



F 1000108095B



SUOMI - FINLAND  
(FI)

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS  
PATENT- OCH REGISTERSTYRELSEN

(12) PATENTTIJULKAISU  
PATENTSKRIFT

(10) FI 108095 B

(45) Patentti myönnetty - Patent beviljats

15.11.2001

(51) Kv.lk.7 - Int.kl.7

H02P 21/00, 1/46

(21) Patenttihakemus - Patentansökning

991144

(22) Hakemispäivä - Ansökningsdag

19.05.1999

(24) Alkuperäpäivä - Löpdag

19.05.1999

(41) Tullut julkiseksi - Blivit offentlig

20.11.2000

(73) Haltija - Innehavare

1 •ABB Industry Oy, Hiomotie 13, 00380 Helsinki, SUOMI - FINLAND, (FI)

(72) Keksijä - Uppfinnare

1 •Luukko, Julius, Marjankatu 6 C 21, 53600 Lappeenranta, SUOMI - FINLAND, (FI)

(74) Asiamies - Ombud: Kolster Oy Ab  
Iso Roobertinkatu 23, 00120 Helsinki

(54) Keksinnön nimitys - Uppfinningens benämning

Tahtikoneen avoimen piirin vektorisäädön käynnistysrutiini  
Startrutin för en vektorreglering hos en synkronmaskins öppna krets

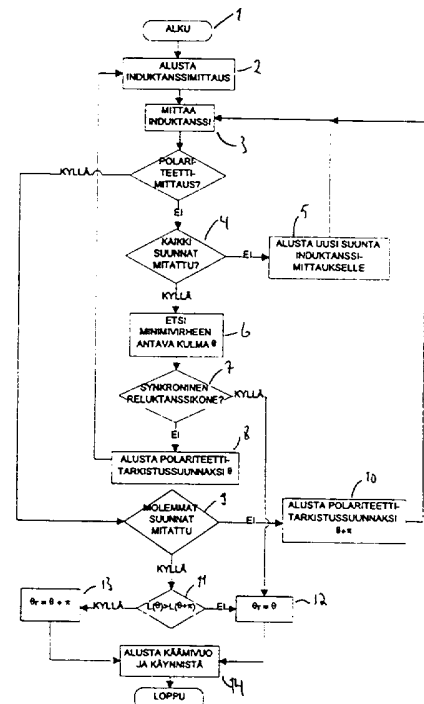
(56) Viitejulkaisut - Anförda publikationer

US A 5339012 (H02P 6/02), US A 5796235 (H02P 5/34), WO A 90/12278 (G01B 7/30)

(57) Tiivistelmä - Sammandrag

Menetelmä tahtikoneen avoimen piirin vektorisäädön käynnistämiseksi menetelmän käsittäessä vaiheet, joissa määritetään tahtikoneen staattori-induktanssimalli, mitataan (2) tahtikoneen staattori-induktanssi useassa suunnassa. Menetelmä käsittää lisäksi vaiheet, joissa sovitetaan (6) mitatut staattori-induktanssit määritettyyn staattori-induktanssimalliin minimivirheen antavien malliparametrien muodostamiseksi, tarkistetaan (11) roottorin magnetointipolariteetti roottorin magnetoinnin suunnan varmistamiseksi, alustetaan (14) avoimen piirin vektorisäädön käämivuot muodostettujen malliparametrien ja roottorinmagnetoinnin suunnan mukaisesti, ja käynnistetään tahtikone avoimen piirin vektorisäätömenetelmällä.

Ett förfarande för uppstartning av en vektorreglering i en taktmotors öppna krets, varvid sagda förfarande omfattar skeden, där en statorinduktansmodell definieras för taktmotorn och statorinduktansen för taktmotorn mätes (2) i flere riktningar. Förfarandet omfattar ytterligare skeden, där de mätta statorinduktanserna anpassas (6) till den definierade statorinduktansmodellen, för att bilda modellparametrar, vilka ger ett minimivirfel, varefter rotors magnetiseringspolaritet kontrolleras (11), för att fastställa riktningen på rotors magnetisering, lindningsflödena för vektorregleringen i den öppna kretsen formateras (14) enligt de bildade modellparametrarnas och rotormagnetiseringens riktning, varefter taktmotorn startas upp med hjälp av vektorregleringsförfarandet i den öppna kretsen.



## Tahtikoneen avoimen piirin vektorisäädön käynnistysrutiini

### Keksinnön tausta

Tämän keksinnön kohteena on menetelmä tahtikoneen avoimen piirin vektorisäädön käynnistämiseksi menetelmän käsittäessä vaiheet, joissa  
5 määritetään tahtikoneen staattori-induktanssimalli ja mitataan tahtikoneen staattori-induktanssi useassa suunnassa.

Vektorisäädöllä tarkoitetaan vaihtovirtamoottorin säätötapaa, jossa moottorin käämivuota ja vääntömomenttia voidaan säätää toisistaan riippumatta täysin kompensoidun tasavirtakoneen tapaan. Tasavirtamoottorin tapauksessa säädetään käämivuohon ja vääntömomenttiin vaikuttavia tasavirtoja,  
10 mutta vaihtovirtamoottorin tapauksessa on säädettävä sekä virtojen amplitudia että vaihekulmaa. Tällöin säädetään siis virtavektoreita, josta nimi vektorisäätö.

Vektorisäädön toteuttamiseksi on tunnettava moottorin käämivuo ja  
15 virta. Moottorin käämivuo muodostuu staattori- ja roottorivirran vaikutuksesta koneen induktansseissa. Epätahtikoneessa roottorivirta on estimoitava ja estimoinnissa tarvitaan tieto roottorin pyörimisnopeudesta. Tähän tarvitaan mitattua tai estimoitua roottorin pyörimisnopeutta. Tahtikoneessa roottorille vietään staattorimagnetoinnista riippumaton magnetointivirta tai roottorissa on  
20 kestopagneetein toteutettu magnetointi, jonka vaikutus staattorista katsoen näkyy roottorin asentokulman suunnassa. Roottorin asentokulma on tästä aiheutuvan käämivuon tuntemiseksi mitattava tai estimoitava.

