



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 30 551 B4** 2005.07.21

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **103 30 551.3**
 (22) Anmeldetag: **05.07.2003**
 (43) Offenlegungstag: **10.02.2005**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **21.07.2005**

(51) Int Cl.7: **H02P 21/00**
H02P 6/18, H02K 41/02

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden.

(71) Patentinhaber:
Fachhochschule Flensburg, 24943 Flensburg, DE

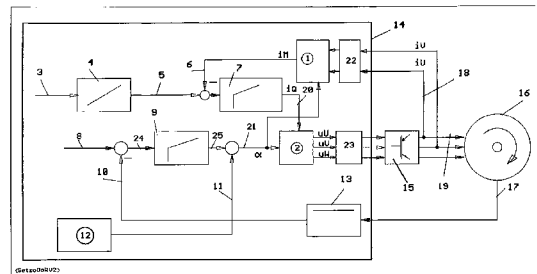
(74) Vertreter:
BOEHMERT & BOEHMERT, 24105 Kiel

(72) Erfinder:
Blöadow, Friedrich, Prof. Dr.-Ing., 24943 Flensburg, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
DE 196 04 701 C1
EP 07 84 378 A2

(54) Bezeichnung: **Bestimmung der Startkommutierung in Synchron-Servo-Antrieben**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Bewirkung der Startkommutierung von Synchron-Servo-Antrieben mittels zweier verkoppelter Regelkreise: eines Stromregelkreises sowie eines Winkelregelkreises, wobei über eine mit diesen verknüpfte minimierte Clarke-Park-Transformation (1,2) eine Kopplung des Stromregelkreises über den Querstrom i_Q erfolgt und eine Kopplung des Winkelregelkreises zum Stromregelkreis über den Feldwinkel α erfolgt, die mit dem Stromregelkreis verknüpfte Clarke-Park-Transformation (1) als Eingang zwei Phasenströme (i_U, i_V) und den Feldwinkel α und als Ausgang den Motorstromvektor i_M beinhaltet und die mit der Winkelregelung verknüpfte Clarke-Park-Transformation (2) als Eingang den Feldwinkel α und den Querstrom i_Q und als Ausgang die Strangspannungen u_U, u_V, u_W beinhaltet, der Winkelregelkreis ein inkrementelles Positionssensorsignal (13) beinhaltet, der Stromregelung (7) ein rampenförmiger Sollwert (5) vorgegeben ist, der Winkelregelung (9) ein konstanter Winkelsollwert (8) vorgegeben ist, die in ihrer Dynamik gegenüber der Dynamik der Stromregelung (7) schneller ausgelegte Winkelregelung (9) das durch die Stromregelung (7) beaufschlagte Signal (20) durch Drehung...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Startkommutierung in rotatorischen wie linearen Synchron- und Reluktanz-Servo-Antrieben mit Hilfe zweier gekoppelter Regelkreise.

[0002] Gleichstrom-Maschinen besitzen einen Kollektor und zwei oder mehrere Bürsten die als Stromwender [Kommutator] dienen. Dieser Kommutator sorgt in der Gleichstrom-Maschine dafür, dass der Strom stets so durch die Wicklungen im Anker fließt, dass sich die aus dem Strom entstehenden Magnetfelder anziehen, damit ein Drehmoment erzeugen und so die Motorwelle in Drehung versetzen. Bei Synchron-Servo-Antrieben, die heute die Gleichstrommaschinen wegen einiger entscheidender Vorteile [ca. 50% kleineres Bauvolumen bei gleicher Leistung, wartungsfrei hinsichtlich der Bürsten u. a. m.] weitestgehend verdrängt haben, fehlt dieser Kommutator. Dieser Kommutator muss in dem Servo-Verstärker, einer komplexen Elektronik, in dem auch die Stromregelung, die Drehzahlregelung und Positionsregelung des Synchron-Servo-Antriebes – heute nahezu stets mit Hilfe der Clarke-Park-Transformation realisiert – nachgebildet werden. Zur Nachbildung des Kommutators benötigt die Elektronik des Servo-Verstärkers beim Einschalten zunächst die Rotorposition relativ zum Stator, im Folgenden Startkommutierung genannt. Diese Information kann ein Messsystem mit entsprechenden Kosten liefern, oder es wird das Verfahren nach Patent DE 196 04 701 C1 eingesetzt, das zusätzliche Hardware benötigt.

