

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

11 CH 693 694 A5

**51 Int. Cl.7: H 02 K 007/09
F 16 C 039/06**

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-Liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

12 PATENTSCHRIFT A5

21 Gesuchsnummer: 00452/99

22 Anmeldungsdatum: 11.03.1999

30 Priorität: 13.03.1998 JP 10-062521

24 Patent erteilt: 15.12.2003

45 Patentschrift veröffentlicht: 15.12.2003

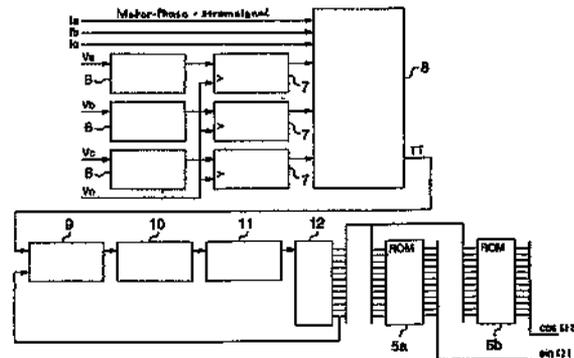
73 Inhaber:
HITACHI, LTD., 6, Kanda Surugadai 4-chome
Chiyoda-ku, Tokyo (JP)

72 Erfinder:
Naohiko Takahaschi, 11-3, Inayoshihigasshi-6-chome
Chiyodamachi, Niihari-gun
Ibaraki-ken (JP)
Tsunehiro Endo, 1349-14, Arajukucho
Hitachiota-shi (JP)
Harau Miura, 1771-2, Niihari, Chiyodamachi
Niihari-gun, Ibaraki-ken (JP)
Minoru Yoshihara, 3-8-405, Inayoshiminami-2-chome,
Chiyodamachi, Niihari-gun
Ibaraki-ken (JP)
Yasuo Fukushima, 5-49-2-15, Misono, Moriyamachi,
Kitasoma-gun
Ibaraki-ken (JP)
Kazuki Takahaschi, 11-3, Inayoshihigashi-6-chome,
Chiyodamachi, Niihari-gun
Ibaraki-ken (JP)

74 Vertreter:
Troesch Scheidegger Werner AG
Siewerdstrasse 95, Postfach
8050 Zürich (CH)

54 Magnetisches Lager, rotierende Maschine mit einem solchen magnetischen Lager und Verfahren zum Antrieb einer rotierenden Maschine.

57 Bei einer rotierenden Maschine, welche von einem bürstenlosen Gleichstrommotor angetrieben wird, wird die Klemmenspannung (V_a ; V_b ; V_c) des Gleichstrommotors korrigiert, und zwar in einem Phasenkorrektor (8) unter Verwendung eines Phasenstromsignals (I_a ; I_b ; I_c) des Motors. Die Klemmenspannung wird in einem Integrator (6) und einem Komparator (7) verarbeitet, um in ein Ein/Aus-Signal mit einem Impulsverhältnis von 1:1 umgewandelt zu werden. Dann wird ein Drehpositionssignal erzeugt, basierend auf einer induzierten Spannung, welche ihrerseits durch die Drehung eines Permanentmagneten des Rotors erzeugt wird, sodass kein Drehsensor mehr benötigt wird. Andererseits wird der Ausgang des Phasenkorrektors (8) als 1 Impuls/1 Umdrehung Signal in eine PLL-Schaltung eingeführt. Die PLL-Schaltung enthält einen Phasenkomparator (9), einen Hochfrequenzfilter (10), einen Oszillator (11) und einen Zähler (12). Die PLL-Schaltung dient der Frequenzteilung des 1 Impuls/1 Umdrehung Ausgangssignals. Die Werte der Sinuswelle werden in einem ROM-Speicher (5a, 5b) gespeichert, und zwar bezüglich jeder der frequenzunterteilten Signalpositionen. Die unausgeglichene Schwingungen des magnetischen Lagers werden bei jedem frequenzgeteilten Signal gesteuert bzw. kontrolliert.



Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein magnetisches Lager zum Drehen bzw. Abstützen eines Rotors, welcher von einem bürstenlosen Gleichstrommotor antreibbar ist, eine rotierende Maschine mit einem Rotor und einem bürstenlosen Gleichstrommotor zum Antrieb des Rotors, mit einem Paar solcher radial angeordneten magnetischen Lager zum Abstützen des Rotors, sowie ein Verfahren zum Betrieb eines solchen Lagers zum Antrieb einer solchen rotierenden Maschine.

Bei hochtourigen rotierenden Maschinen, welche von Gleichstrommotoren angetrieben werden, kommen üblicherweise bürstenlose Motoren zum Einsatz, um den schlechten Einfluss von Gasen zu vermeiden, wenn die Bürsten von Gleichstrommotoren sich abnützen und um die Unterhaltsintervalle der Gleichstrommotoren zu verlängern. Bei einem bürstenlosen Motor besteht eine enge Beziehung zwischen Stellungen von magnetischen Polen des bürstenlosen Motors und Stellungen von Windungen, die zu erregen sind. Da das Ausgangsdrehmoment eines Motors durch gegenseitige Beeinflussung zwischen Magnetflüssen, welche von den magnetischen Polen eines Rotors erzeugt werden, und Strömen der Windungen eines Stators bei einem bürstenlosen Gleichstrommotor erzeugt werden, ist es zweckmässig, einen Strom einer Windung einer solchen Phase zuzuführen, welche sich in unmittelbarer Nähe einer Stellung befindet, wo die magnetische Flussdichte, welche von den magnetischen Polen des Rotors erzeugt wird, ein Maximum ist. Mit anderen Worten, die mit Strom versorgte Windung wird von Zeit zu Zeit bezüglich der Beziehung zur Drehstellung eines magnetischen Pols des Rotors umgeschaltet. Die zeitliche Abstimmung einer Kommutation entsprechend der Polstellung stellt bei der Maximierung des Motordrehmomentes einen wesentlichen Faktor dar. Ein Drehstellungssensor wird verwendet, um die magnetische Polstellung des Rotors festzustellen. Ein Antriebssignal, basierend auf der so erhaltenen Information bezüglich Drehstellung wird auf Grund dieses Drehstellungssensors produziert, und zwar derart, dass eine gleichphasige Beziehung hergestellt werden kann zwischen einer Basiswelle eines Motorstroms und einer induzierten Spannung. Dann wird der bürstenlose Gleichstrommotor mittels dieses Antriebsstroms angetrieben.

Wie vorstehend erläutert ist die Information über die Drehstellung erforderlich, um die zeitliche Abstimmung der Kommutation des Stroms zu finden. Die Drehstellung des Rotors kann festgestellt werden auf Grund von induzierten Spannungen, welche durch Drehen des permanentmagnetischen Rotors produziert werden, sodass es nicht erforderlich ist, einen solchen speziellen Drehstellungssensor vorzusehen. Gemäss diesem Verfahren zeigen sich mehrere Vorteile, indem das rotierende System eines Motors wesentlich kompakter gestaltet und zu niedrigeren Kosten hergestellt werden kann. Verschiedene Ideen wurden bereits vorgeschlagen. Solche Ideen sind beschrieben in JP-A-9-266 690, JP-A-9-56 192, JP-A-9-294 391 und JP-A-10-23 783.

Entsprechende Patentanmeldungen wurden in den

USA eingereicht, so z.B. am 13. Februar 1998 mit dem Titel «Zweistufiger Zentrifugalverdichter» und Anmeldeungsnummer 08/921 604 vom 2. September 1998 mit dem Titel «Mehrstufiger Verdichter», welche im Wesentlichen den mechanischen Aufbau des Kompressors beschreibt.

Zur Abstützung der Rotoren eines hochtourigen Turbokompressors, werden magnetische Lager verwendet, da mit solchen Lagern keine Ölschmierung erforderlich ist. Bei Turbokompressoren mit magnetischen Lagern werden die Rotoren derart abgestützt, dass unter dem Einfluss elektromagnetischer Kräfte die Rotoren auf einem Luftkissen gehalten sind. Darüber hinaus besitzen aktive magnetische Lager zur Erzeugung elektromagnetischer Kräfte Mittel zum Feststellen einer Verschiebung eines Rotors entlang einer radialen Richtung, um damit die Stellung des Rotors zu steuern. Der Rotor wird gesteuert unter Verwendung der festgestellten radialen Verschiebungen mittels der so genannten PID-Steuerung. Die PID-Steuerung ist eine Kombination von Proportionalsteuerung, Integralsteuerung und Differenzialsteuerung. Wie oben erläutert, wird bei Verwendung von magnetischen Lagern für rotierende Maschinen die Vibration der Rotoren zu beachten sein. Hochtourige Rotoren werden gegebenenfalls jenseits mehrerer Ordnungen von kritischen Geschwindigkeiten angetrieben. In diesem Fall ist es von grösster Wichtigkeit Vibrationen zu unterdrücken, welche durch Unwucht beim Betrieb von Rotoren jenseits kritischer Geschwindigkeiten entstehen. Aus diesem Grund wird die Erzeugerkraft, welche die gleiche Frequenz aufweist wie die Drehfrequenz des Rotors, durch das magnetische Lager erzeugt und diese Erzeugerkraft kann dazu verwendet werden, als Gegenkraft bezüglich der nicht ausgeglichenen Kraft zu dienen, sodass der Hochgeschwindigkeitsrotor jenseits der kritischen Geschwindigkeit betrieben werden kann.

Bei rotierenden Maschinen, welche durch magnetische Lager abgestützt und mit bürstenlosen Gleichstrommotoren ausgerüstet sind, wird die Information bezüglich Drehstellung benötigt, um die Kommutation zum richtigen Zeitpunkt zu finden. Im Allgemeinen werden Drehstellungssensoren, wie z.B. Codierer oder Resolver verwendet. Da jedoch die Drehstellung sogar durch Verwendung der induzierten Spannung festgestellt werden kann, neigt man in letzter Zeit dazu, die induzierte Spannung an Stelle von Drehstellungssensoren einzusetzen.