Kun vaihtovirtamoottorin vektorisäädössä käytetään mitattua roottorin pyörimisnopeutta tai asentokulmaa, käytetään säätötavasta nimitystä suljetun piirin vektorisäätö. Jos pyörimisnopeus tai asentokulma estimoidaan, säätötapaa nimitetään avoimen piirin vektorisäädöksi. Toteutustavasta riippuen estimoitavana suureena voi olla roottorin kulman tai kulmanopeuden lisäksi staattorikäämivuo.

Käynnistettäessä tahtikone vektorisäädöllä, on koneen staattori-  
30 käämivuolla alkuarvo  $\psi_{s0}$ , joka riippuu roottorimagnetoinnista  $\psi_f$  ja roottorin asentokulmasta  $\theta_f$  seuraavasti:

$$\psi_{s0} = \psi_f e^{j\theta_f}.$$

35 Jännitteen  $u_s$  vaikuttaessa staattorikäämitykseen muuttuu staattorikäämivuo yhtälön

$$\psi_s = \psi_{s0} + \int_{t_1}^{t_2} (u_s - R_s i_s) dt$$

mukaisesti. Yhtälöstä nähdään, että integroitaessa staattorikämmivuota tarvitaan jännitteen ja virran arvojen lisäksi staattorikämmivuon edellinen arvo. Koneen hallittuun käynnistämiseen tarvitaan siis tieto roottorin alkuasentokulmasta. Suljetun piirin vektorisäätöä käytettäessä alkukulma mitataan, mutta avoimen piirin vektorisäädön tapauksessa alkukulma on määritettävä estimoidulla. Roottorin pyöriessä roottorikämmivuo luo sähkömotorisen voiman, jota voidaan hyödyntää normaalissa käyttötilanteessa avoimen piirin vektorisäädössä, mutta seisovan roottorin tapauksessa sähkömotorista voimaa ei ole.

Avonapaisessa tahtikoneessa, kuten esimerkiksi vierasmagnetoidussa tai kestopagneettimagnetoinnin käsittävissä tahtikoneessa tai synkronisessa reluktanssikoneessa staattori-induktanssi  $L_s$  stationaarisessa koordinaatistossa vaihtelee roottorikulman  $\theta_r$  funktiona seuraavan yhtälön

$$L_s = L_{s0} + L_{s2} \cos 2\theta_r.$$

esittämällä tavalla ja yhtälö on esitetty graafisesti kuviossa 1. Kuviosta havaitaan induktanssin vaihtelevan perusarvon  $L_{s0}$  ympärillä kaksinkertaisella roottorikulmalla induktanssikertoimen  $L_{s2}$  ilmaisemalla suuruudella. Induktanssikertoimet  $L_{s0}$  ja  $L_{s2}$  määritellään seuraavasti

$$L_{s0} = \frac{L_{sd} + L_{sq}}{2},$$

$$L_{s2} = \frac{L_{sd} - L_{sq}}{2},$$

25

missä induktanssit  $L_{sd}$  ja  $L_{sq}$  ovat tahtikoneen pitkittäinen ja poikittainen transientti-induktanssi.

Edellä esitetyn yhtälön hyödyntäminen roottorin alkukulman määrittämiseen on sinänsä tunnettua, ja se on esitetty esimerkiksi artikkeleissa S. Östlund and M. Brokemper, "Sensorless rotor-position detection from zero to rated speed for an integrated PM synchronous motor drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, pp. 1158-1165, September/October

1996 ja M. Schroedl, "Operation of the permanent magnet synchronous machine without a mechanical sensor," in *Int. Conf. on Power Electronics and Variable Speed Drives*, pp. 51-55, 1990.

Artikkelin M. Leksell, L. Harnefors, and H.-P. Nee, "Machine design considerations for sensorless control of PM motors," in *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines ICEM'98*, pp. 619-624, 1998 mukaisesti staattoriin syötetään sinimuotoisesti muuttuva jännite oletettuun roottorin pitkittäissuuntaan. Jos seurauksena on oletetussa roottorikoordinaatistossa poikittaissuuntaista virtaa, korjataan oletettua roottorikoordinaatistoa siten, että poikittaissuuntainen virta oletetussa roottorikoordinaatistossa poistuu. Viitteessä todetaan, että tahtikonetta syöttävän taajuudenmuuttajan kytkentätaajuuden tulee olla ainakin 10 kertaa syötettävän jännitteen taajuus. Tällöin esimerkiksi 5...10 kHz:n kytkentätaajuuteen pystyvällä taajuudenmuuttajalla syötettävän jännitteen maksimitaajuus on 500...1000 Hz. Tämä riittää algoritmin toimintaan. Näin suuriin kytkentätaajuuksiin päästään IGBT-taajuudenmuuttajilla, mutta suuremmilla tehoilla tarvittavilla GTO- tai IGCT-tehokytkimisillä taajuudenmuuttajilla maksimikytkentätaajuus on alle 1 kHz. Alkukulmaestimoinnin syöttöjännitteen maksimitaajuus jää silloin alle 100 Hz:n. Näin pienellä taajuudella kone tuottaa jo vääntömomenttia ja algoritmin tarkuus kärsii huomattavasti.

