN	Controller area network
PFM	Pulse Frequency Modulation
PWM	Pulse Width Modulation
PSM	Phase Shift Modulation
PAM	Pulse Amplitude Modulation
SCI	Serial communications interface
TBPHS	Time-base phase register
TBPRD	Time base period register set

JOHDANTO

Jos vaihtovirtasähkömoottorin nopeutta haluaa muuttaa, pitää sille syötettävää vaihtovirtaa pystyä hallitsemaan. Suomessa kolmivaiheista virtaa on yleisesti saatavilla vain 230V vaihejännitteellä taajuuden ollessa 50Hz. Käsittelemällä vaihtovirtaa erilaisten tehoelektronikan komponenttien avulla, voidaan vaihtovirtasähkömoottorin nopeutta ohjata.

Tutkittavassa systeemissä vaihtojännite ensin tasasuunnataan ja saatu tasajännite muutetaan takaisin vaihtojännitteeksi käyttäen hilaohjattuja IGBT -transistoria. Hiloja sopivasti ohjaamalla, saadaan tuotettua halutun muotoista vaihtosähköä. Hilojen ohjaamiseen käytetään digitaalista signaaliprosessoria. Prosessorille tuodaan ohjaukseen tarvittavat mittaustiedot: välipiirijännite ja lähdön vaihevirratt sekä systeemin lämpötila.

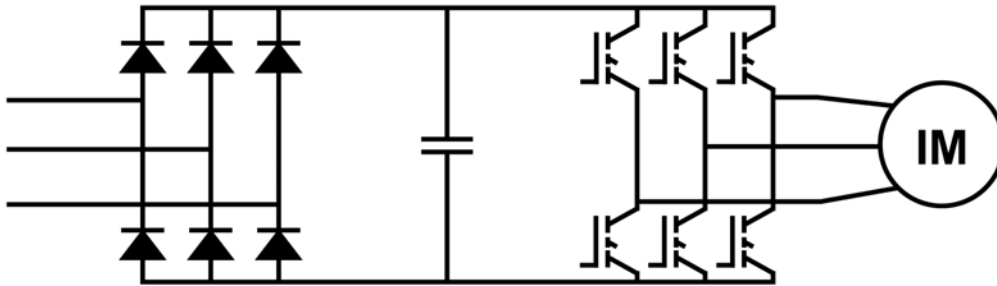
Huomioitavaa ja haastetta lisäävää on, että moottorin toiminnasta ei tule minkäänlaista tietoa. Ainoastaan moottorille syötettävät kolme virtaa ja välipiirin jännite mitataan. Näiden mittausten avulla voidaan kuitenkin hallita systeemiä siten, että se pystyy ohjaamaan moottorin toimintaa. Laitteiston lämpötilan nousu on hyvä osoitus sille, että kaikki ei mene niin kuin suunniteltu. Tästä syystä taajuusmuuttajaan on laitettu myös lämpötilamittaus.

Systeemiin ohjaimeksi valittiin Texas Instrumentsin C2000 sarjan digitaalinen signaaliprosessori TMS320F28335. Ohjaimen päädyttiin, koska yhdellä prosessoripiirillä voidaan saada tarvittavat mittasignaalit A/D-muuntimien avulla sekä tuottaa hilaohjaimille signaalit, jolla voidaan muodostaa kolmivaiheista signaalia moottorille.

Vaihtosähkömoottoreille on kaksi mahdollista keinoa toteuttaa ohjaus. Skalaariohjauksessa koneen toiminta yksinkertaistetaan ja oletetaan sen toimivan tasaisella nopeudella ja kuormalla. Tästä johtuen skalaariohjaus ei pysty reagoimaan tapahtuviin muutoksiin kovin hyvin. Parempi vaihtoehto on käsitellä moottorin toimintaa vektorien avulla, jolloin voidaan paremmin hallita muutosilmiöitä. Ohjaustavat, jotka perustuvat vaihtosähkökoneen vektorimalliin, ovat vektorisäätö ja suora vääntömomenttisäätö.

Työssä tutkitaan taajuusmuuttajan ohjausta skalaari- sekä vektorimalleilla ja tutkitaan digitaalisen signaaliprosessorin kykyä ohjata taajuusmuuttajaa. Ohjauksen toteutukseen liittyvät asiat keskittyvät erityisesti Texas Instrumentsin signaaliprosessoriin ja induktiomootorin ohjaukseen.

1. TEORIA



Kuva 1. Tutkittavaan systeemiin syötetään kolmivaihevirtaa, joka tasasuunnataan ja saatu tasajännite muutetaan takaisin halutunkaltaiseksi vaihtojännitteeksi ohjaamalla IGPT –transistorien hiloja.

Tutkittava välipiirillinen taajuusmuuttaja on esitetty kuvassa 1. Se koostuu kolmesta osasta, tasasuuntaajasta, tasajännitevälipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Systeemillä ohjataan induktiomootorin nopeutta. Tasasuuntaus on toteutettu diodeilla. Jännitevälipiirin kondensaattorin tarkoitus on tasoittaa tasasuuntauksessa muodostunutta tasajännitettä.

1.1 Induktio­moottori

Induktio­moottori eli oikosulkumoottori on yksinkertainen ja vankka rakenteeltaan. Tämä yksinkertaisuus tekee siitä luotettavan, tehokkaan, edullisen ja kompaktin kooltaan. Moottori rakentuu staattorissa olevasta kolmivaihekäämityksestä ja roottorin käämityksestä, joka koostuu urissa olevista sauvoista, jotka on päistään yhdistetty toisiinsa oikosulkurenkailla.