Wenn z.B. ein bürstenloser Gleichstrommotor vom Typ 120° ohne Strom im Motor rotiert, wird eine induzierte Spannung durch die Drehung eines Permanentmagneten erzeugt. Diese erzeugte, induzierte Spannung erscheint direkt an den Windungsklemmen dieses bürstenlosen Gleichstrommotors. Die induzierte Spannung ist vollständig synchronisiert mit der Drehung des Rotors, wenn diese induzierte Spannung integriert wird, wird ein Signal erhalten, mit einer Phasenverschiebung um 90° bezüglich der Phase dieser induzierten Spannung. Wenn dieses Phasenverschiebungssignal mittels eines Komparators auf Null-Kreuzungspunkte geschaltet wird, wird ein Impulssignal, welches auf Ein/Aus und Aus/Ein über jeweils 180° gedreht ist, erzeugt. Dieses Impulssignal kann als Drehstellungssignal verwendet

werden. Selbstverständlich wird die vorstehend erläuterte Operation bezüglich jeder der Windungen, welche ein bürstenloser Motor, nämlich Dreiphasenwindungen aufweist, durchgeführt.

Zuerst wird ein Antriebssignal des Motors synchron mit Ein/Aus des vorstehend beschriebenen Drehstellungssignals erzeugt, um den bürstenlosen Gleichstrommotor anzutreiben, falls der Motorstrom klein ist. Wenn ein Strom durch den Motor fliesst, wird eine Phase des der Klemmenspannung nicht mit einer Phase einer induzierten Spannung koinzidieren, dies dank einer Induktivitätskomponente des Motors. Darüber hinaus wird die Phasendifferenz in Abhängigkeit des Motorstroms geändert. Daraus resultiert, dass die Phase des Drehstellungssignals in Abhängigkeit von Änderungen des Motorstroms korrigiert wird. Die Drehstellungssensoren werden somit in bürstenlosen Motoren nicht mehr gebraucht. Die vorstehend erwähnten, japanischen Veröffentlichungen beschreiben im Detail diese Verfahren.

Andererseits werden bei rotierenden Maschinen mit magnetischen Lagern, insbesondere bei Hochgeschwindigkeitsmaschinen jenseits kritischer Geschwindigkeiten, die durch unausgeglichene Kräfte erzeugten Vibrationen zu unterdrücken sein, um die rotierenden Maschinen bei Geschwindigkeiten über der kritischen Geschwindigkeit überhaupt zu betreiben. Zu diesem Zweck, wenn magnetische Lager verwendet werden, werden der Drehgeschwindigkeit des Motors entsprechende Angaben benötigt, um das magnetische Lager zu steuern und zu diesem Zweck werden entweder der Drehstellungssensor oder der Drehgeschwindigkeitssensor immer noch verwendet, um diese magnetischen Lagern zu steuern. Wenn ein Drehwinkelsensor neu in einem Hochgeschwindigkeitsrotor montiert wird, muss die Länge des Hochgeschwindigkeitsrotors entlang der Wellenrichtung verlängert werden, was zur Herabsetzung einer kritischen Geschwindigkeit führen kann. Unter solchen Umständen ist es zweckmässig Informationen zu verwenden, welche sich auf die Drehstellung eines Motors ohne Drehgeschwindigkeitssensor beziehen, oder ohne einen Drehwinkelsensor. Keine der Lösungen gemäss den weiter oben aufgeführten, japanischen Publikationen konnte diesen wünschbaren Aspekt hingegen befriedigen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, die vorstehend beschriebenen Nachteile zu eliminieren und ein magnetisches Lager zu niedrigen Kosten bereitzustellen, wie auch eine Hochgeschwindigkeitsmaschine, deren Rotor durch ein solches magnetisches Lager abgestützt ist, ohne dass ein Drehstellungssensor verwendet werden müsste.

Eine andere Aufgabe der Erfindung liegt darin, eine rotierende Maschine zu schaffen, in welcher ein erfindungsgemässes magnetisches Lager vorgesehen ist, ohne einen Drehstellungssensor verwenden zu müssen.

Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein Verfahren zum Betrieb eines erfindungsgemässen magnetischen Lagers zu schaffen, um eine rotierende Maschine anzutreiben, ohne dass ein Drehstellungssensor verwendet werden müsste.

Zur Lösung dieser Aufgaben besitzt eine rotierende Maschine gemäss einem ersten Aspekt der vor-

liegenden Erfindung ein magnetisches Lager zur Abstützung bzw. zum Drehen eines von einem bürstenlosen Gleichstrommotor angetriebenen Rotors, welches sich erfindungsgemäss durch die Merkmale des kennzeichnenden Teils von Anspruch 1 auszeichnet. Besondere Ausführungsformen des erfindungsgemässen magnetischen Lagers sind in den abhängigen Ansprüchen 2 bis 4 definiert. Die ebenfalls Gegenstand der Erfindung bildende rotierende Maschine mit einem Rotor und einem bürstenlosen Gleichstrommotor zum Antrieb des Rotors mit einem paarweise und radial ausgebildeten magnetischen Lager zum Abstützen des Rotors zeichnet sich durch die Merkmale des kennzeichnenden Teils von Anspruch 5 aus.

Besonders vorteilhafte Ausführungsformen dieser Maschine sind in den abhängigen Ansprüchen 6 bis 11 definiert.

Die im kennzeichnenden Teil von Anspruch 12 definierte rotierende Maschine bildet ebenfalls Gegenstand der Erfindung, wie auch das Verfahren zum Antrieb einer rotierenden Maschine gemäss dem kennzeichnenden Teil von Anspruch 13.

Besondere Ausführungsformen dieses Verfahrens sind in den Ansprüchen 14 und 15 definiert.

Die Erfindung wird nachstehend anhand von in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen noch etwas näher erläutert.

In der Zeichnung zeigt:

Fig. 1 ein schematisches Blockdiagramm zur Darstellung einer Detektionsfunktion einer Drehstellung einer Antriebs-Schaltung für einen bürstenlosen Gleichstrommotor, gemäss einer ersten Ausführungsform der Erfindung;

Fig. 2 einen Querschnitt durch eine rotierende Maschine, welche mit einem magnetischen Lager versehen ist, ebenfalls gemäss einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

Fig. 3 die Antriebsschaltung eines bürstenlosen Gleichstrommotors;

Fig. 4 eine erläuternde Skizze zur Erklärung der Beziehung zwischen einer induzierten Spannung eines Gleichstrommotors und einer Klemmenspannung dieses Motors;

Fig. 5 ein schematisches Blockdiagramm, welches das Steuersystem eines radialen magnetischen Lagers zeigt, welches Lager mit einer Vorwärtsregelung für unausgeglichene Kräfte ausgerüstet ist, ebenfalls gemäss einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

Fig. 6 ein schematisches Blockdiagramm mit einem Steuersystem für radiale magnetische Lager, ausgerüstet mit einer Steuerung für unausgeglichene Kräfte bei Feedback-Regelung, gemäss einem Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Fig. 7 ein schematisches Blockdiagramm mit einem Wegfilter in einem Steuergerät des magnetischen Lagers gemäss der vorliegenden Erfindung, und

Fig. 8 ein schematisches Blockdiagramm mit einer PLL-Schaltung zum Erhalt einer Information von 6 Impulsen für jede Umdrehung.

Ein kleiner Turbokompressor muss mit hoher Ge-

schwindigkeit angetrieben werden, um dessen Wirkungsgrad zu verbessern. Um solch hohe Drehzahlen zu erreichen, für den Fall dass ein Flügelrad direkt mit einem Motor gekuppelt ist, um einen einstufigen Verdichter oder einen zweistufigen Verdichter zu bilden, benötigt der Motor einen bei hohen Geschwindigkeiten schaltenden Inverter. Hochgeschwindigkeitsmotoren sind z.B. Induktionsmotoren, Reluktanzmotoren oder bürstenlose Gleichstrommotoren. Weit verbreitet sind bürstenlose Gleichstrommotoren, dies unter Berücksichtigung von Faktoren, wie Wirkungsgrad und Leistung. Zum Abstützen eines Rotors von derartigen hochtourigen rotierenden Maschinen eignet sich ein Gaslager oder ein magnetisches Lager. Das magnetische Lager besitzt jedoch überlegene Eigenschaften, insbesondere im Hinblick darauf, dass Vibrationen wirkungsvoll unterdrückt werden können.

Bei einem Gleichstrommotor wird die Phase der Stromzufuhr entsprechend einer Magnetpolstellung (N-Pol und S-Pol) eines Rotors mit Permanentmagnet geschaltet, um ein Drehmoment zu erzeugen. Grundsätzlich ist es vorteilhaft, dass eine Phase einer Basiswelle eines Motorstroms eine Phasenbeziehung mit einer Phase einer induzierten Spannung aufweist, welche während einer Phase erzeugt wird, während der der Motor dreht. Bei einem mit Bürsten ausgerüsteten Motor wird der Strom durch die Bürste automatisch geschaltet. Ein mit Bürste ausgerüsteter Motor kann somit mit einer sehr einfachen Steuerung ausgerüstet sein. Andererseits hat ein solcher Motor den Nachteil, dass sich dieser wegen dem Bürstenkontakt nicht für sehr hohe Drehzahlen eignet, da sonst der Verschleiss zu hoch ausfallen würde.

Da ein bürstenloser Motor keine Bürsten besitzt, wird die Drehstellung einer rotierenden Welle mittels eines Sensors festgestellt und eine Phase, in welcher ein Strom zugeführt wird, zugeschaltet. Dementsprechend ist keine Gleiteinheit vorgesehen. Da ein Turboverdichter mit niedrigem Durchflussvolumen mit hoher Geschwindigkeit rotiert, werden bei den meisten Turboverdichtern dieser Art bürstenlose Motoren verwendet. Ein Drehstellungssensor im bürstenlosen Motor ist erforderlich, damit mit solch hohen Geschwindigkeiten gearbeitet werden kann und es sind zudem Bauteile am Rotor dieses bürstenlosen Motors erforderlich, um den Zentrifugalkräften ausreichend entgegenzuwirken. Bei einem Verdichter, wo ein Schaufelrad auf einem Endabschnitt einer Motorwelle montiert ist, insbesondere bei zweistufigen Verdichtern, wo Schaufelräder an beiden Endabschnitten einer Motorwelle angeordnet sind, kann nicht mit einer Verbesserung der Steifigkeit der Welle gerechnet werden. Deshalb wird ein solcher Hochgeschwindigkeits-Turboverdichter jenseits einer dritten kritischen Geschwindigkeit angetrieben, dies als Regelfall. Ein bei einem solchen Zentrifugalverdichter verwendetes magnetisches Lager muss somit die Wellenschwingungen bei den kritischen Geschwindigkeiten unterdrücken.