Viitteessä M. Schroedl, 1990 alkukulma lasketaan suoraan yhdestä induktanssimittauksesta, tai jos käytetään useampaa mittausta, lisätietoa hyödynnetään eliminoimalla induktanssiparametrit. Menetelmän heikkoutena on mittauksessa väistämättä tapahtuvan virheen suuri vaikutus. Esimerkki todellisesta induktanssimittauksesta eräällä kestopagneetikoneella roottorin kulmilla  $\theta_r = [0, \dots, 2\pi]$  on esitetty kuviossa 2. Kuvioista havaitaan suuria poikkeamia teoreettisesti sinikäyrästä. Induktanssimittaus tapahtuu siten, että staattoriin syötetään virtapulssi, josta aiheutuvan käämivuon perusteella lasketaan induktanssi. Virhettä voi aiheutua virran mittauksen virheestä ja siitä, että mitausvirta aiheuttaa roottoria heilauttavaa vääntömomenttia.

Induktanssin lausekkeesta stationaarisessa koordinaatistossa saadaan johdettua lauseke roottorin kulmalle

$$\theta_r = \frac{1}{2} \arccos \frac{L_s - L_{s0}}{L_{s2}} + n\pi,$$

missä  $n$  on kokonaisluku. Mitatun  $L_s$ :n virheen vaikutusta voidaan tutkia derivoimalla  $\theta_r$   $L_s$ :n suhteen:

$$\frac{d\theta_r}{dL_s} = -\frac{1}{2L_{s2}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{L_s - L_{s0}}{L_{s2}}\right)^2}}.$$

5

Tästä voidaan laskea virhearvio kulmalle

$$\Delta\theta_r \approx \frac{d\theta_r}{dL_s} \Delta L_s.$$

Havaitaan, että

10

$$\Delta\theta_r \rightarrow \infty, \text{ kun } \frac{L_s - L_{s0}}{L_{s2}} \rightarrow 1.$$

Edellä olevasta havaitaan, että pitkittäisen ja poikittaisen suunnan välisen induktanssieron ollessa pieni kulman virhearvio lähenee ääretöntä. Toisin sanoen, induktanssimittauksiin perustuva roottorin alkukulman määrittäminen muuttuu sitä epäluotettavammaksi, mitä lähempänä toisiaan roottorin pitkittäisen ja poikittaisen induktanssin suuruudet ovat.

Viitteen S. Östlund, M. Brokemper esittelemässä menetelmässä roottorikulmaa ei lasketa suoraan, vaan pyritään etsimään induktanssin minimi aloittamalla induktanssien mittaus eri suuntiin ensin harvalla välillä ja minimiä kohti mentäessä peräkkäisten mittausten kulmaeroa pienentämällä. Vaikka artikkelissa ei sitä mainitakaan, menetelmä tarttuu helposti mittausvirheiden aiheuttamiin näennäisiin minimeihin ja virheeksi voi siksi jäädä vaikka miten suuri arvo.

Edellä esitetyn perusteella induktanssimittausten virheiden merkitystä tulisi jollain tavalla pienentää. Yhtenä menetelmänä voisi käyttää useampaa mittausta kuhunkin suuntaan ja keskiarvon laskemista mitatuista induktansseista, mutta tällä tavoin meneteltynä ei kuitenkaan saada eliminoitua systemaattisen virheen vaikutusta.

30

### Keksinnön lyhyt selostus

Tämän keksinnön tarkoituksena on aikaansaada menetelmä, joka välttää edellä mainitut epäkohdat, ja mahdollistaa tahtikoneen avoimen piirin vektorisäädön käynnistämisen luotettavalla tavalla. Tämä tarkoitus saavutetaan keksinnön mukaisella menetelmällä, jolle on tunnusomaista se, että menetelmä käsittää vaiheet, joissa sovitetaan mitatut staattori-induktanssit määritettyyn staattori-induktanssimalliin minimivirheen antavien malliparametrien muodostamiseksi, tarkistetaan roottorin magnetointipolariteetti roottorin magnetoinnin suunnan varmistamiseksi, alustetaan avoimen piirin vektorisäädön käämivuot muodostettujen malliparametrien ja roottorimagnetoinnin suunnan mukaisesti, ja käynnistetään tahtikone avoimen piirin vektorisäätömenetelmällä.

Keksinnön mukainen menetelmä perustuu siihen ajatukseen, että mitataan staattori-induktanssin suuruutta useaan eri suuntaan ja sovitetaan mittausten tuloksena saadut induktanssiarvot koneen induktanssimalliin. Sovituksen tuloksena saadaan erittäin tarkka tieto tahtikoneen roottorin alkukulmasta. Lisäksi keksinnön mukaista menetelmää hyödyntämällä saadaan tieto roottorimagnetoinnin alkuarvosta stationaarisessa koordinaatistossa, jolloin koneen käynnistäminen voidaan suorittaa luotettavalla tavalla ilman transienttejä tai nykivää käynnistymistä.

### Kuvioiden lyhyt selostus

Keksintöä selostetaan nyt lähemmin edullisten suoritusmuotojen yhteydessä, viitaten oheisiin piirroksiin, joissa:

- Kuvio 1 esittää staattori-induktanssin  $L_s$  kuvaajaa kulman funktiona;
- Kuvio 2 esittää mitattuja staattori-induktanssin suuruuksia kulman funktiona;
- Kuvio 3 esittää koordinaatistojen välisiä suhteita;
- Kuvio 4 esittää staattori-induktanssin mittausten järjestystä; ja
- Kuvio 5 esittää vuokaaviota keksinnön mukaisesta käynnistysrutinista.

### Keksinnön yksityiskohtainen selostus

Keksinnön mukaisesti tahtikoneen avoimen piirin vektorisäädön käynnistäminen käsittää aluksi vaiheen, jossa määritetään tahtikoneen staattori-induktanssimalli  $L_s = L_{s0} + L_{s2} \cos 2\theta_r$ . Yhtälössä esitetään induktanssin riippuvuus roottorin kulmasta stationaarisessa koordinaatistossa. Yhtälö ilmaisee

siis, miten, staattorikoordinaatiston  $x$ -akselin suunnassa mitattu induktanssi muuttuu pyöritettäessä roottoria kulman  $\theta_r$ .