Induktio­moottoria käytettiin pitkään, ja käytetään edelleen, vakionopeudella teollisuuden sovelluksissa. Kuitenkin viimeisimpien vuosikymmenien aikana tehoelektronikan ja mikroprosessorien kehityksen seurauksena, induktio­moottorin nopeuden ohjaus on voitu toteuttaa edullisesti ohjelmistopohjaisesti, eikä nopeuden säätöön ole tarvittu enää kalliita, puhtaasti rautaan perustuvia, analogisia nopeudensäätölaitteistoja. [1]

Induktio­moottorin nopeuden ohjaaminen on haasteellista sen kompleksisuuden, epälineaarisen dynaamisen rakenteen ja eri osien kytkeytymisen takia. Lisäksi moottorin ohjaus on herkkä moottorin parametrien vaihteluille ja kuormassa tapahtuville muutoksille. [2]

Säädön suorituskyky on pienillä nopeuksilla heikko ilman moottorilta tulevaa toimintatietoa. Syinä ovat rajattu tarkkuus staattorilta tulevan jännitteen mittauksessa sekä jättämän ja hajakomponenttien vaikutus saatuihin signaaleihin. [3]

Induktio­moottorille on ominaista, että sen pyörimisnopeus poikkeaa kuormitettuna tahtinopeudesta. Tätä nopeuseroa kutsutaan jättämäksi. Jättämän avulla saadaan moottori tuottamaan vääntömoment-

tia. Akselinopeuden ollessa tahtinopeutta pienempi, induktiomoottori pyörii. Toisaalta taas kun tahtinopeus on akselinopeutta pienempi, toimii moottori generaattorina. [4]

Jättämä voidaan ilmaista käyttämällä absoluuttista jättämänopeutta

$$\Delta n = n_s - n \quad (1)$$

tai jättämä- eli roottoritaajuutta

$$f_r = f_s - pn \quad (2)$$

1.2 Vaihtosähkömoottorin vektorimalli

Käsiteltäessä vaihtosähkömoottoria joudutaan käsittelemään kolmea vaihetta. Näiden kolmen jännitteen ja virran matemaattisen käsittelyn helpottamiseksi muodostetaan niistä kompleksilukuina esitettäviä vektoreita. Määritellään kolmivaihevirta vektorina:

$$\vec{i}_s = \frac{2}{3} \left(i_a + i_b e^{\frac{2}{3}j\pi} + i_c e^{\frac{4}{3}j\pi} \right). \quad (3)$$

Virta voidaan esittää myös muodossa

$$\vec{i}_s = i_s^\alpha + j i_s^\beta, \quad (4)$$

missä i_s^α ja i_s^β ovat virtavektorin reaali- ja imaginääriakselin suuntaiset komponentit tarkasteltaessa systeemiä vaihekäämin a suuntaan kiinnitettyssä $\alpha\beta$ -koordinaatistossa. Palautus vaihevirtoihin voidaan tehdä kaavoilla

$$i_a = i_s^\alpha + i_{s0}, \quad (5)$$

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

$$i_c = -\frac{1}{2} i_s^\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i_s^\beta + i_{s0}. \quad (7)$$

Tutkittavassa systeemissä käytetään vain vaihejohtimia, jolloin nollavirtaa i_{s0} ei kulje ja sitä ei tarvitse ottaa huomioon.

Nyt kaikki kolme virtaa, joilla on 120° vaihe-ero toisiinsa nähden, on kuvattu yhtenä virtavektorina. Myös jännite voidaan esittää vektorina:

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_s, \quad (8)$$

jossa

$$\vec{\psi}_s = L_{s\sigma} \vec{i}_s + \vec{\psi}_m = L_{s\sigma} \vec{i}_s + N_s \vec{\varphi}_m. \quad (9)$$

Kaavan (8) mukaisesti voidaan jänniteyhtälö ilmaista myös roottorille

$$\vec{u}_r = R_r \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_r, \quad (10)$$

jossa $\vec{u}_r=0$, koska induktiomootorissa roottorin käämitys on oikosuljettu. Kaavan (9) kanssa analogisesti pätee roottorin käämivuolle

$$\vec{\psi}_r = L_{r\sigma} \vec{i}_r + \vec{\psi}_m = \vec{\psi}_{r\sigma} + \vec{\psi}_m. \quad (11)$$

Roottorin resistanssi ja hajainduktanssi redusoidaan staattoriin kertomalla ne staattorin ja roottorin välisen redusointikertoimen neliöllä. Roottorivirta redusoidaan jakamalla redusointikertoimella. Jännitteet ja käämivuot redusoidaan kertomalla redusointikertoimella.

Ilmavälin käämivuon yhtälö on

$$\vec{\psi}_m = L_m (\vec{i}_s + \vec{i}_r) = L_m \vec{i}_m. \quad (12)$$

Koneen vääntöä tuottava voima syntyy staattorivirran kulkiessa kohtisuoraan vuota vastaan.

$$T = \frac{3}{2} p \vec{\psi}_s \times \vec{i}_s \quad (13)$$

Staattorin käämivuo voidaan esittää myös ilmavälin magneettivuon ja staattorin hajavuon summana.

$$T = \frac{3}{2} p (\vec{\psi}_m + \vec{\psi}_{s\sigma}) \times \vec{i}_s \quad (14)$$

Koska samansuuntaisten vektorien ristitulo on nolla, ja $\vec{\psi}_{s\sigma}$ ja \vec{i}_s ovat samansuuntaisia, voidaan moottorin vääntömomentti ilmaista vain ilmavälin magneettivuon avulla.

$$T = \frac{3}{2} p \vec{\psi}_m \times \vec{i}_s \quad (15)$$

Kuitenkaan nopeita vääntömomentin muutoksia ei voida tehdä pelkästään ilmavälin käämivuota muuttamalla ilmavälin magneettikentän energian sekä staattori- ja roottorikäämitysten välisen muuntajakytkennän takia. Nopeat muutokset onnistuvat vain staattorivuota muuttamalla. [4]

Kaavan (8) mukaan staattorin käämivuota voi ohjata staattorijännitteen vektorin avulla.

$$\vec{\psi}_s = \int (\vec{u}_s - R_s \vec{i}_s) dt \quad (16)$$

Moottorin hallinnan ja laskennan helpottamiseksi on edullisempaa tehdä koordinaatistomuutos siten, että akselisto ei ole kiinnitetty a-vaiheen suuntaan, vaan se kiinnitetään roottoriin, jolloin akselisto pyörii staattoriin nähden. Akselistoa, joka on kiinnitetty roottoriin, kutsutaan dq-akselistoksi, jossa d-komponentti on kiinnitetty roottorivuohon ja q-komponentti sitä vastaan. Tällöin roottorivuon suuruutta ohjataan staattori virran d-komponentilla ja vääntömomenttia q-komponentilla. Kun roottorivuota pidetään vakiona, voidaan vääntömomenttia säätää q-virtakomponenttia säätämällä. Koordinaatistomuutos voidaan tehdä virralle kaavalla

$$\vec{i}_s^{dq} = \vec{i}_s^{\alpha\beta} e^{-j\vartheta_{d\alpha}} \quad (17)$$

ja palautus onnistuu kaavalla

$$\vec{i}_s^{\alpha\beta} = \vec{i}_s^{dq} e^{+j\vartheta_{d\alpha}} \quad (18)$$

Samat koordinaatiston muutoskaavat soveltuvat myös moottorin jännitteiden ja käämivoiden koordinaatistomuutosten laskemiseen. Vektoriyhtälöitä laskettaessa on tärkeää, että laskettavat vektorit ovat samassa koordinaatistossa.