Um die kritischen Geschwindigkeiten bzw. kritischen Drehzahlen zu überschreiten, muss eine elektromagnetische Kraft eines Lagers erzeugt werden, um die unausgeglichenen Kräfte auszugleichen. Durch

ein geeignetes Verfahren ist sowohl die Grösse einer unausgeglichenen Kraft als auch deren Richtung oder deren Phase zu schaffen. Da die unausgeglichenen Kräfte einer periodischen Störung einer Frequenz entspricht, welche gleich der Drehfrequenz ist, wird eine Steuerung in Form einer Sinuswelle mit entgegengesetzter Phase zu dieser Störung einem Steuerbefehl für ein magnetisches Lager aufaddiert. Dieses Verfahren wird als Vorwärtsregelung zur Unterdrückung von unausgeglichenen Schwingungen bezeichnet.

Die Phasendifferenz zwischen unausgeglichener Kraft und unausgeglichener Schwingungsbewegung wird bei einer kritischen Drehzahl 90° . Nur eine Frequenzkomponente einer Drehfrequenz wird einem radialen Verschiebungssignal entnommen. Diese Frequenzkomponente wird dann um 90° verschoben und die phasenverschobene Frequenzkomponente zurückgeführt, sodass die unausgeglichene Kraft verschwinden kann. Dieses Verfahren zur Unterdrückung unausgeglichener Schwingungen wird Feed-back-Verfahren genannt.

Zur Verschiebung einer Phase um 90° in die Führungsrichtung, wird entweder ein Differenzierungsgerät oder ein Phasenführungsgerät erforderlich, dies unter Verwendung eines operationellen Verstärkers. Eine andere Möglichkeit besteht darin, Signale eines Sensors zu verwenden, welche senkrecht zueinander ausgerichtet sind, um eine radiale Verschiebung zu messen und kreuzweise zurückgekuppelt werden, um ein 90° -Phasenführungssignal nach geometrischer Art zu erzeugen. Dieses Verfahren wird «N-Cross-Feed-back» genannt. Die nachstehende Idee wurde zudem kürzlich vorgeschlagen. Im magnetischen Lager, welches einen mit hoher Geschwindigkeit rotierenden Rotor abstützt, wird eine Komponente des Stroms mit einer Frequenz, welche mit der Drehfrequenz übereinstimmt, eliminiert, um den Lagerstrom bei dieser Geschwindigkeit zu reduzieren.

Da die Drehfrequenz des Rotors eine unabdingbare Voraussetzung für alle vorstehend genannten Verfahren bildet, muss diese Drehfrequenz unter Verwendung irgendeiner dieser Verfahren berechnet werden. Nachstehend wird eine Grundidee für ein Verfahren beschrieben, welches erlaubt, die Drehfrequenz zu berechnen, um das magnetische Lager zu steuern.

Bei der unausgeglichene Schwingungssteuerung eines magnetischen Lagers wird die magnetische Kraft (Absorptionskraft) auf eine Drehstellung des Rotors eingestellt, sodass der unausgeglichene Kraft mit dieser magnetischen Kraft entgegengewirkt wird. Um eine Information über eine Drehstellung zu erfahren, wird ein Drehimpuls-Pickup 22 auf einem Rotor montiert, um ein Impulssignal (nämlich ein Impuls pro 1 Umdrehung) synchron mit der Drehung dieses Rotors zu erzeugen. Dieses Impulssignal wird unter Verwendung einer PLL-Logik unterteilt, sodass ein Drehstellungssignal mit hoher Auflösung erzeugt werden kann. Wenn dieses Drehstellungssignal verwendet wird, ist es möglich, eine sinusoidale Magnetkraft entsprechend der Drehstellung zu erzeugen. Wenn diese sinusoidale Magnetkraft eine Phase aufweist, welcher jener der unausgeglichene Kraft entgegensteht, kann die unausgeglichene Schwingung reduziert werden.

Gemäss der vorliegenden Erfindung wird ein Drehstellungssignal, welches aus einer Klemmenspannung eines Motors erhalten wird, als Impulssignal eines magnetischen Lagers verwendet, sodass kein rotierendes Impuls-Pickup erforderlich ist. Demzufolge ist weder ein Drehstellungssensor noch ein Drehzahlsensor für das magnetische Lager erforderlich. Wenn zudem die Klemmenspannung des Motors gefiltert wird, um wellige Komponenten in dieser Klemmenspannung zu eliminieren, und die Klemmenspannung an einem Komparator mit einem Null-Potenzial verglichen wird, wird ein Impulssignal mit einem Verhältnis 1:1 produziert. Dieses Impulssignal entspricht einem mit der Drehung des Rotors synchronisierten Signal. Dieses Impulssignal wird unter Verwendung eines PLL (phaselocked loop) geteilt, um so die gesamte Impulszahl zu erhöhen. Das geteilte Signal wird somit als Drehstellungssignal mit hoher Auflösung verwendet. Indem sowohl eine Sinusfunktion als auch eine Kosinusfunktion entsprechend der Drehstellung hoher Auflösung berechnet wird, wird ein Steuersystem für unausgeglichene Kräfte für einen Steuerapparat eines magnetischen Lagers gebildet.

Anhand der Zeichnung wird nun eine rotierende Maschine gemäss der vorliegenden Erfindung näher erläutert. Fig. 2 zeigt einen Schnitt durch die drehende Einheit eines zweistufigen Zentrifugalverdichters als Beispiel einer rotierenden Maschine gemäss der Erfindung. Im zweistufigen Zentrifugalverdichter 30 zeigt 32a ein Zentrifugalverdichterrad einer ersten Stufe und 32b ein Zentrifugalverdichterrad einer zweiten Stufe, welche an jeweils einem Endabschnitt eines Rotors 31 eines Motors 41 montiert sind. Radiale magnetische Lager 33a und 33b sind auf diesem Rotor 31 angeordnet, und zwar zwischen den beiden zentrifugalen Verdichterrädern 32a und 32b. Durch diese radialen Lager 33a und 33b ist der Rotor 31 drehbar abgestützt. Radiale Sensoren 42a und 42b zum Messen der Verschiebung (X1, Y1) und (Xr, Yr) des Rotors 31 in radialer Richtung sind auf den entsprechenden magnetischen Lagern 33a und 33b montiert.

Auf der Innenseite des radialen magnetischen Lagers 33b entlang der axialen Richtung auf Seite des Flügelrades 32b der zweiten Stufe auf der rechten Seite von Fig. 2 sind axiale magnetische Lager 34a und 34b angeordnet, derart, dass diese axialen magnetischen Lager 34a und 34b eine Schubaufnahmescheibe auf dem Rotor 31 zwischen sich einschliessen. Diese axialen magnetischen Lager 34a und 34b können Schubkräfte aufnehmen, welche in Axialrichtung der Welle des zweistufigen Verdichters erzeugt werden. Ein axialer Sensor 43 ist auf diesem Schublager vorgesehen, um die Verschiebung Z des Rotors 31 in axialer Richtung festzustellen. Die radialen magnetischen Lager 33a und 33b sind an Lagergehäusen 35a und 35b befestigt, während die axialen magnetischen Lager 34a und 34b auf Lagerhaltern 36a und 36b befestigt sind.

Im Rotor 31 ist eine Motorrotoreinheit mit einem permanentmagnetischen Rotor 40 gebildet, und zwar in einem Mittelabschnitt des Rotors 31, und ein Motorstator 37 umgibt, unter Belassung eines kleinen Spaltes, diese Rotoreinheit. Der bürstenlose Motor 41 wird durch diesen Motorstator 37, die Motorrotor-

einheit und eine Steuerschaltung (nicht gezeigt) gebildet. Der Motorstator 37 wird in einem Statorgehäuse 38 gehalten, welches auf einem Motorgehäuse vorgesehen ist.

Die zentrifugalen Schaufelräder 32a und 32b, welche direkt an den beiden Endabschnitten des Rotors 31 montiert sind, sind offene ummantelte Räder ohne Mantelwand. Ein sehr kleiner Spalt ist zwischen der Ummantelungsoberfläche jedes der Räder 32a, 32b und den inneren Gehäusen 38a und 38b gebildet. Hilfslager 39a und 39b sind ausserhalb der radialen magnetischen Lager 33a und 33b in Axialrichtung vorgesehen, um zu verhindern, dass der Rotor 31 in Berührung mit der Statoreinheit und dem Gehäuse gerät, solange die magnetischen Lager nicht in Betrieb sind. Wenn der Kompressor angetrieben wird, wird der Rotor 31 durch die radialen magnetischen Lager 33a und 33b schwimmend abgestützt. Die Drehung des Rotors 31 wird so gesteuert, dass keinerlei Kontakt zwischen diesen Hilfsslagern 39a, 39b und dem Rotor 31 besteht. Ein Spalt, welcher zwischen den Hilfsslagern 39a, 39b und dem Rotor 31 gebildet ist, ist kleiner als die Luftspalte des Motors und der radialen magnetischen Lager 33a, 33b und ist ebenfalls kleiner als der Mantelspalt der Schaufelräder.

Die Messresultate der Radialsensoren 42a, 42b und die Resultate des Axialsensors 43 werden in die Steuerschaltung 51 des magnetischen Lagers eingegeben. Dieser Steuerkreis 51 des magnetischen Lagers übermittelt Spannungen an die entsprechenden radialen magnetischen Lager 33a, 33b und die entsprechenden axialen magnetischen Lager 34a, 34b, um so diese magnetischen Lager zu steuern. Die Klemmenspannungen der Windungen der entsprechenden Phasen des Motorstators 37 werden der Steuerschaltung 52 für den Motor zugeführt. Ein Strom, welcher zum Antrieb des Motors verwendet wird, wird von der Steuerschaltung 52 des Motors an den Motorstator übermittelt. Wie später noch erläutert wird, wird ein Steuersignal von der Steuerschaltung 52 des Motors an die Steuerschaltung 51 des magnetischen Lagers weitergegeben.