Haluttaessa määrittää roottorin alkukulma ei roottoria voida pyörit-  
tää induktanssin mittaamiseksi eri roottorin asentokulmilla. Sen sijaan pyörite-  
tään staattorikoordinaatistoa siihen kulmaan, jonka suunnassa induktanssi mi-  
tataan. Tätä pyöritettävää staattorikoordinaatistoa kutsutaan virtuaaliseksi  
staattorikoordinaatistiksi. Kuviossa 3 on havainnollistettu eri koordinaatistoja  
ja koordinaatistoja on merkitty siten, että staattorikoordinaatisto on koordinaa-  
tisto  $xy$ , virtuaalinen staattorikoordinaatisto on  $x'y'$  sekä roottorikoordinaatisto  
dq.

Induktanssimalliksi virtuaalisessa staattorikoordinaatistossa voidaan kirjoittaa silloin

$$\begin{aligned} L_s &= L_{s0} + L_{s2} \cos[2(\theta_r - \lambda)] = L_{s0} + L_{s2} \cos[2(\lambda - \theta_r)] \\ &= L_{s0} + L_{s2} \cos(2\lambda + \varphi), \end{aligned}$$

missä  $\theta_r$  on roottorin kulma stationaarisessa koordinaatistossa,  $\lambda$  virtuaalisen koordinaatiston kulma ja  $\theta_r - \lambda$  roottorin kulma virtuaalisessa koordinaatistossa. Ottamalla käyttöön parametri  $\varphi = -2\theta_r$  saadaan tutkittavia yhtälöitä yksinkertaisempaan muotoon. Haluttu roottorikulma stationaarisessa koordinaatistossa on siten

$$\theta_r = -\frac{\varphi}{2}.$$

Kuvion 5 vuokaavioon viitaten keksinnön mukaisesti induktanssimittauksen alustuksen 2 jälkeen mitataan 3 tahtikoneen staattori-induktanssi useassa suunnassa. Staattori-induktanssin mittaaminen tapahtuu edullisesti siten, että staattoriin syötetään virtapulssin muodostava jännitepulssi, josta aiheutuvan käämivuon perusteella saadaan laskettua induktanssin suuruus. Staattori-induktanssin mittaaminen voidaan suorittaa esimerkiksi kuuteen suuntaan. Nämä kuusi jännitevektoria ovat helposti toteutettavissa vaihtosuuntaajilla, sillä vektorit vastaavat vaihtosuuntaajan kytkinkombinaatioita, joissa kolmivaiheisen staattorin jokaisen kahden navan väliin tuotetaan positiivinen ja negatiivinen jännite. Kuviossa 4 esitetään havainnollisella tavalla kuusi virta-vektoria ja niiden keskinäinen suositeltava järjestys induktanssin mitta-

uksen yhteydessä. Tarkkuuden parantamiseksi kuhunkin suuntaan voidaan tehdä useita mittauksia. Jotta roottorin kääntymisen mahdollisuutta voidaan pienentää, suoritetaan mittaukset kuvion 4 esittämässä järjestyksessä eli aloitetaan suunnassa  $0^\circ$ , sitten siirrytään suuntaan  $180^\circ$ , sitten suuntaan  $60^\circ$ , ja niin edelleen, kunnes kaikki suunnat on mitattu. Kuviossa 2 esitetään staattori-induktanssin mitattuja arvoja erisuuruksilla roottorikulman arvoilla. Kuvion 5 esittämässä vuokaaviossa induktanssimittauksen 3 jälkeen tarkastetaan 4, onko kaikkien mitattavaksi määritettyjen suuntien induktanssit mitattu, ja mikäli näin ei ole, alustetaan 5 uusi suunta induktanssimittaukselle kuvion 4 mukaisesti.

Keksinnön mukaisesti sovitetaan 6 mitatut staattori-induktanssit määritettyyn staattori-induktanssimalliin minimivirheen antavien malliparametrien muodostamiseksi. Mittausdatan sovittaminen malliin suoritetaan edullisesti käyttämällä pienimmän neliösumman menetelmää (PNS). PNS-menetelmässä mitattavalle suurelle muodostetaan malli, johon mitattava data sovitetaan siten, että neliösumma minimoituu. Neliösummalla tarkoitetaan mitattujen arvojen ja vastaavien mallin arvojen erotuksen neliöiden summaa. Jos malli on lineaarinen, mallin parametrit voidaan ratkaista suljetussa muodossa, mutta epälineaarisisessa tapauksessa kyseessä on numeerisesti ratkaistava epälineaarinen optimointitehtävä.

Epälineaarinen PNS-menetelmässä minimoidaan funktio

$$F(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^m [f_i(\mathbf{a})]^2 = \sum_{i=1}^m f_i(\mathbf{a})f_i(\mathbf{a}) = \langle \mathbf{f}(\mathbf{a}), \mathbf{f}(\mathbf{a}) \rangle = [\mathbf{f}(\mathbf{a})]^2$$

missä

$m$  on näytteiden (mittausten) lukumäärä

$f_i = y_i - M(t_i, \mathbf{a})$  epälineaarisen mallin  $M$  ja mittausdatan  $(t_i, y_i)$

erotus

$\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots \ a_n]^T \in \mathcal{R}^n$  mallin parametrit

$\mathbf{f}(\mathbf{a}) = [f_1(\mathbf{a}) \ f_2(\mathbf{a}) \ \dots \ f_m(\mathbf{a})]^T$  funktioiden  $f_n$  muodostama vektori  
 $\langle \cdot \rangle$  tarkoittaa sisätuloa.