Käyttämällä käämivuon yhtälöä (12) sekä kaavoja (8) ja (10), saadaan staattorin ja roottorin käämi-voille

$$\vec{\psi}_s = L_{s\sigma} \vec{i}_s + \vec{\psi}_m = (L_{s\sigma} + L_m) \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \quad (19)$$

ja

$$\vec{\psi}_r = L_{r\sigma} \vec{i}_r + \vec{\psi}_m = L_m \vec{i}_s + (L_{r\sigma} + L_m) \vec{i}_r = L_m \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r \quad (20)$$

2. OHJAUSTAVAT

Tutkittavassa systeemissä on syytä puhua moottorin ohjauksesta, koska minkäänlaista takaisinkytkentää moottorilta ei voida muodostaa. Moottorin säätämiseen tarvittaisiin tietoa moottorin reaalisesta tilasta, jota voitaisiin verrata haluttuun ohjearvoon ja näin saada moottori toimimaan halutulla tavalla.

2.1 Skalaariohjaus

Skalaariohjaus on yksinkertaisin moottorin ohjaustapa. Siinä ei ole sen enempää nopeus- kuin vääntömomenttisäätöä ja se soveltuu dynamiikkavaatimuksiltaan vähäisiin käyttöihin. Skalaariohjauksessa koneen ohjaus perustuu kaavoihin, jotka pätevät tarkasti vain nopeuden ja kuormitusten ollessa vakioita. Tämän takia skalaariohjaus ei kykene reagoimaan vääntömomentissa tapahtuviin nopeisiin muutoksiin kovin hyvin. [4] Vektorisäätö pystyy ohjaamaan moottoria paremmin nopeissa muutoksissa.

Skalaariohjausta on käytetty laajasti teollisuudessa sen yksinkertaisuuden takia, mutta sen merkitys on vähentynyt suorituskykyisemmän vektorisäädön takia. Monet sovellukset vaativat vektorisäädön suorituskykyä. [5]

Skalaariohjauksessa pyritään pitämään staattorin käämivuo vakiona. Staattoriresistanssia ei huomioida, mutta resistiivisen lisän avulla voidaan moottorin toimintaa parantaa pienillä nopeuksilla. Alhaisilla nopeuksilla taajuus on pieni, jolloin staattorin resistanssi kuluttaa suuren osan staattorijännitteestä, heikentäen staattorin vuota. Käytännössä tätä voidaan kompensoida lisäämällä pienillä kulmanopeuksilla jännitettä tai yksinkertaisesti lisätä jännitettä koko taajuusalueelle, jolloin pienillä taajuuksilla se kompensoi staattorin vuon heikennystä, mutta suuremmilla taajuuksilla, jännitteen kasvaessa, se muuttuu merkityksettömäksi. Rajoittamalla jänniteohje korkeintaan nimellisjännitteen suuruiseksi, saadaan toteutettua kentänheikennys. [4][5]

Systeemin ohjearvoksi annetaan pyörimistaajuus, huomioimatta induktiomoottorille ominaista jättämätaajuutta. Pyörimistaajuuden muutosnopeutta on syytä kuitenkin rajoittaa esimerkiksi yksinkertaisella PI -säätimellä, jolloin muutos ei tapahdu liian nopeasti ja aiheuta ylivirtalaukaisua koneen kippijättämän ylittyessä.

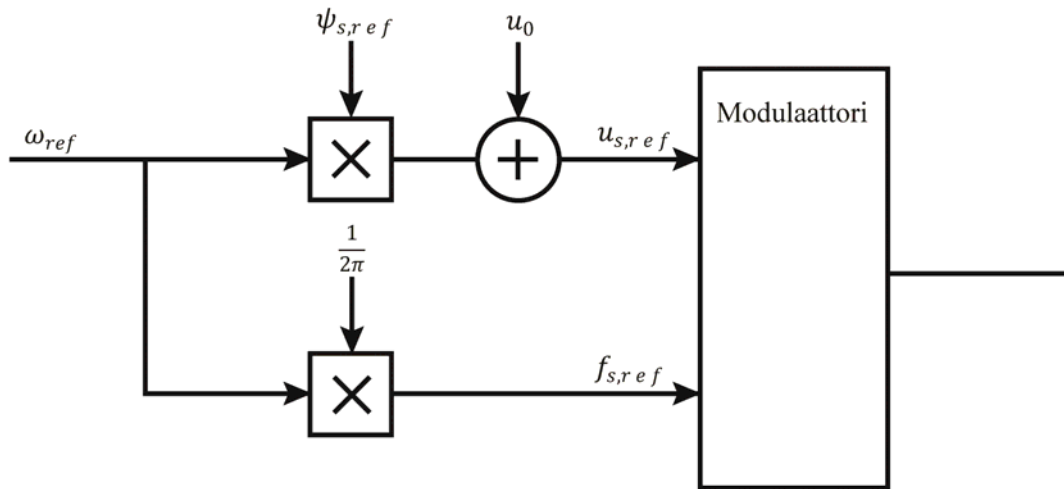
Skalaariohjaus perustuu jänniteyhtälöön (8) pysyvässä tilassa.

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + j\omega \vec{\psi}_s \quad (21)$$

Ohjauksessa kuitenkin ollaan kiinnostuneita vain yhtälön itseisarvosta, jolloin saadaan staattorijännitteen ohjearvoksi

$$u_{s,ref} = R_s i_s + \omega_{ref} \psi_{s,ref} \quad (22)$$

Edellisen yhtälön mukaan saadaan skalaariohjaukselle lohkokkaavio, joka on esitetty kuvassa 2, jossa yhtälön resistiivinen osa on yksinkertaistettu korvaamalla se kiinteällä jännitelisällä u_0 .



Kuva 2. Skalaariohjauksen yksinkertainen lohkokkaavio, jossa systeemiin syötetään jännitelisä u_0 parantamaan ohjauksen toimintaa pienillä taajuuksilla. Modulaattori antaa ohjaukaskäskyt hilaohjaimille, jotka ohjaavat IGBT -transistoreita.