Stand der Technik

[0003] Ebenfalls bekannt ist ein Verfahren zur Initialisierung der Startkommutierung für einen Synchronmotor mit Inkrementalgeber, der in der Druckschrift EP 0 784 378 A2 offenbart ist, bei dem ein Lageregler und ein Stromregler verwendet werden, wobei mit dem Lageregler die Motorbewegung auf Grund der Kommutierungsinitialisierung minimiert wird. Es wird also eine aus momentbildender und flussbildender Komponente bestehende Größe in Richtung des geschätzten Rotorlagewinkels eingepreßt, indem die momentanbildende Komponente zu null und die flussbildende Komponente zu einem Wert größer null geschätzt wird. Im Falle einer Abweichung des Schätzwertes des Rotorlagewinkels vom tatsächlichen Rotorlagewinkel wird ein Drehmoment erzeugt, welches eine Bewegung des Rotors in Richtung auf die geschätzte Rotorlage hervorruft. Es ist also im ungünstigen Schätzfall eine Winkelbewegung des Rotors erforderlich, die es nicht erlaubt, ihn aus dem Stillstand – also im festgebremsten Zustand – zu starten.

[0004] Nachteilig am Stand der Technik ist, dass die Realisierung in Form einer zusätzlichen Hardware, die je nach Daten des elektrischen Antriebes, hardwaremäßig angepasst werden muss, und dass die elektrische Maschine zweimal eine unkontrollierte Bewegung im Millimeterbereich ausführen können muss, und damit sind die Verfahren bei angezogener Bremse nicht funktionstüchtig. Weiterhin nachteilig ist, dass die aus der unkontrollierten Bewegung resultierende Positionsänderung nach der Findung der Startkommutierung erhalten bleibt, und die in dem Servoverstärker ohnehin für eine Vektorregelung über die Clarke-Park-Transformation notwendigen implementierten mathematischen Gleichungen nicht für die Findung der Startkommutierung benutzt werden, was den zusätzlichen Hardwareaufwand erforderlich macht.

Aufgabenstellung

[0005] Aufgabe der Erfindung ist es, ein einfaches Verfahren zu schaffen, das es ermöglicht, bei minimaler dynamischer Bewegungsfreiheit und null Bewegungsfreiheit im stationären Endwert, unter Ausnutzung der ohnehin in jedem vektorkontrollierten elektrischen Antrieb befindlichen Hard- und Software, die Startkommutierung zu ermitteln und nach Herstellung der Startkommutierung den elektrischen Antrieb mittels der elektromotorischen Kraft in der Stellung zu halten, in der sich der elektrische Antrieb vor dem Start zur Findung der Startkommutierung befand.

[0006] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst, die Unteransprüche geben vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung an.

[0007] Dies ist z. B. bei Werkzeugmaschinen mit einer Z-Achse von besonderer Wichtigkeit, da diese mit Vorteil nicht mehr durch Gegengewichte oder Federn, die die Dynamik der Maschine negativ beeinflussen, an unkontrollierten Bewegungen gehindert werden, sondern die ohnehin vorhandene Bremse bleibt während des Startkommutierungs-Suchvorganges aktiv [„hält die Achse fest“] und kann dann, da der Antrieb jetzt funktionstüchtig ist und über die Regelung in der Position gehalten wird, gelöst werden, ohne dass die Achse unkontrollierte Bewegungen ausführt.

[0008] Die Erfindung ist robust gegenüber Schwankungen der Zwischenkreisspannung, da der Strom geregelt wird, und somit Schwankungen in der Zwischenkreisspannung als Störgröße des Stromregelkreises gewertet werden, die somit ausgeregelt werden.