Numeerisessa ratkaisussa tarvittava funktion  $F(\mathbf{a})$  gradientti on

$$\nabla F(\mathbf{a}) = 2J(\mathbf{a})^T \mathbf{f}(\mathbf{a})$$



missä  $J(\mathbf{a})$  on funktion  $f(\mathbf{a})$  Jacobin matriisi.

Menetelmän tapauksessa merkitään induktanssimallia  $M$ :llä ja sen parametreja  $a_1$ ,  $a_2$  ja  $a_3$

5

$$y = M(t, \mathbf{a}) + \varepsilon = a_1 + a_2 \cos(2t + a_3) + \varepsilon,$$

missä  $y = L_s$  on virtuaalisessa koordinaatistossa mitattu induktanssi,  $t = \lambda$  on virtuaalisen koordinaatiston kulma eli mittaussuunta stationaarisessa koordinaatistossa,  $\varepsilon$  on mittausvirhetermi ja

10

$$\mathbf{a} = [a_1 \quad a_2 \quad a_3]^T = [L_{s0} \quad L_{s2} \quad \varphi]^T \text{ on mallin parametrivektori.}$$

Mallin parametrien ratkaisemiseen voidaan käyttää tunnettua liitto-  
15 gradienttimenetelmää. Menetelmän toteuttaminen yleisesti käytetyillä DSP-  
prosessoreilla on kuitenkin hankalaa ja siksi kannattaa käyttää hyödyksi tietoa,  
että

$$L_{s0} = \frac{L_{sd} + L_{sq}}{2},$$

$$L_{s2} = \frac{L_{sd} - L_{sq}}{2},$$

20

missä induktanssit  $L_{sd}$  ja  $L_{sq}$  ovat tahtikoneen pitkittäinen ja poikittainen transientti-induktanssi.

Yksinkertaistetaan induktanssimallia olettamalla transientti-  
induktanssit  $L_{sd}$  ja  $L_{sq}$  etukäteen tunnetuiksi. Transientti-induktanssit voidaan  
25 mitata käytön käyttöönoton yhteydessä kääntämällä roottori ensin pitkittäis-  
sentoon syöttämällä staattoriin tasavirtaa. Kun roottori on kääntynyt pitkittäis-  
sentoon staattoriin syötetään pitkittäis- ja poikittaissuuntiin askelmaiset jänni-  
tepulssit, joista aiheutuvien virtojen perusteella lasketaan induktanssit. Toinen  
vaihtoehto on käyttää käynnistysrutiinia siten, että minimivirheen antavan kul-  
30 man selvittämisen sijasta selvitetään minimivirheen antavat parametrit  $L_{s0}$  ja  
 $L_{s2}$ .

Yksinkertaistetuksi induktanssimalliksi saadaan

$$y = M(t, a) + \varepsilon = L_{s0} + L_{s2} \cos(2t + a) + \varepsilon.$$

- Ratkaistavaksi tällöin jää ainoastaan parametri  $a$ , jolloin ratkaisuun käytettävää algoritmia voidaan yksinkertaistaa huomattavasti. Ratkaisussa tarvittava edellä mainittu tunnettu gradientti yksinkertaistuu silloin tavalliseksi derivaataksi seuraavan yhtälön mukaisesti

$$\nabla F(\mathbf{a}) = \frac{d}{da} \left\{ \sum_{i=1}^m [f_i(a)]^2 \right\} = 2 \sum_{i=1}^m \frac{df_i(a)}{da} f_i(a),$$

- 10 missä

$$\frac{df_i(a)}{da} = -\frac{dM(t_i, a)}{da} = L_{s2} \sin(2t_i + a),$$

$f_i = y_i - M(t_i, a)$  on mallin  $M$  ja datan  $(t_i, y_i)$  erotus ja  $m$  on datan lukumäärä.

- 15 Kyseessä on siis yhden muuttujan funktion minimointi, joka voidaan toteuttaa prosessorilla yksinkertaisesti esimerkiksi laskemalla kohdefunktion  $M$  arvoa tietyllä askelella ja valitsemalla pienimmän arvon tuottava  $a$ . Pienimmän arvon tuottava  $a$  on kyseisessä yksinkertaistetussa tapauksessa alkukulmaratkaisu, eli tieto tahtikoneen roottorin kulma-asennosta.

- 20 Koska staattori-induktanssi on funktio kaksinkertaisesta roottorikulmasta, edellä esitetty ratkaisu on vasta ehdokas roottorikulmaksi. On myös mahdollista, että ratkaisu on tämä ratkaisuehdokas + 180°. Ei siis tiedetä varmasti löydettiinkö roottorimagnetoinnin tai kestopagneetin pohjois- vai etelänavan suunta.

- 25 Polariteetin selvittämiseksi hyödynnetään keksinnön mukaisesti sitä, että roottorimagnetointi kyllästää pitkittäisen induktanssin. Vastamagnetoidaessa staattorivirralla vuontiheys pienenee ja kyllästys pienenee, myötämagnetoidaessa tapahtuu päinvastoin. Pitkittäinen induktanssi on siten erisuuri suuntaan 0° ja 180°. Ratkaisuehdokkaan löydyttyä roottorimagnetoinnin polariteetti voidaan siten selvittää mittaamalla induktanssi vielä kerran ratkaisuehdokkaan suuntaan 8 sekä 180° siitä 10. Kun molempien suuntien induktanssit on mitattu 9, valitaan 11, 12, 13 näistä induktansseista pienempi oikeaksi roottorikulmaksi.

Mikäli käytettävä tahtikone on synkroninen reluktanssikone 7, ei koneen rakenteen vuoksi tarvitse selvittää koneen napojen polaarisuutta.