Taajuusohje on suoraan verrannollinen nopeusohjeeseen.

$$f_{s,ref} = \frac{\omega_{ref}}{2\pi} \quad (23)$$

2.2 Skalaarisäätö

Skalaariohjaukseen voidaan tuoda säätöelementtejä, jolloin ohjauksella voidaan hallita paremmin moottorin tuottamaa vääntömomenttia. Tällöin puhutaan skalaarisäädöstä. Skalaarisäätö perustuu vääntömomentin ja jättämän väliseen riippuvuuteen.

$$T = \frac{3}{2} p \frac{2\pi(f_s - pn)\psi_r^2}{R_r} \quad (24)$$

Roottorin käänivuon ja roottoriresistanssin ollessa vakioita, on vääntömomentti suoraan verrannollinen jättämäkulmataajuuteen, johon voidaan vaikuttaa moottorin syöttötaajuutta f_s muuttamalla. Jos tiedossa olisi koneen akselinopeus, voitaisiin sen perusteella säätää vääntömomenttia suoraan halutuksi. Kuitenkaan käsiteltävässä systeemissä akselinopeutta ei ole saatavilla.

Kirjassa [3] esitetään vääntömomentin oloarvon selvittämiseksi myös vaihtoehto, jossa käytetään hyväksi välipiiristä mitattua virtaa, joka on aivan pienimpiä nopeuksia lukuun ottamatta kohtuullisen tarkasti verrannollinen koneen tuottamaan tehoon. Tarkasteltavassa systeemissä tämäntyyppinen lähestymistapa olisi mahdollinen, koska välipiirin jännite mitataan ja on siten se on tiedossa.

2.3 Vektorisäätö

Moottoria käytettäessä dynaamisesti vaativasti, esimerkiksi pienillä nopeuksilla tai nopeissa vääntömomentin muutoksissa, tulee moottorin nopeuden ja vääntömomentin säätö merkitykselliseksi. Vektorisäätö ja suora vääntömomenttisäätö sisältävät tällaiset säädöt. Vaikka tietoa moottorin tilasta ei ole, on kuitenkin tekniikoita, joilla pystytään eri tavoilla induktiomoottorin toimintaa estimoimaan ja tekemään sille säätö. Artikkelissa [6] listataan menetelmät, joilla voidaan estimoida roottorin asento induktiomoottorissa:

1. Avoimen piirin estimaatit käyttäen mitattuja staattorin virtoja tai jännitteitä
2. Estimaatit käyttäen harmonista jännitettä
3. Estimaatit käyttäen moottorin dq-akselien impedanssieroja ja muita ilmiöitä
4. Moottorimalliin mukautuvat systeemit
5. Säädön lähtöihin perustuvat havainnointimallit (esimerkiksi Kalman, Luenberger)
6. Estimaatit käyttäen tekoälyä (esimerkiksi neuroverkot, fuzzy logic)

Kirjassa [5] ei ole mainittu tekoälyn käyttämistä vaikka kyseinen kirja on kirjoitettu myöhemmin. Siinä kuitenkin esitetään jättämän laskentaan perustuva estimaatti. Tämä kuitenkin on hyvin lähellä artikkelin [6] kohtaa 1., joten se on luultavasti tästä syystä artikkelissa jätetty mainitsematta. Toisaalta taas myös Kalmanin ja Luenbergerin havainnointimallit perustuvat myös tilayhtälöihin, mutta ne ovat selvästi monimutkaisempia jättämän tai avoimen piirin estimaatteihin nähden.

Kohdassa, jossa käytetään hyväksi moottorin dq-akselien impedanssieroja, syötetään staattorille korkeataajuinen signaali. Muokatussa roottorissa voidaan havaita muutos ja näin saadaan roottorin asennolle estimaatti. Korkeataajuinen signaali ei vaikuta moottorin käyttäytymiseen ja korkeataajuisista signaaleista voi syöttää myös akselinopeuden ollessa nolla, jolloin saadaan tarkka tieto akselinopeudesta myös hyvin pienillä nopeuksilla. Ongelmana on kuitenkin muokattu roottori, joten tätä estimaattia ei voi yleisesti käyttää. [5]

Vaikkakin käyttämällä estimaatteja saadaan jo kohtuullisen hyvin toimiva säätö, alhaisilla nopeuksilla eli staattoritaajuudella nolla ja sen läheisyydessä, hyvin toimivan säädön aikaansaaminen on ongelmallista. Tämä johtuu siitä, että kaikki estimaatit perustuvat, suorasti tai epäsuorasti, roottorille indusoituneeseen jännitteeseen, joka laskee hyvin pieneksi kun staattorin taajuus pienenee ja lopulta häviää nollataajuudella. [3]

Roottorin asennon estimoinnin lisäksi tarvitaan roottorivuon d ja q suuntaisten komponenttien estimointi. Kaksi yleistä estimointimallia ovat jännite- ja virtamalli. Virtamalli on parempi roottorivuon estimointiin alhaisilla nopeuksilla. [5] Jos käytössä on akselinopeusanturi, virtamallin avulla voidaan ohjata moottoria aina pysähtymiseen saakka. [6]

Jännitemallissa yhtälön (16) avulla voidaan laskea staattorivuolle d ja q suuntaiset komponentit. Yhtälöitä (19) ja (20) apuna käyttäen saadaan roottorivuolle yhtälö

$$\vec{\psi}_r = \frac{L_r}{L_m} \vec{\psi}_m - L_r \vec{i}_r, \quad (25)$$

jolla voidaan laskea roottorivuon d ja q suuntaiset komponentit. Tällöin voidaan laskea vääntömomentti

$$T = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \left(\vec{\psi}_r^d \vec{i}_s^q - \vec{\psi}_r^q \vec{i}_s^d \right) \quad (26)$$

Yläindeksit osoittavat vektorien suunnat d ja q akselistossa.