[0009] Das Problem der Stellung von Läufer zu Stator, in der kein Moment erzeugt wird, wird nicht durch einen zweiten Durchlauf beseitigt, sondern durch Einbringen eines relativ zur Regelgeschwindigkeit des Winkelregelkreises langsamen S-förmigen Signals in den Winkelregelkreis. Dieses S-förmige Signal ist vorteilhaft ein Kosinussignal. Die Amplitude beginnt mit Null und der Steigung Null und endet auch mit der Steigung Null, was vorteilhaft für Ausregelung im Winkelregelkreis ist. Der Winkelregelkreis regelt dieses Signal sofort wieder aus, so dass das Signal nach außen hin minimal in Erscheinung tritt, das Problem der momentenlosen Stellung jedoch sicher beseitigt ist. Es handelt sich also hierbei um eine 360-Grad Drehung des Spannungsraumzeigers $U\alpha$. Von Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass der Strom erhalten bleibt, also die Achse weiterhin in der Position gehalten wird, und somit keine unkontrollierten Bewegungen ausführen kann.

[0010] Die Erfindung arbeitet, bis auf die Messung der Ströme in zwei Leitungen über einen Analog-Digital-Wandler, der Bestandteil des Digitalen-Signal-Controller ist, ausschließlich digital, dadurch mit hoher Störfestigkeit und benötigt keine zusätzlichen Hardwarekomponenten.

Ausführungsbeispiel

[0011] Die Erfindung wird im Folgenden anhand einer Zeichnung erläutert. Dabei zeigt die einzige Figur die Struktur des Regelverfahrens.

[0012] Die minimierte Clarke-Park-Transformation **1** und **2** wird mit zwei Regelkreisen verknüpft. Es wird für die zwei Regelkreise und die Clarke-Park-Transformation die in dem Servoverstärker vorhandene Software und für die Signalerfassung [Winkel und die beiden Ströme] die in dem Servoverstärker vorhandene Hardware benutzt. Die zwei Regelkreise bestehen aus einem Stromregelkreis mit rampenförmiger Sollwertvorgabe und einem Winkelregelkreis.

[0013] Der Stromregelkreis beaufschlagt den Winkelregelkreis mit einem Signal **20**. Der Winkelregelkreis, der dynamisch gegenüber dem aus dem Stromregelkreis kommenden Signal **20** wesentlich schneller reagierend ausgelegt ist, sorgt dafür, dass das durch den Stromregelkreis aufgebrachte Signal **20** durch Drehung des Magnetfeldes ausgeregelt wird und dass die Welle des elektrischen Antriebes **16**, nach dem der Regelvorgang beendet ist, exakt auf die gleiche Position geregelt wird, die der elektrische Antrieb zum Beginn des Regelvorganges aufwies, und dort festgehalten wird.

[0014] Der Stromregelkreis gibt also dem Winkelregelkreis ein langsam ansteigendes Signal **20** vor, das der Winkelregelkreis, weil er dynamisch wesentlich schneller ausgelegt ist, ausregelt, in dem er den Winkel des elektromagnetischen Feldes **21** so verstellt, dass der mechanische Winkel im stationären Endwert konstant bleibt. Der Winkel des elektromagnetischen Feldes **21** ist die gesuchte Ausgangsgröße.

[0015] Die Gleichungen der minimierten Clarke-Park-Transformation lauten:

$$iM = -\sin(\alpha) \cdot i_U + \cos(\alpha) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} i_U + \frac{2}{\sqrt{3}} i_V \right) \quad (1)$$

$$u_U = -i_Q \cdot \sin(\alpha) \quad (2a)$$

$$u_V = -\frac{1}{2} \cdot (-i_Q \cdot \sin(\alpha)) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (i_Q \cdot \cos(\alpha)) \quad (2b)$$

$$u_W = -\frac{1}{2} \cdot (-i_Q \cdot \sin(\alpha)) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (i_Q \cdot \cos(\alpha)) \quad (2c)$$

[0016] Das in Fig. 1 gezeigte Strukturbild gibt den Einblick in die Art der Realisierung der Erfindung. Die elektrische Maschine **16** [Synchron-Motor oder Linear-Antrieb] mit inkrementalem Geber wird über die drei Leitungen