Edellä esitetyt induktanssimallit eivät ottaneet huomioon pitkittäisen induktanssin kyllästymistä, joten kestopagneetin polariteetti piti erikseen selvittää. Induktanssin kyllästyminen voidaan ottaa kuitenkin jo mallissa huomioon, jonka seurauksena roottorin asentokulma saadaan tietoon ilman erillistä polariteetin tarkastusvaihetta. Olettamalla, että pitkittäinen induktanssi muuttuu lineaarisesti pitkittäisen virran funktiona pitkittäiselle induktanssille voidaan kirjoittaa

10

$$L_{sd} = L_{sd0} + k \cdot i_{sd},$$

missä  $k$  on induktanssin kulmakerroin ja  $L_{sd0}$  sen arvo, kun  $i_{sd} = 0$ . Syöttämällä staattoriin virta staattorikoordinaatiston x-akselin suunnassa, jolloin  $i_{sy} = 0$ , saadaan roottorikoordinaatistossa kyseiseksi virraksi

15

$$i_{sd} = i_{sd} \cos \theta_r.$$

Staattori-induktanssi on silloin

20

$$\begin{aligned} L_s &= \frac{L_{sd} + L_{sq}}{2} + \frac{L_{sd} - L_{sq}}{2} \cos 2\theta_r \\ &= \frac{L_{sd0} + L_{sq}}{2} + \frac{L_{sd0} - L_{sq}}{2} \cos 2\theta_r + \frac{k}{2} i_{sx} \cos \theta_r + \frac{k}{2} i_{sx} \cos \theta_r \cos 2\theta_r. \end{aligned}$$

Aikaisemmin esitetyllä tavalla korvataan  $\theta_r \rightarrow \lambda - \theta_r$ , jolloin saadaan parannettu kyllästymisen huomioon ottava induktanssimalli

25

$$y = M(t, \mathbf{a}) + \varepsilon = a_1 + a_2 \cos(t + a_4/3) + (a_3 + a_2 \cos(t + a_4/3)) \cos(2t + a_3) + \varepsilon,$$

missä parametrit  $a_n$  ovat

30

$$\mathbf{a} = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4]^T = \left[ \frac{L_{sd0} + L_{sq}}{2} \quad \frac{k}{2} i_{sx} \quad \frac{L_{sd0} - L_{sq}}{2} \quad \varphi \right]^T.$$

Ennalta tunnettujen parametrien määrästä riippuen ratkaisua voidaan yksinkertaistaa edellä kuvaillulla tavalla.

Kun roottorin suunta on saatu selvitettyä keksinnön mukaisesti suoritetaan 14 käämivoiden alustus roottorin suunnan mukaisesti. Alustuksen tarkoituksena on adaptoida vaihtosuuntaajan ohjausjärjestelmät tahtikoneessa vallitsevaan tilanteeseen. Alustuksen jälkeen tahtikone voidaan käynnistää  
5 luotettavalla tavalla käyttäen hyväksi jotain tunnettua avoimen piirin vektorisäättömenetelmää.

Alan ammattilaiselle on ilmeistä, että tekniikan kehittyessä keksinnön perusajatus voidaan toteuttaa monin eri tavoin. Keksintö ja sen suoritusmuodot eivät siten rajoitu yllä kuvattuihin esimerkkeihin vaan ne voivat vaihdella patenttivaatimusten puitteissa.  
10

### Patenttivaatimukset

1. Menetelmä tahtikoneen avoimen piirin vektorisäädön käynnistämiseksi menetelmän käsittäessä vaiheet, joissa

määritetään tahtikoneen staattori-induktanssimalli,

5 mitataan (2) tahtikoneen staattori-induktanssi useassa suunnassa, t u n n e t t u siitä, että menetelmä käsittää lisäksi vaiheet, joissa

sovitetaan (6) mitatut staattori-induktanssit määritettyyn staattori-induktanssimalliin minimivirheen antavien malliparametrien muodostamiseksi,

10 tarkistetaan (11) roottorin magnetointipolariteetti roottorin magnetoinnin suunnan varmistamiseksi,

alustetaan (14) avoimen piirin vektorisäädön käämivuot muodostettujen malliparametrien ja roottorinmagnetoinnin suunnan mukaisesti, ja

käynnistetään tahtikone avoimen piirin vektorisäätömenetelmällä.

2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, 15 että tahtikoneen staattori-induktanssin mittaaminen useassa suunnassa käsittää vaiheet, joissa

syötetään tahtikoneen staattoriin jännitepulssi useassa eri suunnassa,

20 lasketaan eri suuntiin syötettyjen jännitepulssien, jännitepulssien aiheuttamien virtojen ja staattori-resistanssiin perustuen vastaavan suuntaiset käämivoiden suuruudet, ja

lasketaan käämivoiden ja virtojen suuruuksista vastaavansuuntaiset staattori-induktanssit.

3. Patenttivaatimuksen 1 tai 2 mukainen menetelmä, t u n n e t t u 25 siitä, että mitattujen staattori-induktanssien sovittaminen määritettyyn staattori-induktanssimalliin käsittää vaiheen, jossa

sovitetaan mitatut staattori-induktanssit pienimmän neliösumman menetelmällä staattori-induktanssimalliin malliparametrien aikaansaamiseksi malliparametrien käsittäessä roottorin alkukulmaratkaisun.

30 4. Patenttivaatimuksen 1, 2 tai 3 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että roottorin magnetointipolariteetin tarkistaminen käsittää vaiheet, joissa

35 mitataan staattori-induktanssi minimivirheen antavien malliparametrien sisältävän roottorin alkukulmaratkaisun suuntaan sekä suuntaan 180 sähköastetta alkukulmaratkaisusta,

valitaan (11) alkukulmaksi mitatuista induktansseista pienemmän staattori-induktanssin omaava kulma.