Virtamalli saadaan muuntamalla roottorin jänniteyhtälö (10) roottorikoordinaatistoon

$$R_r \vec{i}_r^{dq} + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_r^{dq} + j(\omega_{d\alpha} - \omega) \vec{\psi}_r^{dq} = 0, \quad (27)$$

jossa viimeinen termi häviää, koska roottorikoordinaatistossa $\omega_{d\alpha} = \omega$. Sijoittamalla roottorivirran lauseke (20) edelliseen yhtälöön, saadaan

$$\frac{d}{dt} \vec{\psi}_r^{dq} = -\frac{R_r}{L_r} \vec{\psi}_r^{dq} + \frac{R_r}{L_r} L_m \vec{i}_s^{dq}. \quad (28)$$

Merkitään, että

$$\frac{L_r}{R_r} = \tau_r, \quad (29)$$

jolloin saadaan yhtälö muotoon

$$\tau_r \frac{d}{dt} \vec{\psi}_r^{dq} + \vec{\psi}_r^{dq} = L_m \vec{i}_s^{dq}, \quad (30)$$

jossa estimoitava roottorin käämivuo on differentiaaliyhtälön ratkaisu. Tällöin muuntamalla mitattu staattorivirta roottorikoordinaatistoon, kertomalla se magnetointi-induktanssilla ja suodattamalla suodolla, joka suodattaa roottoriaikavakiolla, saadaan roottorivuon estimaatti.

Virtamallin ongelmana on, että mitään yhtälön (30) parametreista ei voida pitää vakiona. Resistanssi riippuu lämpötilasta ja magneettinen kyllästys muuttaa induktanssien arvoja. [4] Koska jännitemalli toimii paremmin suurilla nopeuksilla ja virtamalli pienillä, on toteutettu hybridimalli, jossa

alhaisilla nopeuksilla roottorin vuota estimoi virtamalli ja suuremmilla nopeuksilla tulee käyttöön jännitemalli. [5]

Valitaan roottorin vuon estimoinniksi mikä tahansa malli, saadaan estimaatin avulla roottorin käänmivuo, tarvittavat sinit ja cosinit yhtälöistä (31), (32) ja (33) sekä vääntömomentti yhtälöstä (26).

$$\psi_r = \sqrt{\overline{\psi_r^d}^2 + \overline{\psi_r^q}^2} \quad (31)$$

$$\sin \vartheta = \frac{\overline{\psi_r^q}}{\psi_r} \quad (32)$$

$$\cos \vartheta = \frac{\overline{\psi_r^d}}{\psi_r} \quad (33)$$

Esitettyä vektorisäättöä kutsutaan roottorivuo-orientoiduksi vektorisäädöksi. Usein tarvittavaa laskentamäärää pyritään vähentämään yksinkertaistuksilla ja kikoilla, joten vektorisäätöversioita on olemassa lukuisia. [4] Vektorisäätöversioiden myötä myös vektorisäädön ohjauksen lohkokaaavioita on useita.

Roottorivuo-orientoidun vektorisäädön ohjaukseen oleellisina osina kuuluvat virranmittaukset ja virtojen muuttaminen vektorimallin mukaiseksi, roottorin asennon mittaus tai estimointi, roottorin vuon estimointi, koordinaatiston muutos, vuo- ja vääntömomenttisäätö ja modulaattori, joka ohjaa taajuusmuuttajaa.

3. TOTEUTUS

Osiassa keskitytään taajuusmuuttajan ohjaamisen toteutukseen valitulla Texas Instrumentsin C2000 -sarjan signaaliprosessorilla. Se on 32-bittinen kiinteän pilkun prosessori, joka sisältää 32-bittisen yksinkertaisen tarkkuuden liukulukuprosessorin. Prosessori on toteutettu käyttämällä useaa muistiväylää eli se on toteutettu Harvard -arkkitehtuurilla. Prosessori pystyy hakemaan komennon sekä lukemaan ja kirjoittamaan tietoa samalla kellojaksolla. Prosessori ohjelmoidaan käyttämällä standardia C/C++ -ohjelmointikieltä. [7]

Digitaalinen signaaliprosessori sisältää IQmath -kirjaston, joka sisältää kokoelman optimoituja ja tarkkoja matemaattisia funktioita. Kirjaston avulla onnistuu liukuvan pilkun algoritmien laskenta kiinteän pilkun ohjelmointiympäristössä. Matemaattiset funktiot ovat koottu silmälläpitäen optima-

lista suoritusnopeutta ja tulosten tarkkuutta. Esimerkiksi sinifunktion laskemiseen käytetään taulukoituja arvoja ja Taylorin sarjakehitelmää nopeuttamaan laskentaa. [8]

3.1 Signaalien käsittely

Tutkittavaan systeemiin tuodaan mittaussignaalit sekä analogisessa että digitaalisessa muodossa. Systeemin on myös pystyttävä luomaan signaalia esimerkiksi järjestelmään luotua watchdog -toimintoa varten. Ellei prosessorilta tule tietyin väliajoin vaihtuvaa signaalia, järjestelmä olettaa, että prosessoriin on tullut vika ja järjestelmä ajetaan alas.

Signaaliprosessori sisältää kuusikymmentäneljä porttia, jotka voivat joko vastaanottaa tai lähettää signaalia. Kaikki portit ovat multipleksattu siten, että ne voivat toimia kolmena eri lisälaitteporttina tai normaalina tulona tai lähtönä. Käyttäjä voi määrittää portin toiminnon haluamukseen. Portit voivat esimerkiksi toimia I2C, CAN tai SPI väylinä riippuen siitä, miten käyttäjä haluaa ne ohjelmoida.

Analogista mittaustietoa voidaan lukea A/D-muuntimen avulla. Texas Instruments on toteuttanut tutkittavaan prosessoriin kaksitoista bittisen A/D-muuntimen. Muuntimessa on kuusitoista kanavaa jaettuna kahdelle sekvenssille, mutta muunnos analogisesta digitaaliseen tapahtuu yhdessä yksikössä. Prosessorin jännitealue on 0-3V ja A/D-muunnin tulkitsee alle 0V jännitteet digitaaliarvoksi nolla ja 3V suuremmat mittaukset arvoksi 4096. A/D-muuntimen antama digitaalinen arvo voidaan laskea kaavalla

$$\text{Digitaalinen arvo} = 4096 \cdot \frac{\text{Analoginen jännite} - \text{ADCLO}}{3}, \quad (34)$$