gen **19** gespeist. Die Ausgangsgröße **17** des Inkrementalgebers beinhaltet zwei um 90° versetzte Signale, die in dem QEP-Zähler **13** [Quadrature Encoder Pulse Circuit] in eine relative Position gewandelt werden. Diese relative Position ist der Winkel-Istwert **10** für den Winkelregelkreis. Der Winkel-Sollwert **8** und der Winkel-Istwert **10** werden beim Start der Startkommutierungsfindung auf einen gleichen Wert vorge setzt. Weicht der Winkel-Istwert **10** vom Winkel-Sollwert **8** ab, so regelt der Winkelregler **9**, der an jedem Antrieb angepasst ist und meist als PI-Regler ausgelegt ist ohne bleibende Regelabweichung die Winkeldifferenz **24** aus, d. h. die Stellung der Achse des elektrischen Antriebes oder die Stellung des Läufers des Linear-Antriebes werden in der gleichen Position gehalten. Die Ausgangsgröße des Winkelreglers **25** wird mit dem S-förmigen Signal **11**, das in dem S-Signalgenerator **12** erzeugt wird, summiert. Das Ergebnis der Summation ist die gesuchte Größe α , der Kummütierungswinkel, der dem Ende des Vorganges [ca. 700 ms] mit einem Offset versehen wird, der die Drehrichtung des Motors bzw. die Bewegungsrichtung des Linear-Antriebes bestimmt. Die Winkelgröße α wird zusammen mit dem Ausgang i_Q des Stromreglers **20** in die inverse minimierte Clarke-Park-Transformation **2** [s. Gleichungen 2a, 2b, 2c] geleitet, die aus den beiden Eingangsgrößen α und i_Q die drei bekannten Phasen U, V, W in den Puls-Weiten-Modulator **23** gibt. Die Ausgangsgrößen des Puls-Weiten-Modulator **23** werden im Leistungsteil **15** entsprechend verstärkt und auf die drei Motorphasen **19** gegeben. Damit ist der Winkelregelkreis geschlossen.

[0017] Der Stromregelkreis bezieht seinen Strom-Istwert **6** aus den zwei Strommesssignalen **18**, die im Analog-Digital-Wandler **22** digital gewandelt und der minimierten Clarke-Park-Transformation **1** zugeführt werden. Als weitere wichtige Eingangsgröße in diesen Stromregelkreis ist der Kummütierungswinkel α . Die Ausgangsgröße der minimierten Clarke-Park-Transformation **1** i_M **6** [s. Gleichung (1)], stellt den Strom-Istwert **6** der Stromregelung dar. Der Strom-Sollwert **5** wird im begrenzten Integrator **4** erzeugt, der beim Start zur Kummütierungsfindung mit einem konstanten Startsignal **3** beaufschlagt wird. Mit diesem Startsignal **3** kann mit Vorteil die Zeitdauer der Startkommütierungsfindung ohne Hardwareänderungen eingestellt werden. Nun gelangt die Differenz des Strom-Sollwertes **5** und des Strom-Istwertes **6** in den Stromregler **7** dessen Ausgangsgröße i_Q **20** als weitere Signaleingangsgröße in den Winkelregelkreis geführt wird, und über die inverse minimierte Clarke-Park-Transformation **2**, über den Puls-Weiten-Modulator **23** und das Leistungsteil **15** dem elektrischen Antrieb **16** entsprechend der Strom-Sollwertvorgabe **5** ansteigenden Strom vorgibt. Dieser Strom erzeugt ein Moment bzw. eine Kraft die zu einer minimalen Bewegung führt, die jedoch vom Winkelregelkreis über den elektrischen Antrieb **17** und den QEP-Zähler **13** [Quadrature Encoder Pulse Circuit] erkannt wird und mit Hilfe des Winkelreglers **9** sofort korrigiert wird.

[0018] Der QEP-Zähler mit zwei Eingangsgrößen, der Analog-Digital-Wandler und die Puls-Weiten-Modulationseinheit sind Bestandteile jeder digitalen Regelung von Drehstrom-Antrieben. Die Umrandung **14** stellt die digitalen Signalprozessoren mit integrierter Peripherie dar, die für die Regelung von Drehstromantrieben eingesetzt werden. Weiterhin ist die Bewegungsfreiheit der Motorwelle bzw. des Läufers des Linearantriebes, die notwendiger Weise vorhanden sein muss, so gering, dass die Startkommütierung auch bei blockierter Motorwelle [Brems aktiv], allein auf Grund der Torsion der Welle [im μm -Bereich], bzw. bei Linearantrieben durch Verwindung des Führungsstranges, sicher gefunden wird.