Nachstehend wird der bürstenlose Motor 41, welcher in dem zweistufigen Zentrifugalverdichter 30 verwendet wird, näher erläutert. Fig. 3 zeigt ein allgemeines Schaltschema für den bürstenlosen 3-phasigen Gleichstrommotor 41. In Abhängigkeit entweder einer Drehstellung dieses bürstenlosen Gleichstrommotors oder einer Lastbedingung wird ein Schalter Ein/Aus betätigt, gemäss zum Beispiel einem 120°-Speiseverfahren, um so Ströme jeder Phase zuzuführen, nämlich der Phase a, Phase b und Phase c. Eine Antriebseinheit des bürstenlosen Gleichstrommotors 41 umfasst eine Invertereinheit 47, eine Einschaltseinheit zum Einsatz eines Einschaltvorganges dieser Invertereinheit 47 und eine Stellungsdetektoreinheit 45. Diese Stellungsdetektoreinheit 45 stellt die Umfangstellung des Rotors 40 mit dem Permanentmagneten fest, ausgehend von der vom Motor 41 für das Schaltsignal induzierten Spannung. Die Invertereinheit 47 betätigt die Schaltmodule 48a, 48b, 48c und die Schaltmodule 49a, 49b, 49c, welche aus Schalttransistoren und Dioden bestehen, nach Massgabe der Schaltzeiten, welche den entsprechenden

Windungen 44a, 44b, 44c des Motors zugeführt werden, welche ihrerseits von der Schalteinheit 46 gesteuert werden. Bei der 120°-Schaltmethode wurde zum Beispiel eine positive (+) Spannung der Windung 44a der Phase a während einer Zeitspanne zugeführt, welche im Wesentlichen gleich ist 120° des Drehwinkels des Rotors 31. Dann wird diese positive Spannung während einer Zeitspanne angehalten, welche im Wesentlichen gleich dem Drehwinkel von 60° ist und danach eine negative (-) Spannung angelegt, dies während einer Zeitspanne, welche im Wesentlichen gleich ist dem Drehwinkel von 120°. Anschliessend wird die Zufuhr dieser negativen Spannung angehalten, und zwar während einer Zeitspanne, welche im Wesentlichen gleich ist dem Drehwinkel von 60°. Das vorstehend erläuterte Erregerverfahren wird entsprechend der Phase b und der Phase c auferlegt. Es ist zu beachten, dass die Erregerabstimmung an die drei Phasen, nämlich Phase a, Phase b und Phase c um 120° verschoben ist. Dementsprechend wird ein drehendes Magnetfeld erzeugt, um den bürstenlosen Motor 41 anzutreiben.

Fig. 1 zeigt eine Ausführungsform der Schaltung 45 zur Feststellung der Stellung gemäss Fig. 3. Fig. 1 ist ein Blockdiagramm des Drehstellungsdetektors. In dieser Zeichnung wird ein Drehstellungssignal für ein magnetisches Lager erzeugt, basierend auf einer Klemmenspannung des bürstenlosen Gleichstrommotors 41.

Die Phasenklammenspannungen V_a , V_b , V_c des bürstenlosen Gleichstrommotors 41 werden Integratoren 6 zugeführt, welche für die entsprechenden Phasen vorgesehen sind, um integriert zu werden. Da diese Phasenspannungen V_a , V_b , V_c durch die Integratoren 6 integriert werden, werden die Phasen dieser Spannungen V_a , V_b , V_c um 90° verschoben, und Wellenkomponenten von höheren harmonischen Wellen, welche durch Impulsbreitenmodulation (PWM) erzeugt werden, werden aufgehoben. Als Resultat werden die resultierenden Klemmenspannungen im Wesentlichen sinusoidale Spannungssignale. In diesem Fall, d.h. wenn durch einen derart einfachen Integrationsprozess zur Integration aller Signalcomponenten durch den Integrator 6 ausgeführt werden, wird eine sehr niedrige Gleichstromspannung ohne Bedeutung verstärkt. Um einem solchen Nachteil auszuweichen, wird ein Hochpassfilter zum Entfernen der Gleichstromspannungen im Integrator 6 vorgesehen. Das im Integrator 6 verarbeitete Signal wird mit einem neutralen Potenzial V_n der Phasenklammenspannungen V_a , V_b , V_c mittels eines Komparators 7 verglichen. Somit wird ein Impulssignal mit einem Tastverhältnis von 1:1 erhalten, welches Ein/Aus geschaltet wird, bei einem Übergang durch den Nullpunkt. In diesem Fall ist ein Tastverhältnis gleich einem Verhältnis einer Einschaltzeit zu Ausschaltzeit. Das Impulssignal wird in allen entsprechenden Phasen auf die gleiche Weise erhalten. Diese Impulssignale werden gegenseitig um 120° verschoben. Dann werden diese Impulssignale als Drehstellungsinformation verwendet, um den bürstenlosen Gleichstrommotor zu steuern, und auch die magnetischen Lager.

Da ein Impulssignal von der Phasenklammenspannung stammt, wird die Phase mittels eines Phasen-

stroms des bürstenlosen Gleichstrommotors variiert. Ein Drehstellungsimpulssignal wird direkt variiert in Verbindung mit einer Phasenklammenspannung, sodass die Drehstellung eines Motors nicht festgestellt werden kann. Somit ist es notwendig, ein solches Impulssignal, basierend auf einem Phasenstrom des bürstenlosen Gleichstrommotors, zu modifizieren. Fig. 4 der Zeichnung zeigt ein Modifizierungsverfahren unter Verwendung eines Phasenstromes. Eine Phasenklammenspannung V wird durch einen Vektor dargestellt, welcher als Summe eines Vektors einer induzierten Spannung E_0 und eines Vektors eines Impedanzabfalls dargestellt ist. Dieser Impedanzabfallvektor wird durch einen Phasenstrom I_m erzeugt, welcher durch einen Phasenwiderstand γ und eine Phaseninduktanz L fliesst. Mit anderen Worten ist die induzierte Spannung E_0 gleich einer Vektordifferenz zwischen der Phasenspannung V und dem Impedanzabfall. Nach Berechnung einer Phasendifferenz δ zwischen der Phasenklammenspannung und der induzierten Spannung E_0 , wird die Phasendifferenz subtrahiert von der Phase der Phasenspannung V , sodass die Phase der Induzierten Spannung E_0 , nämlich der Drehwinkel als Information erhältlich ist.

Ein Phasenkorrektor 8 ist in Fig. 1 dargestellt und wird zur Berechnung dieser Phasendifferenz δ verwendet und korrigiert die Phase des Drehstellungsimpulssignals, basierend auf der berechneten Phasendifferenz δ . Ein solches Impulssignal, dessen Phase zur Übereinstimmung mit der Phase der induzierten Spannung gebracht wird, wird unabhängig vom Wert des Motorstroms erhalten. In der Invertereinheit zur Steuerung des Motorstroms wird der Schaltvorgang der Schaltmodule in Abhängigkeit des Drehstellungssignals durchgeführt, dessen Phase durch den Phasenkorrektor 8 korrigiert wurde.

Um eine unausgeglichene Schwingung zu steuern, welche in einem magnetischen Lagersystem auftritt, wird ein Signal τ benötigt. Dieses Signal τ wird abgegeben nach wenigstens 1 Impuls/1 Umdrehung des Rotors 31. Der Phasenkorrektor 8 kann ein solches Signal liefern, welches sich zur Steuerung dieses magnetischen Lagers eignet. Dann kann eines der 3-Phasen-Impulssignale, dessen Phasen korrigiert wurden, verwendet werden, um das magnetische Lager mit dem Signal τ zu steuern.

Bei der Steuerung von unausgeglichene Schwingungen durch Verwendung des magnetischen Lagers, wird die magnetische Kraft eingestellt, entsprechend der Drehstellung des Rotors. Das Signal τ , welches als ein 1 Impuls/1 Umdrehung erzeugt wird, wird mittels einer PLL-Schaltung (phased-locked loop) geteilt, um so Drehstellungssignale zu erzeugen, welche sehr fein unterteilt sind. Im Phasenkomparator 9, wird das vom Phasenkorrektor 8 erhaltene Impulssignal τ mit dem MSB (most significant bit) des Zählers 12 verglichen, um die Frequenzdifferenz und Phasendifferenz zu berechnen. Ein Low-Pass-Filter (LPF) 10 filtert die Frequenzdifferenz und die Phasendifferenz, welche vom Phasenkomparator 9 geliefert werden. Ein spannungsgesteuerter Oszillator (VCO) 11 erzeugt in Abhängigkeit der Ausgangsspannung dieses LPF 10 ein Signal. Das im VCO 11 erzeugte Signal wird vom Zähler 12 gezählt und das MSB dieses Zählsig-

nals wird dem Phasenkomparator 9 zurückgeführt.

Diese Schaltungskomponenten sind identisch mit der PLL-Schaltung. Es sei ebenfalls erwähnt, dass das Signal «TT», welches als 1 Impuls/1 Umdrehung erzeugt wird, in die Bit-Zahl des Zählers unterteilt wird. Wenn z.B. der Zähler 12 ein 12-Bit-Zähler ist, wird das als 1 Impuls/1 Umdrehung erzeugte «TT» Signal in $2^{12} = 4096$ Signale unterteilt.