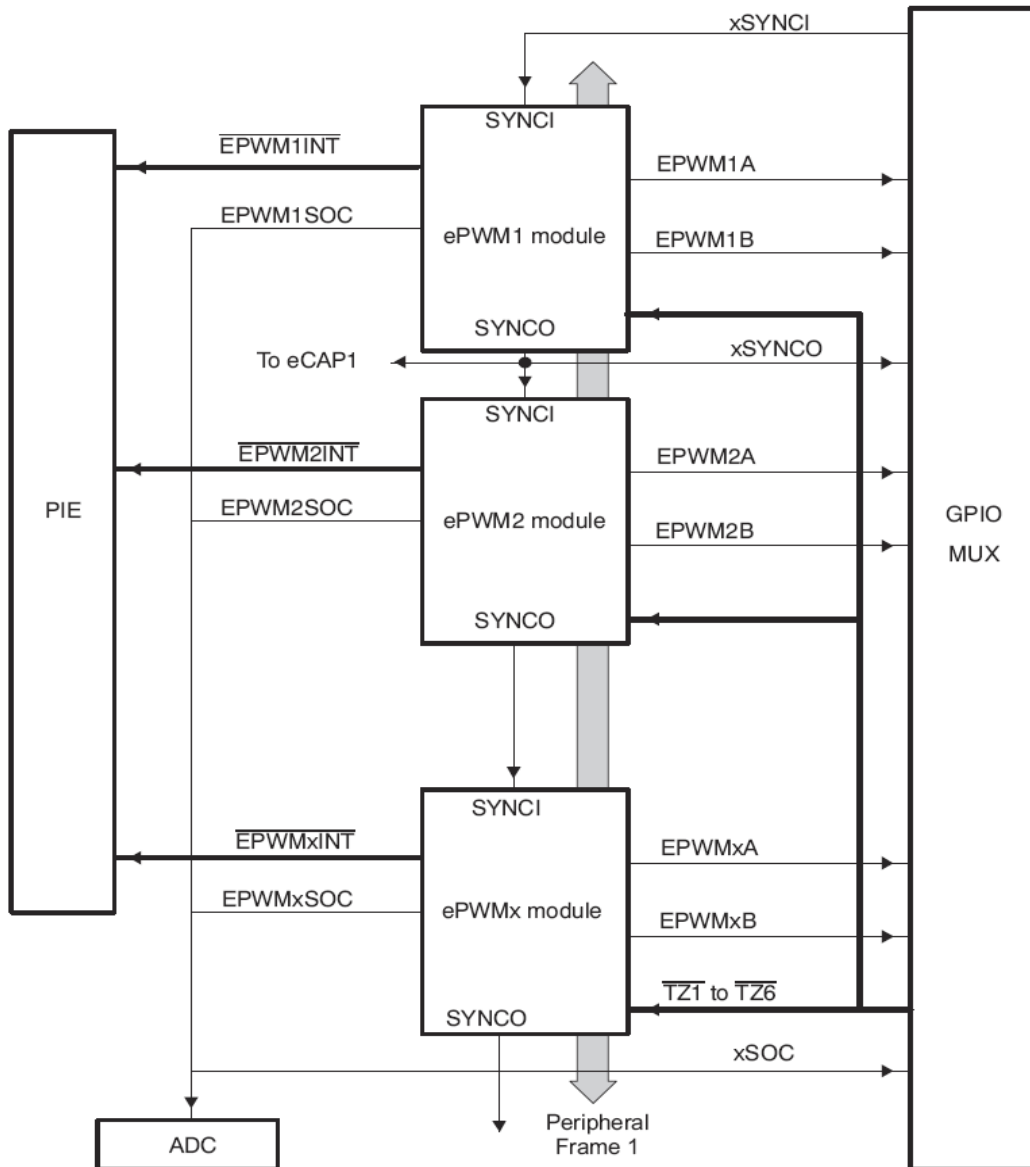
jossa ADCLO on analoginen maa. [9]

3.2 Modulointi

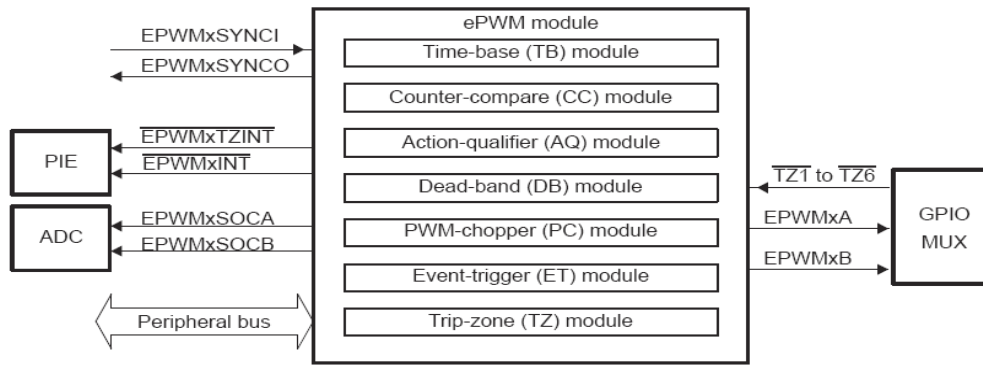
IGBT -komponenttien ohjaus tapahtuu siten, että joko hila johtaa tai ei johda. Tällöin modulointimenetelmiksi soveltuvat PFM (Pulse Frequency Modulation), PWM (Pulse Width Modulation), PSM (Phase Shift Modulation) tai PAM (Pulse Amplitude Modulation). Jännitevälipiiritaajuusmuuttajissa on estettävä oikosulun mahdollisuus katkaisemalla ensin johtava tehokomponentti johtamattomaksi ennen kuin samanvaiheinen komponentti ohjataan johtavaksi. [Niiranen] Suunnittelussa taajuusmuuttajassa tämä on estetty logiikkakomponentteja käyttämällä.

Texas Instrumentsin digitaalinen signaaliprosessori sisältää PWM moduulin, jota voidaan käyttää hilojen ohjaamiseen. Moduuli sisältää kaksi ulostuloa ja ne ovat synkronoitu siten, että ne voivat toimia yhtenä yksikkönä. Yhteensä moduuleilla voidaan luoda kuusi PWM signaalia eli jokaista

hilaohjainta saadaan suoraan ohjattua. Moduuleissa on 16-bittinen kellolaskuri, joka sisältää jakson ja taajuuden hallinnan.