**Patentkrav**

1. Förfarande för igångsättning av en vektorreglering i en synkron-  
motors öppna krets, varvid förfarandet omfattar skeden, där  
en statorinduktansmodell definieras för synkronmotorn,  
5 statorinduktansen för synkronmotorn mäts (2) i flera riktningar,  
k ä n n e t e c k n a t av att förfarandet dessutom omfattar skeden, där  
de uppmätta statorinduktanserna anpassas (6) till den definierade  
statorinduktansmodellen för att bilda modellparametrar som ger ett minimifel,  
rotorns magnetiseringspolaritet kontrolleras (11) för att fastställa  
10 riktningen på rotorns magnetisering,  
lindningsflödena för vektorregleringen i den öppna kretsen formatte-  
ras (14) enligt de bildade modellparametrarna och rotormagnetiseringens rikt-  
ning och  
synkronmotorn sätts igång med vektorregleringsförfarandet i den  
15 öppna kretsen.
2. Förfarande enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a t av att mät-  
ningen av synkronmaskinens statorinduktans i flera riktningar omfattar skeden,  
där  
en spänningspuls matas till synkronmotorns stator i flera olika rikt-  
20 ningar,  
storheter för spänningspulserna matade i olika riktningar och för  
strömmarna förorsakade av spänningspulserna beräknas och storheter med  
motsvarande riktningar baserande sig på statorresistansen beräknas för lind-  
ningsflödena och  
25 statorinduktanser med motsvarande riktning beräknas utgående  
från lindningsflödenas och strömmarnas storheter.
3. Förfarande enligt patentkrav 1 eller 2, k ä n n e t e c k n a t av att  
anpassningen av de uppmätta statorinduktanserna till den definierade stator-  
induktansmodellen omfattar ett skede, där  
30 de uppmätta statorinduktanserna anpassas med den minsta kvad-  
ratsummans förfarande till statorinduktansmodellen för att åstadkomma mo-  
dellparametrar, varvid modellparametrarna omfattar rotorns utgångsvinkellös-  
ning.
4. Förfarande enligt patentkrav 1, 2 eller 3, k ä n n e t e c k n a t av  
35 att kontrollen av rotorns magnetiseringspolaritet omfattar skeden, där  
statorinduktansen mäts i riktning med rotorns utgångsvinkellösning

innehållande modellparametrarna som ger minimifelet samt i en riktning av 180 elektriska grader från utgångsvinkellösningen,  
som utgångsvinkel väljs (11) vinkeln med den minsta statorinduktansen från de uppmätta induktanserna.