Um eine unausgeglichene Schwingung eines Rotors zu unterdrücken, kann auf diesen Rotors eine Kraft in solcher Weise ausgeübt werden, dass diese unausgeglichene Schwingung verschwindet. Diese Schwingungsunterdrückung kann somit dadurch realisiert werden, dass die Schwingungsunterdrückungskraft aus dem magnetischen Lager als elektromagnetische Kraft des Lagers angewendet wird und diese elektromagnetische Kraft in Form einer Sinuswelle variiert wird. Die Anwendung dieser Schwingungsunterdrückungskraft wird nachstehend mit Bezug auf Fig. 1 näher beschrieben. Eine Sinus- und eine Kosinuswelle werden während einer Zeitperiode unterteilt, mit der Zahl, welche der Teilzahl des Zählers 12 entspricht. Die Werte der Sinus- und Kosinuswelle an den entsprechenden unterteilten Stellen werden in ROM-Speichern 5a und 5b gespeichert. Wenn die Adressaten der ROM-Speicher 5a und 5b dem Ausgang des Zählers 12 entsprechen, wird ein sinusoidales Signal, welches mit der Drehung des Rotors synchronisiert ist, nämlich die unausgeglichene Schwingung erhalten. In diesem Fall, wenn der Zähler 12 ein 12-Bit-Zähler ist, werden die Werte, welche durch Teilung der Sinuswelle und der Kosinuswelle für eine Periode durch 4096 geteilt werden, in den ROM-Speichern 5a und 5b gespeichert. Es sei erwähnt, dass die Werte der Sinus- und der Kosinuswelle vorgängig in den ROM-Speichern 5a und 5b im vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiel gespeichert wurden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass die Werte der Sinus- und der Kosinuswelle an den entsprechenden Unterteilungsstellen des Zählers auf Echtzeitbasis berechnet werden können.

Fig. 5 der Zeichnung zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Steuersystems, in welchem die vorstehend beschriebene Steueremethode auf ein radiales magnetisches Lager angewendet wird, welches in einer rotierenden Maschine montiert ist. Fig. 5 ist ein schematisches Blockdiagramm eines Steuersystems für ein radiales magnetisches Lager für zwei Axen, für welches eine Vorwärtsregelung der unausgebalancierten Kräfte angewendet wird. Das Signal eines X-Axensensors «Xs» und eines Y-Sensorsignals «Ys» aus einem Radialsensor, welcher Verschiebungen des Rotors in radialer Richtung feststellen kann, werden in Signalkonvertern 13a und 13b in Bewegungssignale X und Y konvertiert. Die konvertierten Bewegungssignale X und Y werden den Steuerschaltungen 14a und 14b zugeführt. Nach Massgabe dieser Bewegungssignale X und Y führen die Berechnungen 14a und 14b die Steuer- bzw. Berechnungsoperationen, wie z.B. die PID-Steuerung und die Phasensteuerung durch, um damit einen Verstärker zu steuern, welcher gebraucht wird, um den Elektromagneten eines Lagers zu betreiben.

Die Steuerbefehle für den Verstärker, welche von den Steuerschaltungen 14a und 14b berechnet wur-

den, werden durch die Schaltgeräte 15a und 15b in zwei Steuerbefehle aufgeteilt, nach Massgabe eines positiven und eines negativen Codes. Beide, das positive und das negative Signal, welche von den Steuerbefehlen abgetrennt sind, bilden ein Paar Steuerbefehle für den Verstärker. Beim normalen Verstärker wird diesem bei Bedarf ein Vormagnetisierungsstrom auferlegt. Damit kann die Linearität der durch den Elektromagneten des radialen Lagers erzeugten absorbierenden Kraft verbessert werden. Diese Schaltungen berücksichtigen die Steuerung der unausgebalancierten Kräfte nicht.

Für diese Steuerung wird ein $\sin \Omega t$ Signal und ein $\cos \Omega t$ Signal, welche aus den ROM-Speichern 5a und 5b erhalten werden, zu den Ausgangssignalen der Steuerschaltungen 14a und 14b addiert. In diesem Fall bedeutet das « Ω » die Winkeldrehgeschwindigkeit und das Symbol «t» die Zeit. Da die Grösse einer unausgebalancierten Kraft und eine von deren Phasen je nach der zu steuernden Maschine verschieden voneinander sind, werden sowohl die Phase als auch die Kraft bezüglich jeder der zu steuernden Maschinen eingestellt. In einem Block 17 einer Konstante « $\cos \beta$ » und einem Block 18 einer Konstante « $\sin \beta$ » wird die Phase des $\sin \Omega t$ Signals und die Phase des $\cos \Omega t$ Signals eingestellt. Aus diesen Signalen wird ein Signal $\sin (\Omega t + \beta)$ und $\cos (\Omega t + \beta)$ umgewandelt. Beim vorliegenden Steuersystem wird die Phase « β » eingestellt bis sie übereinstimmt mit der Phasendifferenz zwischen der induzierten Spannung des Motors und der unausgebalancierten Kraft. Die Grösse der unausgebalancierten Kraft wird in einem Block einer Konstante G eingestellt.

Das Feedback-Steuersystem, entsprechend einem anderen Steuerverfahren für unausgebalancierte Kräfte, welche bei einem magnetischen Lager angewendet werden, wird nachstehend mit Bezug auf Fig. 6 erläutert. Fig. 6 ist ein Blockschema für ein Steuersystem für radiale magnetische Lager, welches zwei Axen steuern kann. Nur eine Frequenzkomponente einer unausgebalancierten Schwingung wird einem Verschiebungssignal X und einem Signal Y entnommen, um zurückgeführt zu werden. Ein Zielfilter 20 wird verwendet, um die Frequenzkomponente von unausgebalancierten Schwingungen zu erhalten. Der Zielfilter 20 ist ein Bandpassfilter. Die Frequenz, welche mittels dieses Bandpassfilters auszufiltern ist, neigt immer dazu, mit der Frequenz der Drehgeschwindigkeit des Rotors übereinzustimmen.

Zum Betrieb dieses Zielfilters 20 werden eine Sinuswelle und eine Kosinuswelle benötigt, welche die gleichen Perioden aufweisen wie die Drehgeschwindigkeit des Rotors. Im vorliegenden Fall, wie weiter oben beschrieben, wird das $\sin \Omega t$ Signal und das $\cos \Omega t$ Signal, welche von den ROM-Speichern 5a und 5b stammen, verwendet.

Fig. 7 zeigt ein Detail des Zielfilters 20. Am Anfang wird eine Vektorberechnung zwischen den Bewegungssignalen (X, Y) und den trigonometrischen Funktionssignalen ($\cos \Omega t$, $-\sin \Omega t$) durchgeführt. Diese Vektorberechnung drückt sich in nachstehenden Formeln aus:

$$\begin{aligned} A &= X \cdot \cos \Omega t + Y \cdot \sin \Omega t \\ B &= Y \cdot \cos \Omega t - X \cdot \sin \Omega t \end{aligned}$$

Das Berechnungsergebnis (A, B) wird in den Filter 21 eingegeben, sodass lediglich eine Gleichstromkomponente (A0, B0) abgeleitet wird. Diese Gleichstromkomponente ist eine Amplitude einer Vorwärts-Drehungs-Synchronisationskomponente, welche in den Bewegungssignalen X und Y enthalten ist. Diese Gleichstromkomponente wird zudem vektoriell berechnet, mit $(\cos \Omega t, \sin \Omega t)$, um lediglich die Vorwärts-Rotations-Synchronisationskomponente der Bewegungssignale X und Y herauszuziehen. Wenn nun angenommen wird, dass dieses erhaltene Signal als (X_n, Y_n) bezeichnet wird, kann dieses Signal durch folgende Gleichungen ausgedrückt werden:

$$X_n = A_0 \cdot \cos \Omega t - B_0 \cdot \sin \Omega t$$

$$Y_n = B_0 \cdot \cos \Omega t + A_0 \cdot \sin \Omega t$$

Die Verstärkung ($K \cos \alpha$, $K \sin \alpha$) wird durch diese Rotations-Synchronisationskomponente (X_n, Y_n) multipliziert, und dann das Multiplikationsergebnis zu den Ausgängen der Steuerschaltungen 14a und 14b addiert. Dies ist eine Basisausgestaltung des Feedback-Steuersystems mit Bezug auf die unausgeglichene Schwingungen.

In der vorstehenden Erläuterung liefert der Phasenkorrektor 8 eines der 3-Phasen-Impulssignale an das magnetische Lager. Das Impulssignal «TT», entsprechend dem 1 Impuls/1 Umdrehungssignal wird der PLL-Schaltung zur Steuerung des magnetischen Lagers zugeführt. Dieses Impulssignal wird in eine grosse Zahl von Signalen aufgeteilt, sodass fein unterteilte Drehstellungssignale erzeugt werden.

Es gibt Möglichkeiten bei denen die PLL-Schaltung bei Verwendung des 1 Impuls/1 Umdrehungssignal nicht unter guten Bedingungen verwendbar ist, wie z.B. bei sich schnell folgenden Änderungen der Drehzahlen oder bei einer Maschine mit niedriger Drehzahl. In diesem Fall werden alle Stellungssignale, welche aus der induzierten Spannung erhalten werden, verwendet, um ein 6 Impuls/1 Umdrehung Signal zu erhalten. Dann wird dieses 6 Impuls/1 Umdrehung Signal durch eine PLL-Schaltung frequenzgeteilt, um dieses geteilte Signal zu verwenden. Das Verfahren zur Erzeugung eines solchen 6 Impuls/1 Umdrehung Signals wird wie folgt realisiert. Ein vom Komparator 7 erhaltenes Impulssignal weist ein Impulsverhältnis von 1:1 auf. Das Impulssignal wird am ansteigenden und am abfallenden Ast des Impulssignals ausgelöst. Wenn diese Trigger-Schaltung zur PLL-Schaltung addiert wird, kann ein 2 Impuls/1 Umdrehung Signal bezüglich jeder der drei Phasen erzeugt werden. Da die entsprechenden Phasen um jeweils 120° voneinander verschoben sind, wird das Impulssignal für alle drei Phasen dem ansteigenden bzw. abfallenden Ast des Impulssignals zugeschaltet. Damit werden 6 Impuls/1 Umdrehung Signale erhalten. Wenn die totale Impulszahl des Impulssignals 6-mal vervielfacht wird, kann die Charakteristik der PLL-Schaltung 6-mal verbessert werden.