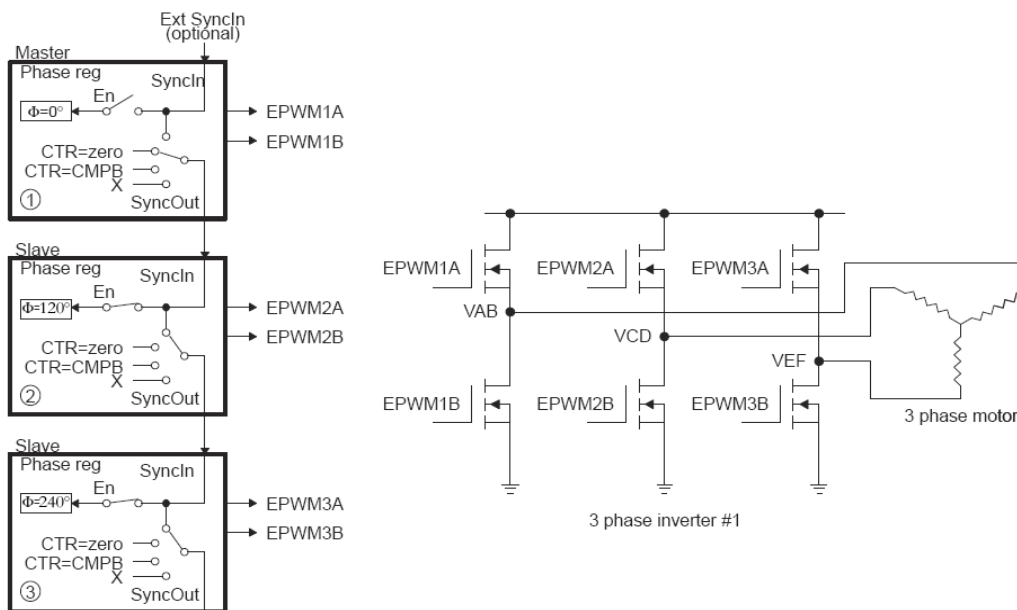


Kuva 3. Signaaliprosessorin PWM moduulit voivat tuottaa kuutta signaalia. Moduulit ovat yhdistetty AD -muuntimeen, johon PWM signaalit voidaan synkronoida. Moduulit voivat lähettää keskeytyssignaaleja keskeytystaululle (PIE). [10]



Kuva 4. PWM moduuli sisältää seitsemän alimoduulia. Kuvassa on myös esitetty prosessorin sisäiset lähtevät ja tulevat signaalit. Lohkon GPIO kautta signaalit saadaan vietyä prosessorin portteihin, joihin hilaohjaimet liitetään. [10]

Tavoitteena on, että kaikki hilaohjaimet saavat signaalit samalla taajuudella ja kaikki ovat synkronoituja toisiinsa nähden. Kuvassa 5. on esitetty kuinka yhtä päälohkoa ja kahta orjalohkoa, jotka ovat synkronoitu päälohkon kanssa, käyttämällä saadaan aikaiseksi PWM -ohjaus kolmivaiheiselle moottorille.

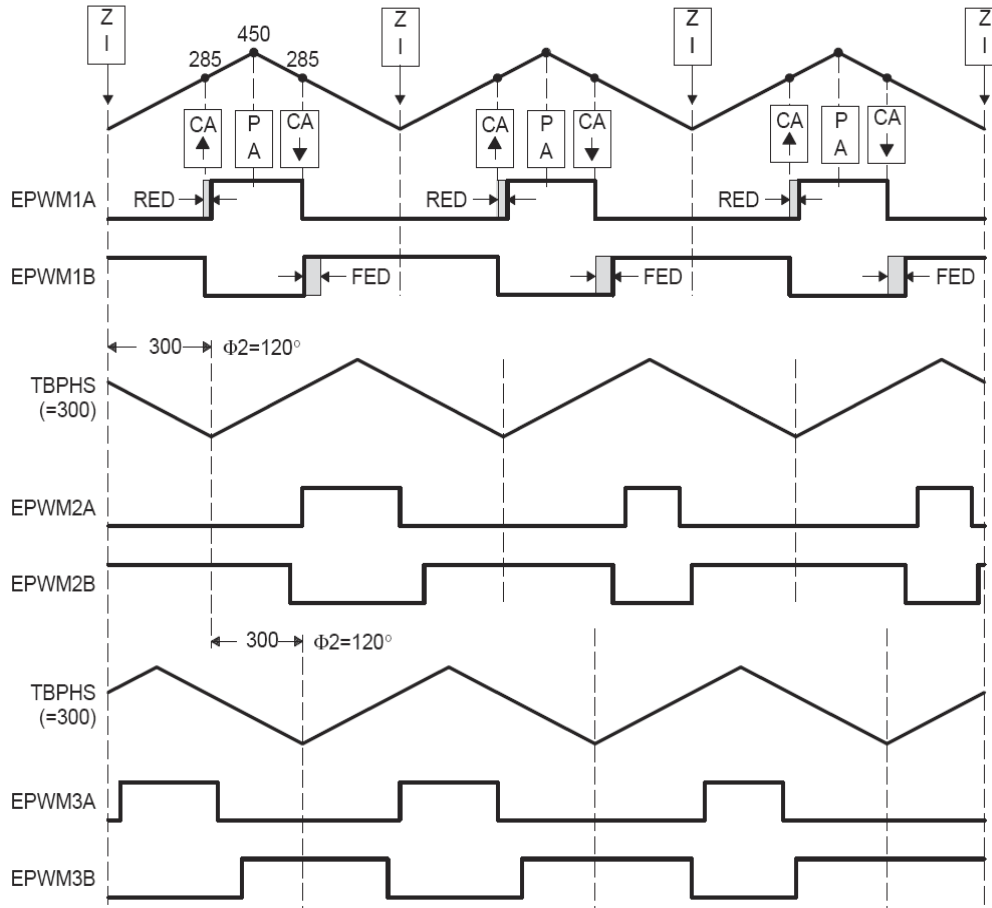


Kuva 5. Hilojen ohjaaminen käyttäen kolmea PWM moduulia, joista yksi toimii päämoduulina ja kaksi muuta orjamoduulina. Moduulit ovat synkronoituja 120° vaihe-erolla. [11]

Kolmivaihemootoria ajettaessa on vaihe-eron oltava 120° . Eri lohkoille voidaan määrittää vaihe-ero kaavan 27 mukaan.

$$TBPHS(N, M) = \left(\frac{TBPRD}{N} \right) (M - 1) \quad (35)$$

TBPRD määrää aikaan perustuvan laskurin jakson, jolla asetetaan PWM:n taajuus. N on vaiheiden kokonaismäärä ja M on laskettava vaihe. Kuvassa 6. on esitetty laskurin toiminta kolmessa eri vaiheessa.