1/3

108095

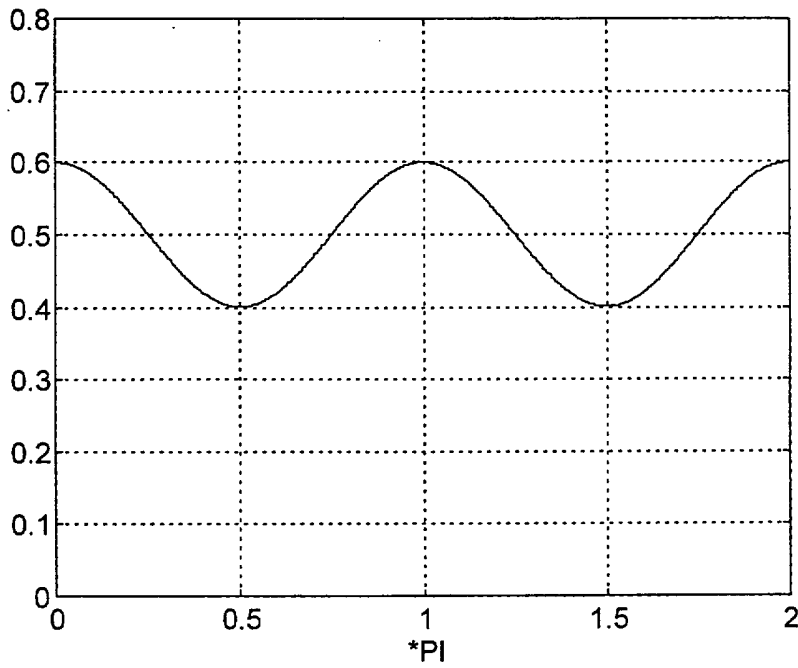


FIG. 1

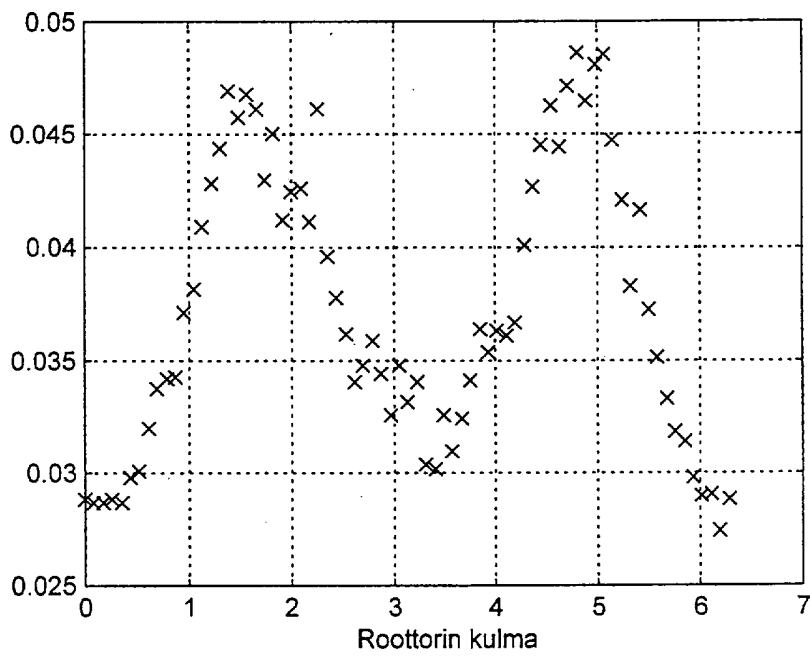


FIG. 2

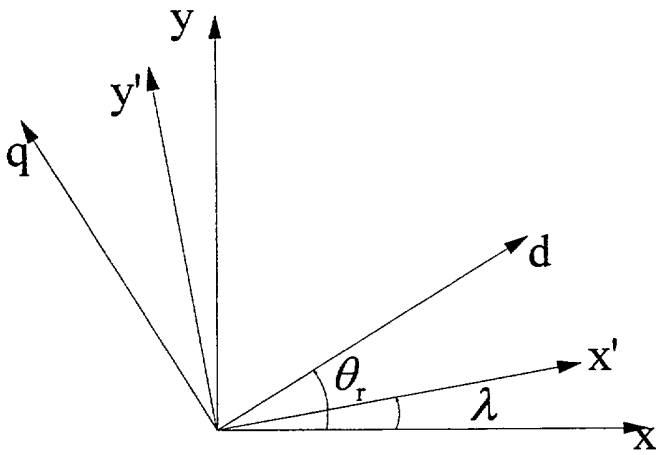


FIG. 3

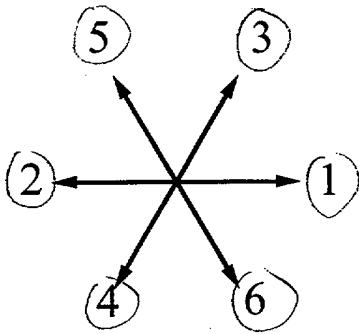


FIG. 4

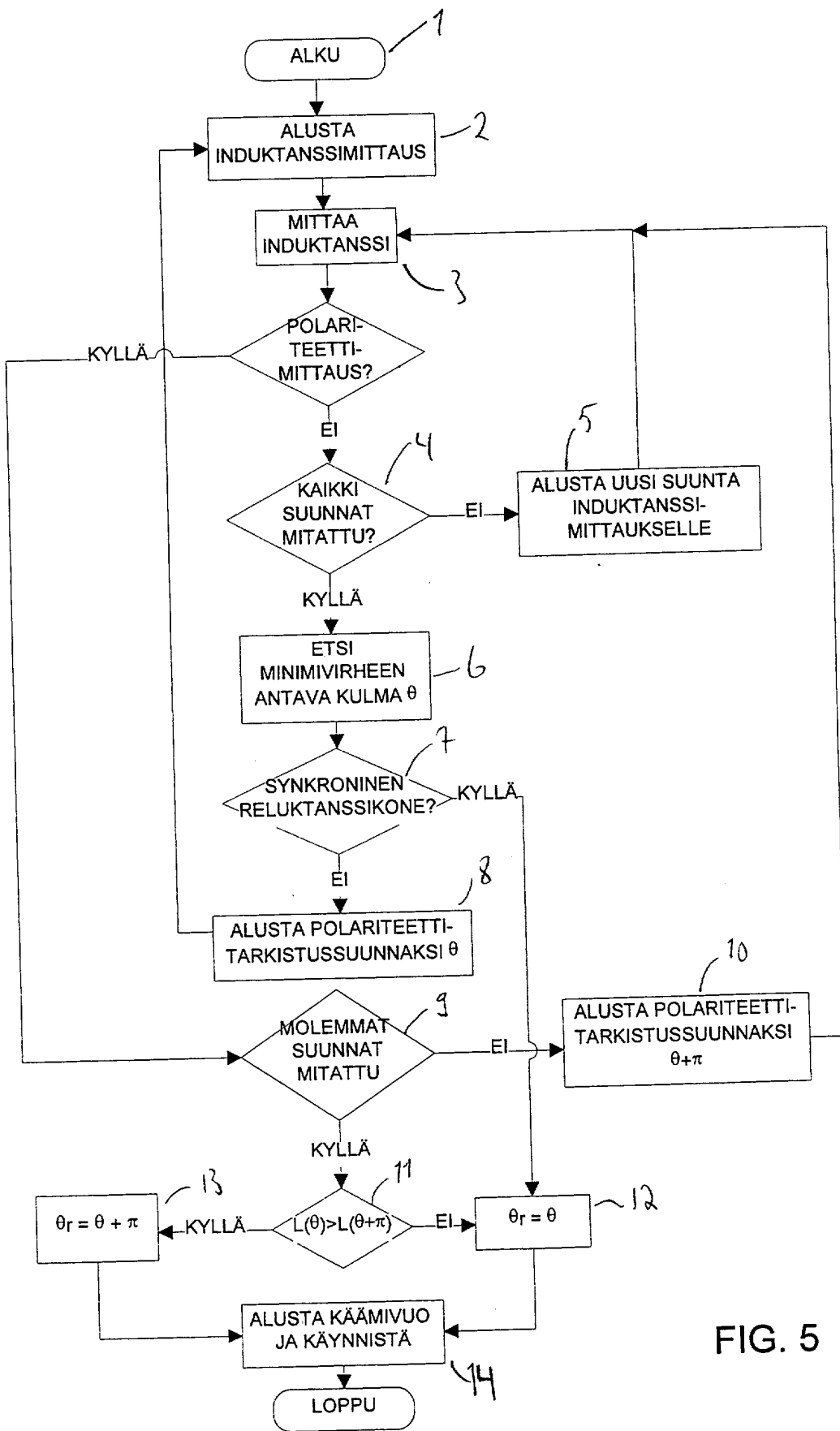


FIG. 5