Bei der PLL-Schaltung zur Steuerung des magnetischen Lagers wird dieses 6 Impuls/1 Umdrehung Signal «TT» frequenzgeteilt, um Adresssignale für die ROM-Speicher 5a und 5b zu erzeugen. Ähnlich wie beim oben stehend beschriebenen Beispiel und unter Verwendung eines 12-Bit-Zählers 12 kann le-

diglich 1/6 der Kapazität dieses Zählers 12 pro Signal verwendet werden, um die Sinuswelleninformation und die Kosinuswelleninformation bezüglich aller sechs Signale zu speichern. Dies weil die maximale Adresszahl des Zählers 12 = 4096 ist. Da die Bit-Zahl des Zählers eine Binärzahl ist, wird die Speicherkapazität 1/8 also nahezu gleich 1/6 der Zählerkapazität pro Signal. Das heisst, es können 12 Bits des 12-Bit-Zählers verwendet werden, wenn ein 1 Impuls/1 Umdrehung Signal verwendet wird, wohingegen nur neun Bits des 12-Bit-Zählers verwendet werden können, wenn ein 6 Impuls/1 Umdrehung Signal als Eingang verwendet wird.

Mit Bezugnahme auf Fig. 8 wird der Betrieb des Zählers beschrieben, wenn ein 6 Impuls/1 Umdrehung Signal als Eingang verwendet wird. Der neunte Bit des Zählers 12 wird dem Phasenkomparator 9 zurückgeführt. Wenn der Zähler 12 6-mal $2^9 = 3072$ Impulse zählt, wird der Zähler 12 zurückgestellt. Mit anderen Worten, der Zähler 12 wird jedesmal zurückgestellt, wenn alle sechs Eingangsimpulse des Impulssignals «TT» innerhalb einer Rotorumdrehung eingegeben werden. Es sei auch hier erwähnt, dass Werte, welche durch Unterteilung entweder der Sinuswelle für eine Zeitperiode oder der Kosinuswelle für eine Zeitperiode durch 3072 erzeugt werden, vorgehängig im ROM-Speicher gespeichert werden. Wie vorstehend erläutert, falls die Kapazität des Zählers dieselbe ist, wird sogar bei Erhöhung der Zahl der Eingangsimpulse pro eine Zeitperiode der Drehung, die Frequenzteilerzahl nicht immer erhöht. Dies stellt offensichtlich eine grobe Kontrolle dar. Wenn hingegen die Impulszahl pro 1 Zeitperiode erhöht wird, derart, dass die Geschwindigkeitsänderung der Drehung sehr schnell wird, oder die Drehgeschwindigkeit des Rotors sehr langsam ist, kann die Drehinformation des Rotors, wie z.B. die Drehgeschwindigkeit und die Beschleunigung dieser Drehgeschwindigkeit sehr genau festgestellt werden. Somit kann der Rotor unter stabilen Bedingungen angetrieben werden.

Gemäss der vorliegenden Erfindung wird der Drehstellungssensor nicht mehr benötigt, und dies bei den magnetischen Lagern zur Abstützung der rotierenden Maschine und dem bürstenlosen Gleichstrommotor zum Antrieb der rotierenden Maschine. Somit können sowohl die magnetischen Lager als auch die rotierenden Maschinen mit solchen Lagern relativ kostengünstig gebaut werden. Da der Drehstellungssensor nicht mehr benötigt wird, kann zudem die Länge der Rotorwelle kürzer ausfallen, was zu einer erhöhten Steifigkeit des Rotors führt. Wenn nun aber die Steifigkeit des Rotors verbessert wird, kann auch die kritische Drehzahl des Rotors erhöht werden, sodass die rotierende Maschine mit hohen Geschwindigkeiten bzw. Drehzahlen unter stabilen Bedingungen angetrieben wird. Dies wiederum bedeutet, dass das magnetische Lager und die rotierende Maschine, welche mit einem solchen Lager ausgerüstet ist, unterhaltsfrei während relativ langer Zeit betrieben werden. Die Zuverlässigkeit des magnetischen Lagers und der rotierenden Maschine ist damit wesentlich verbessert.

Patentansprüche

1. Magnetisches Lager für eine rotierende Maschine zum Drehen beziehungsweise Abstützen eines Rotors, welcher von einem bürstenlosen Gleichstrommotor antreibbar ist, gekennzeichnet durch eine Steuerschaltung für das magnetische Lager, um diesem in Antwort auf eine induzierte Spannung des bürstenlosen Gleichstrommotors ein Drehpositionssignal einzugeben und um durch Frequenzteilung des Drehpositionssignals ein Steuersignal für das magnetische Lager zu erzeugen.

2. Magnetisches Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der bürstenlose Gleichstrommotor Dreiphasenwindungen aufweist und dass die genannte induzierte Spannung durch Verwendung einer Klemmenspannung jeder der Windungen der Dreiphasenwindungen und eines Phasenstroms jeder der Dreiphasenwindungen erzeugbar ist.

3. Magnetisches Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der bürstenlose Gleichstrommotor Dreiphasenwindungen aufweist und dass das Drehpositionssignal aus einer Phasendifferenz zwischen einer Klemmenspannung jeder der Windungen der Dreiphasenwindungen und der genannten induzierten Spannung erzeugbar ist.

4. Magnetisches Lager nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der bürstenlose Gleichstrommotor Dreiphasenwindungen aufweist, und dass das Drehpositionssignal aus einer Phasendifferenz zwischen einer Klemmenspannung jeder der Windungen der Dreiphasenwindungen und der genannten induzierten Spannung erzeugbar ist.

5. Rotierende Maschine mit einem Rotor und einem bürstenlosen Gleichstrommotor zum Antrieb des Rotors sowie einem magnetischen Lager nach Patentanspruch 1, das paarweise und radial ausgebildet ist, zum Abstützen des Rotors, gekennzeichnet durch eine Motor-Steuerschaltung zum Steuern des bürstenlosen Gleichstrommotors, Mitteln in der Motor-Steuerschaltung zum Feststellen einer Drehposition des Motors und durch eine Steuerschaltung für das magnetische Lager, um dem magnetischen Lager in Abhängigkeit eines Drehpositionssignals eine Steuerspannung zuzuführen.

6. Maschine nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Motor-Steuerschaltung eine Phasendifferenz zwischen einer Klemmenspannung und einer induzierten Spannung berechnet, basierend auf den Klemmenspannungen der Dreiphasenwindungen des bürstenlosen Gleichstrommotors und Motorphasenströmen der Windungen und damit das Drehpositionssignal basierend auf der Phasendifferenz abgibt.

7. Maschine nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerschaltung für das Paar radialer magnetischer Lager das Drehpositionssignal durch Frequenzteilung aufteilt und in jedem frequenzgeteilten Zeitabschnitt dem Paar radialer magnetischer Lager eine Steuerspannung zuführt.

8. Maschine nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerschaltung für das Paar radialer magnetischer Lager das Drehpositionssignal durch Frequenzteilung aufteilt und in jedem frequenzgeteilten Zeitabschnitt dem Paar radialer magnetischer Lager eine Steuerspannung zuführt.

9. Maschine nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Drehpositionssignal während jeder vollen Umdrehung des Rotors entweder 1-mal oder 6-mal erzeugbar ist.

5 10. Maschine nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass das Drehpositionssignal während jeder vollen Umdrehung des Rotors entweder 1-mal oder 6-mal erzeugbar ist.

10 11. Maschine nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass das Drehpositionssignal bei jeder Drehung des Rotors um 1 Zeitperiode entweder 1-mal oder 6-mal erzeugbar ist.

12. Rotierende Maschine, gekennzeichnet durch einen bürstenlosen Gleichstrommotor mit dauermagnetischem Rotor; Zentrifugalschaukelräder auf beiden Wellenendabschnitten des Rotors; magnetische Lager nach Patentanspruch 1, die als ein Paar von an der Maschine montierten magnetischen Radiallagern ausgebildet sind, und ein magnetisches Axialdrucklager, welche den Rotor drehbar abstützen; Steuermittel für die magnetischen Lager zur Steuerung der magnetischen Radiallager und das magnetische Axialdrucklager; Drehstellungs-Detektormittel zur Berechnung einer induzierten Spannung, welche von Dreiphasenwindungen zum Antrieb des Rotors basierend auf einem Motorphasenstrom der genannten Dreiphasenwindung und einer Klemmenspannung der Dreiphasenwindung induziert wird, und zur Erzeugung eines einmaligen Drehpositionssignals für jede volle Rotorumdrehung; und durch Mittel um das von den Drehstellungs-Detektormitteln erzeugte Drehpositionssignal der Steuerschaltung für die magnetischen Lager zuzuführen.

13. Verfahren zum Betrieb eines magnetischen Lagers nach Patentanspruch 1 zum Antrieb einer rotierenden Maschine nach Patentanspruch 12, welche von einem bürstenlosen Gleichstrommotor mit dauermagnetischem Rotor angetrieben ist und durch ein magnetisches Lager nach Patentanspruch 1 abgestützt ist, gekennzeichnet durch folgende Verfahrensschritte:

40 -- Bildung eines Drehpositionssignals, welches synchronisiert ist mit einer Drehung des Rotors aus der induzierten Spannung des Gleichstrommotors, welche durch Drehen des dauermagnetischen Rotors erzeugt wird, um so eine Drehstellung des Rotors zu identifizieren;

45 -- Frequenzteilung des Impulssignals mittels einer so genannten phasenstarrten Schlaufe, auch als phase-locked loop bezeichnet, zwecks Identifizierung einer detaillierten Drehstellung des Rotors; und

50 -- Erzeugung einer tragenden elektromagnetischen Kraft im magnetischen Lager unter Verwendung einer Sinus- und einer Kosinusfunktion entsprechend der genannten detaillierten Drehstellung gemäss dem Identifizierungsschritt.

55 14. Verfahren nach Anspruch 13, ferner gekennzeichnet durch einen Schritt, um im magnetischen Lager tragende elektromagnetische Kräfte zu erzeugen, welche bei Vorwärtsregelung auf den Rotor wirkende unausgeglichene Kräfte aufheben.

60 15. Verfahren nach Anspruch 13, ferner gekennzeichnet durch einen Schritt, um im magnetischen Lager tragende elektromagnetische Kräfte zu erzeugen, welche bei selbsttätiger Regelung auf den Rotor wirkende unausgeglichene Kräfte aufheben.