Bezugszeichenliste

- | | |
|-----------|---|
| 1 | minimierter Clarke-Park-Transformation [Gleichung 1] |
| 2 | minimierter inverse Clarke-Park-Transformation siehe [Gleichungen 2a, 2b, 2c] |
| 3 | Startsignal |
| 4 | begrenzter Integrator |
| 5 | Strom-Sollwert |
| 6 | Strom-Istwert |
| 7 | Stromregler |
| 8 | konstanter Sollwert für den Winkelregelkreis |
| 9 | Winkelregler |
| 10 | mechanischer Winkel-Istwert |
| 11 | S-förmiges Störsignal (verschobenes Kosinussignal) |
| 12 | S-Signalgenerator |
| 13 | QEP-Zähler [Quadrature Encoder Pulse Circuit] |
| 14 | DSP-Controller [Digitaler Signalprozessor mit Peripherie auf einem Silizium-Chip] |
| 15 | digital geschaltetes Leistungsteil mit 6 Leitungshalbleitern |
| 16 | Synchron-Motor mit inkrementalem Geber |
| 17 | zwei Signalleitungen des inkrementalen Gebers |
| 18 | Strommesssignale |

- 19** Die drei Anschlussleitungen [Phasen] für den elektrischen Antrieb
- 20** Ausgangsgröße des Stromreglers
- 21** gesuchter elektrischer Kommutierungswinkel
- 22** Analog-Digital-Wandler
- 23** Puls-Weiten-Modulator
- 24** Winkeldifferenz, Eingang in den Winkelregler
- 25** Ausgangssignal des Winkelgebers

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bewirkung der Startkommutierung von Synchron-Servo-Antrieben mittels zweier verkoppelter Regelkreise: eines Stromregelkreises sowie eines Winkelregelkreises, wobei über eine mit diesen verknüpfte minimierte Clarke-Park-Transformation (**1,2**) eine Kopplung des Stromregelkreises über den Querstrom i_Q erfolgt und eine Kopplung des Winkelregelkreises zum Stromregelkreis über den Feldwinkel α erfolgt, die mit dem Stromregelkreis verknüpfte Clarke-Park-Transformation (**1**) als Eingang zwei Phasenströme (i_U , i_V) und den Feldwinkel α und als Ausgang den Motorstromvektor i_M beinhaltet und die mit der Winkelregelung verknüpfte Clarke-Park-Transformation (**2**) als Eingang den Feldwinkel α und den Querstrom i_Q und als Ausgang die Strangspannungen u_U , u_V , u_W beinhaltet, der Winkelregelkreis ein inkrementelles Positionssensorsignal (**13**) beinhaltet, der Stromregelung (**7**) ein rampenförmiger Sollwert (**5**) vorgeben ist, der Winkelregelung (**9**) ein konstanter Winkelsollwert (**8**) vorgegeben ist, die in ihrer Dynamik gegenüber der Dynamik der Stromregelung (**7**) schneller ausgelegte Winkelregelung (**9**) das durch die Stromregelung (**7**) beaufschlagte Signal (**20**) durch Drehung des Magnetfeldes ausgeregelt, die in allen Lagen notwendige Steuerbarkeit des Verfahrens durch die Eingabe eines kosinusförmigen Störgrößensignals (**11**) in die Winkelregelung (**9**) hergestellt wird und die Welle des elektrischen Antriebes (**16**) in ihrer Position während der Initialisierung der Startkommutierung mechanisch festgestellt werden kann und nach der Initialisierung der Startkommutierung exakt auf die gleiche Position, wie zu dessen Beginn, geregelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, dass die Winkelregelung (**7**) den Endwert des mechanischen Winkels (**10**) durch Verstellen des Winkels des elektromagnetischen Feldes (**21**) konstant hält.
3. Verfahren nach den Ansprüchen 1 und 2, gekennzeichnet dadurch, dass der Winkel des elektromagnetischen Feldes (**21**) die gesuchte Ausgangsgröße (**25**) für den Regelvorgang ist.
4. Verfahren nach den Ansprüchen 1, 2 und 3, gekennzeichnet durch die Verwendung eines DSP-Controllers.
5. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 4 gekennzeichnet dadurch, dass die Strommessung in den Motorleistungskabeln potentialfrei erfolgt.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