Kuva 6. TBPRD laskurin toiminta luotaessa kolmivaiheista virtaa. Laskuri kasvaa arvoon, joka määrää taajuuden, saakka ja nollautuu. Muiden vaiheiden laskureissa on ero laskurin arvoissa, jolloin muodostuu 120° vaihe-ero. [11]

Asteina vaihe-ero saadaan yhtälöllä

$$\varphi = \frac{TBPHS}{TBPRD} \cdot 360^\circ . \quad (36)$$

4. YHTEENVETO

Käyttämällä digitaalista signaaliprosessoria voidaan toteuttaa ohjaus jännitevälipiiritaajuusmuuttajalle. Ohjaus voidaan tehdä käyttäen suorituskyvyltään huonompaa, mutta helpommin toteutettavaa, skalaariohjausta tai suorituskykyisempää vektorisäätöä. Kummassakin tapauksessa vaihtosuuntaajan IGBT -transistorien hiloja ohjataan signaaliprosessorin luomilla PWM -signaaleilla.

Skalaariohjaus toiminnaltaan on hyvin yksinkertaistettu. Siitä huolimatta se toimii tasaisesti ajattaessa kohtalaisesti ja on siis vaihtoehto taajuusmuuttajan ohjaukselle. Skalaariohjaus on hyvä lähtökohta kun lähdetään suunnittelemaan taajuusmuuttajan ohjausta. Sen avulla voidaan lähteä liikkeelle ja todeta digitaaliselle signaaliprosessorille ohjelmoidun ohjauksen toiminta. Sen avulla voidaan myös tarkistaa prosessorille lähtevien ja tulevien signaalien oikea toiminta ja käsittely.

Skalaarisäädön yksinkertaistuksen takia sitä ei kannata tutkia, koska vektorien avulla sähkömoottoria voidaan ohjata paljon tehokkaammin ja ohjauspiirien laskentatehon lisääntyessä, vektorilaskennan monimutkaisemmat laskut eivät ole enää ongelma suorittimien laskentakyvyille. Kun moottoria tarkastellaan vektoreilla, päästään jo paljon parempiin tuloksiin ohjauksen kannalta.

Vaikka vektorisäätöä on paljon tutkittu, tarvitsee se lisätutkimusta. Erityisesti tutkimusta tulisi tehdä induktiomoottorin toiminnasta alhaisilla nopeuksilla ilman tietoa moottorin toiminnasta. Erilaisia roottorin asennon estimaatteja on olemassa, mutta niistä yhdenkään kyvyt eivät riitä ohjaamaan standardia induktiomoottoria alhaisilla nopeuksilla. Poikkeus löytyy, mutta se vaatii modifioidun roottorin.

Mikroprosessorien kehitys avaa uusia mahdollisuuksia vektorisäädön kehittämiseen. Lisääntyvä nopeus ja prosessoreihin lisätyt matemaattiset laskentayksiköt mahdollistavat yhä monimutkaisempien algoritmien suorittamisen samalla mahdollistaen taajuusmuuttajan samanaikaisen ajamisen. Poistamalla erilaisia yksinkertaistuksia saavutetaan tarkempi induktiomoottorin malli, jolloin ohjauksessa tapahtuvia virheitä saadaan vähennettyä ja siten parannettua ohjausta.

Suunnitelmana on toteuttaa induktiomoottorin säätö ensin skalaariohjauksen avulla ja mahdollisesti myöhemmin vektorisäätönä. Toteutunutta ohjausta on myös mahdollista käyttää muissa sovelluksissa, kuten tasavirtalähteen käyttämisessä vaihtovirtamoottorin ohjaukseen. Tällöin jäisi tasasuuntauspiiri pois. Tasajännite vaihtosuunnattaisiin käyttäen samaa ohjaustapaa kun käytettäessä vaihtovirtalähdettä. Käytännön sovellus tällaisesta tasavirtalähteen käytöstä olisi esimerkiksi sähköauton moottorin ohjaaminen.

Työssä käytettävän mikroprosessorin monipuolisuus mahdollistaa myös muita tutkimusalueita. Se sisältää erilaisia autoteollisuudessa käytössä olevia väyliä, kuten CAN ja I2C. Prosessori ei pelkästään pystyisi ohjaamaan auton sähkömoottoria, mutta myös muita toimintoja. Standardien väylien kautta se pystyttäisiin liittämään auton muuhun ohjauselektroniikkaan.

LÄHTEET

- [1] Vas, P. (1990) Vector Control of AC machines. Oxford: Clarendon press.
- [2] Rashed, M., Goh, K. B., Dunnigan, M. W., MacConnell, P. F. A, Stronach, A. F. & Williams B. W. (2005) Sensorless second-order sliding-mode speed control of a voltage-fed induction motor drive using nonlinear state feedback. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 5, September 2005.
- [3] Holtz, J., Quan J. (2003) Drift and parameter compensated flux estimator for persistent zero stator frequency operation of sensorless controlled induction motor. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 4, July/August, 2003.
- [4] Niiranen, J. (1999) Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. 2. korjattu painos. Helsinki: Otatieto.
- [5] Bose, B. K. (2002) Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall PTR.
- [6] Vas, P., Stronach A. F. & Neuroth M. (1998) DSP-based speed-sensorless vector controlled induction motor drives using AI-based speed estimator and two current sensors. Power Electronics and Variable Speed Drives, 21-23 September 1998, Conference Publication No. 456.
- [7] Texas Instruments (2007) TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320F28332, TMS320F28235, TMS320F28234, TMS320F28232 Digital Signal Controllers Data Manual (Literature Number: SPRS439G), June 2007, Revised February 2010.
- [8] Texas Instruments (2002), C28x IQmath Library - A Virtual Floating Point Engine V1.5a, June 1 / 2009, Module user's Guide, C28x Foundation Software
- [9] Texas Instruments (2007), TMS320x2833x Analog-to-Digital Converter (ADC) Module Reference Guide, Literature Number: SPRU812A, September 2007, Revised October 2007
- [10] Texas Instruments (2004) TMS320x280x, 2801x, 2804x Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Module Reference Guide (Literature Number: SPRU791F), November 2004, Revised July 2009

- [11] Texas Instruments (2008) TMS320x2833x, 2823x Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Module Reference Guide (Literature Number: SPRUG04A), October 2008, Revised July 2009

- [12] Vuorivirta, A. (2002) Moottorimalliton skalaarisäätö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Energiatekniikan osasto. Diplomityö.