FIG. 1

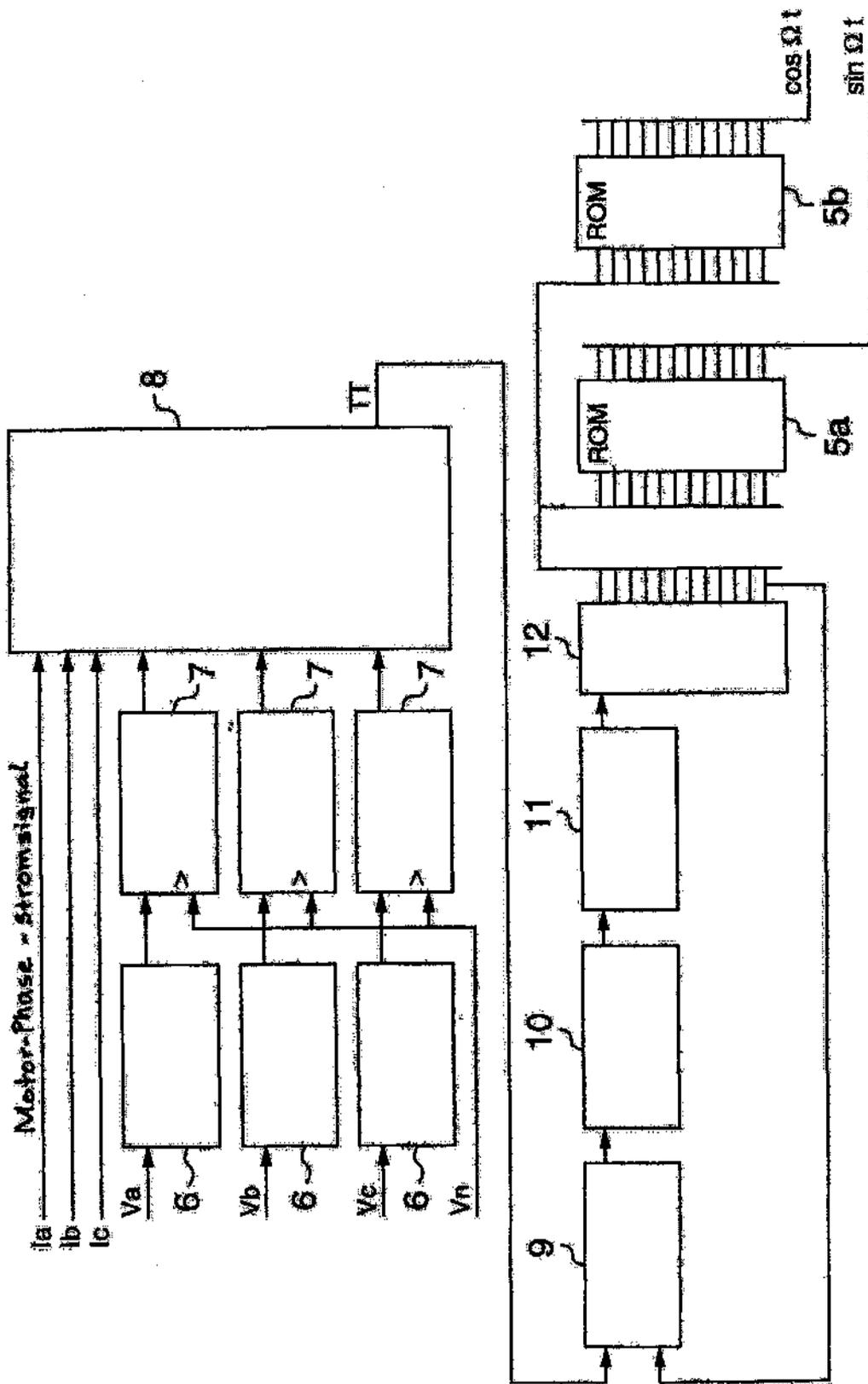


FIG. 2

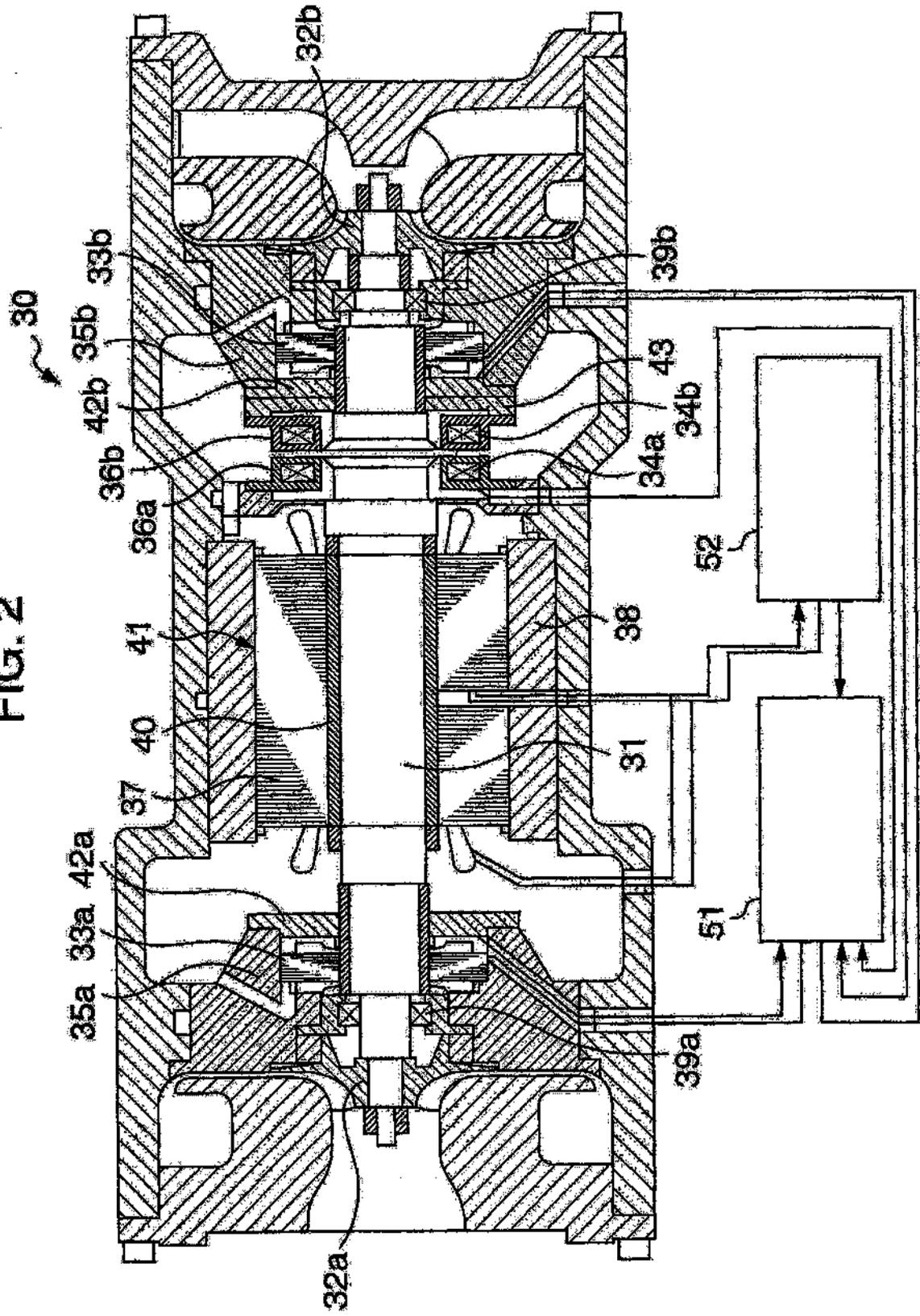


FIG. 3

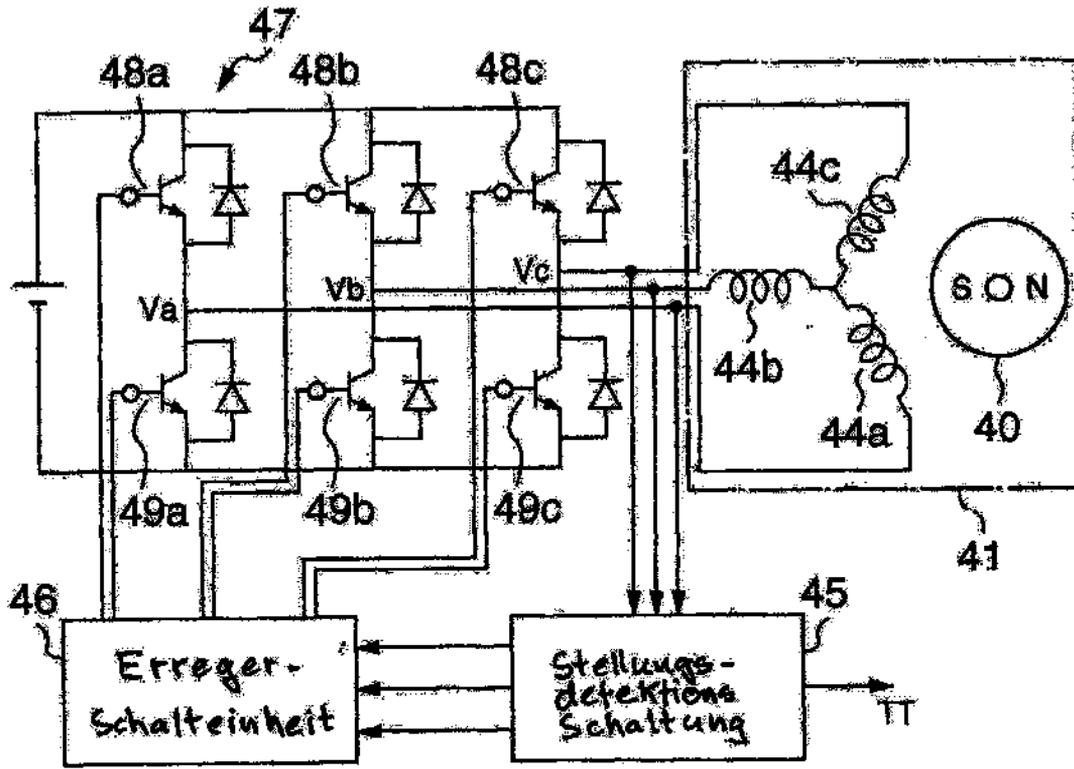


FIG. 4

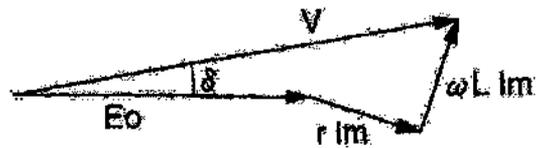


FIG. 5

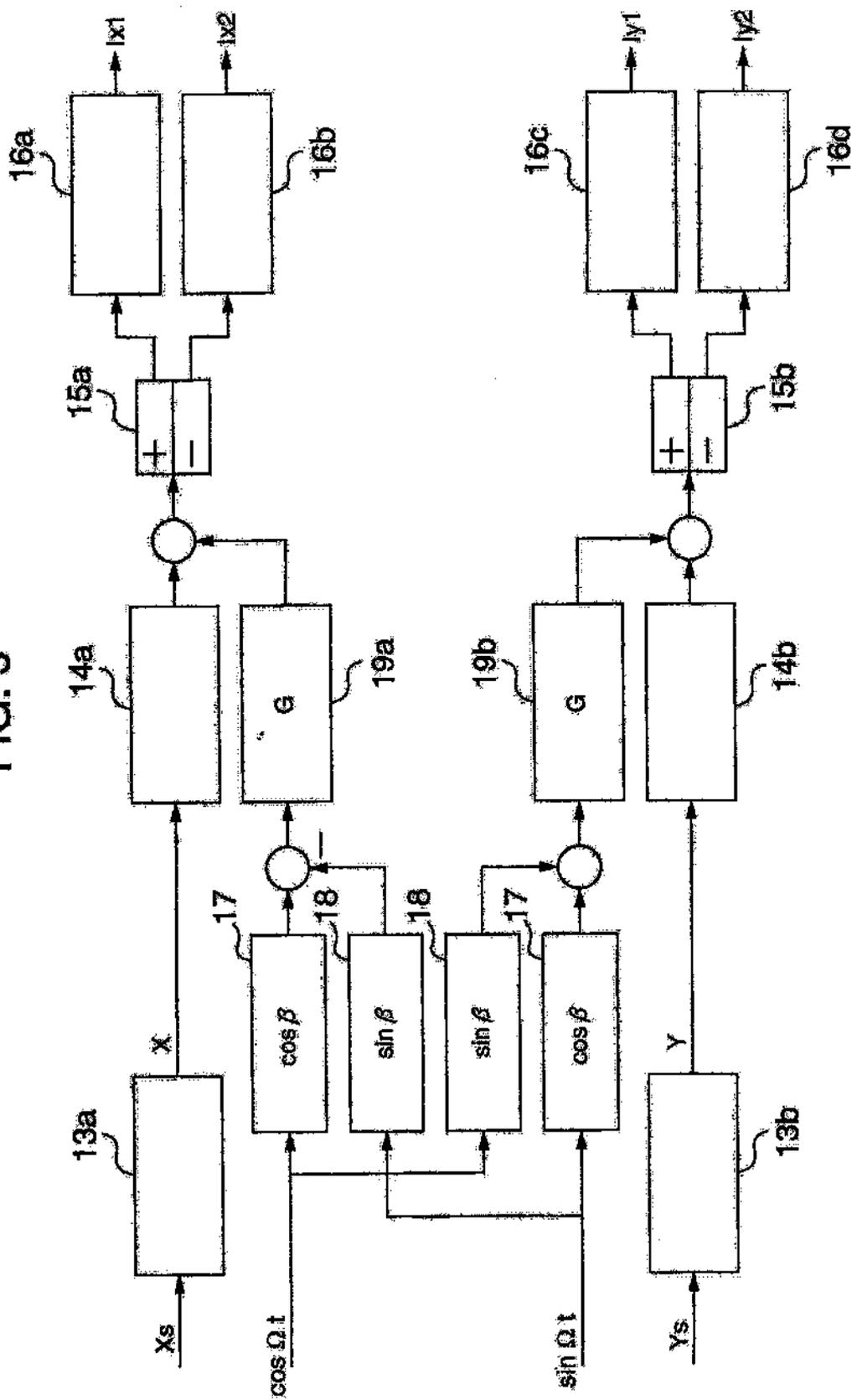


FIG. 6

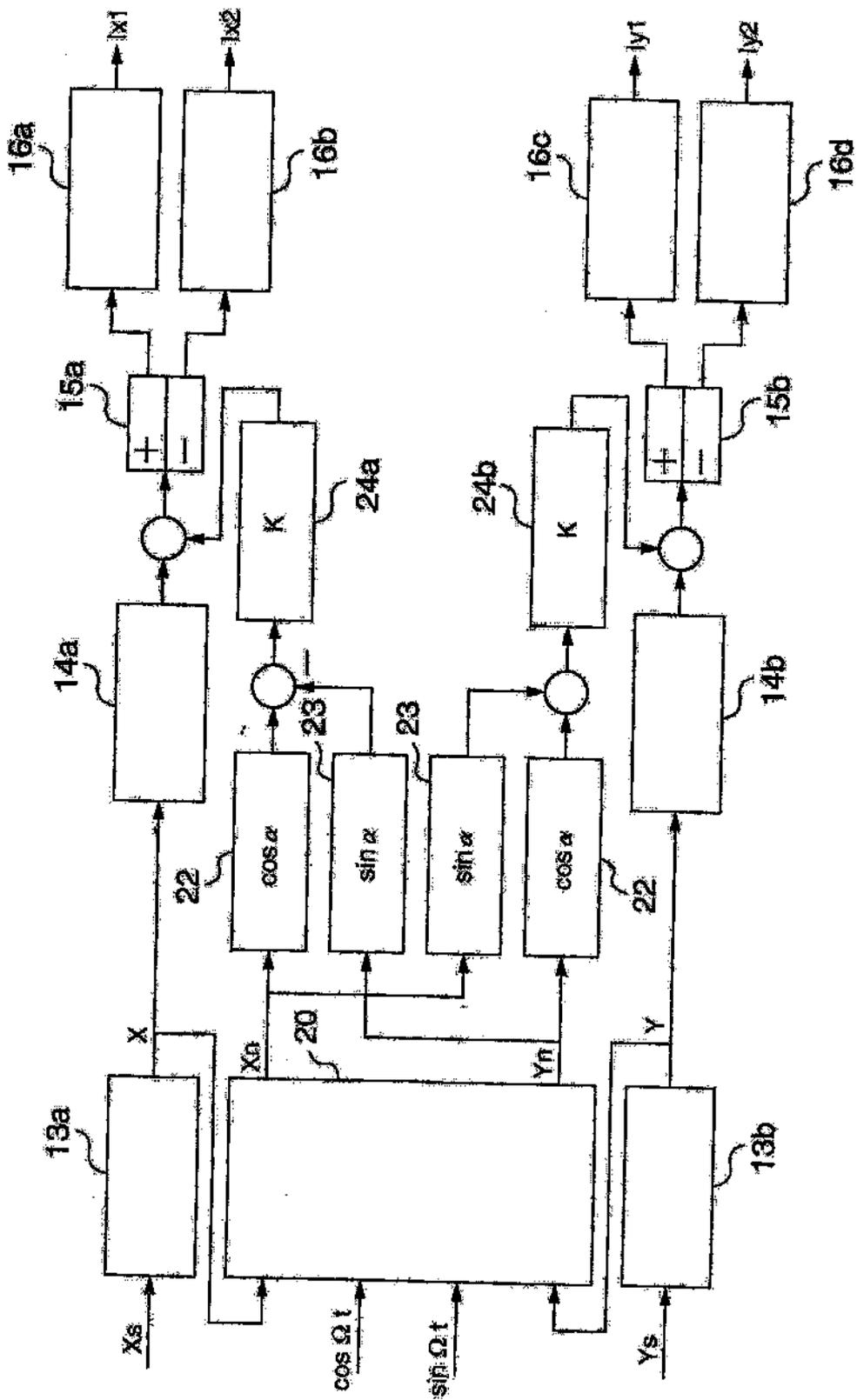


FIG. 7

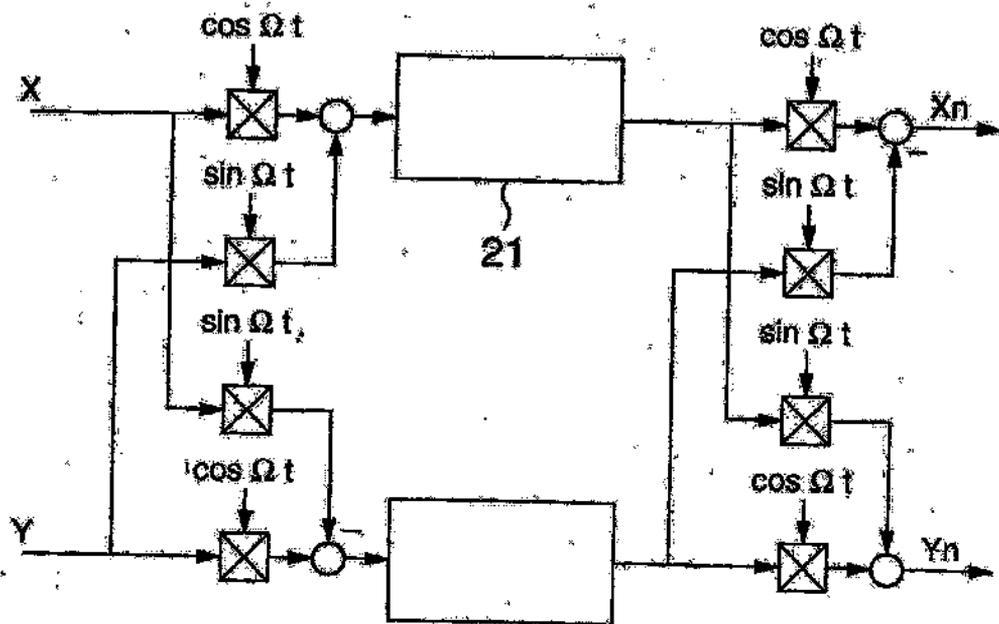


FIG. 8

