

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50555/2012
(22) Anmeldetag: 04.12.2012
(45) Veröffentlicht am: 15.08.2014

(51) Int. Cl.: **H02K 7/09** (2006.01)
F16C 32/04 (2006.01)
H02P 25/08 (2006.01)
H02K 7/08 (2006.01)
H02K 7/02 (2006.01)
H02P 6/04 (2006.01)
H02P 6/00 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
WO 2010137766 A1
US 2006238053 A1
US 5424595 A
US 6727618 B1

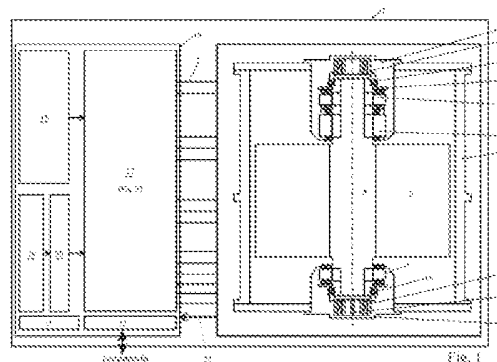
(73) Patentinhaber:
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
1040 WIEN (AT)

(72) Erfinder:
Schulz Alexander Dipl.Ing. Dr.techn.
1190 Wien (AT)
Sima Harald Dipl.Ing.
3130 Herzogenburg (AT)
Hinterdorfer Thomas Dipl.Ing.
1070 Wien (AT)
Wassermann Johann Dr.techn.
1210 Wien (AT)
Neumann Manfred Ing.
1210 Wien (AT)

(74) Vertreter:
SONN & PARTNER PATENTANWÄLTE
WIEN

(54) Lager- und Antriebs-System

(57) Lager- und Antriebs-System (1) mit mindestens einer elektrischen Maschine (2) samt Ansteuerung (50), wobei die Lagerkraft des jeweiligen Lagerfreiheitsgrades der Maschine (2) aktiv beeinflussbar ist, und mit einer berührungsfrei arbeitenden, aktiv beeinflussbaren Lagerung (6, 7) samt Ansteuerung (55), wobei die Ansteuerung (56) der Maschine (2) zwei Betriebsmodi aufweist, von denen der eine Betriebsmodus eine Minimierung der Kräfteinflüsse der elektrischen Maschine (2) auf die betreffenden Lagerfreiheitsgrade und der andere Betriebsmodus eine aktive Lagerkraftgenerierung der elektrischen Maschine (2) zur Lagerunterstützung bewirkt, und wobei eine Detektions- und Schalteinheit (52', 52'') zur Umschaltung zwischen den zwei Betriebsmodi bei Über- bzw. Unterschreiten eines vorgegebenen Grenzwerts von zumindest einem Betriebsparameter vorgesehen ist, mit der eine Regel- oder Steuereinheit (35) für die Maschine (2') und die Lagerung (6, 7) verbunden ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Lager- und Antriebs-System mit mindestens einer elektrischen Maschine samt Ansteuerung, wobei die Lagerkraft des jeweiligen Lagerfreiheitsgrades der Maschine aktiv beeinflussbar ist, und mit einer berührungsfrei arbeitenden, aktiv beeinflussbaren Lagerung samt Ansteuerung.

[0002] Bei bekannten elektrischen Maschinen, d.h. Motoren und/oder Generatoren, vgl. z.B. M. Ooshima, S. Kobayashi, and H. Tanaka, "Magnetic Suspension Performance of a Bearingless Motor/Generator for Flywheel Energy Storage Systems", IEEE, 2010; Charpentier J.F., Lemarquand G.: A comparative analysis of permanent magnet-type bearingless synchronous motors for fully magnetically levitated rotors, Journal of Applied Physics, vol. 83, no. 11, 1998; und Yanbo Lv, Wenquan Zuo, Xiaoyan Diao and Huangqiu Zhu, Modeling and digital control System for bearingless permanent magnet synchronous motor based on magnetic energy equation, 1 Aug 2011); aber auch WO 2010/137766 A1 und US 6 727 618 B1 ist häufig eine Trennung der Aufgaben Lagerung und Antrieb vorgesehen. Beispielsweise werden bei rotierenden Lager- und Antriebs-Systemen mit magnetischer Lagerung spezielle Regelungen, sog. „Unbalance Control“, dazu verwendet, um den Rotor um seine Trägheitshauptachse rotieren zu lassen, wodurch die erforderlichen Lagerkräfte - und damit die Leistungsaufnahme der Lagerung - minimiert werden (vgl. z.B. Betschon F.: Design Principles of Integrated Magnetic Bearings, Diss. ETH Nr.13643, Dissertation, ETH-Zürich, 2000; oder Schweitzer G., Maslen E.H.: Magnetic Bearings Theory, Design, and Application to Rotating Machinery, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009). Diese einfache Maßnahme kann vorteilhaft eingesetzt werden, solange keine elektrische Maschine (Motor und/oder Generator) in Kombination mit „Unbalance Control“ der Lagerung eingesetzt wird, da die elektrische Maschine aufgrund des dadurch exzentrischen Laufs des Rotors im Bereich der elektrischen Maschine systembedingt zusätzliche Radialkräfte generiert, wodurch sich ein zusätzlicher, zum Teil stark ansteigender Energiebedarf für die Lagerung ergibt.

[0003] Lagerlose elektrische Maschinen, die entweder mit Hilfe zusätzlicher Wicklungen und/oder durch Separation der Phasenströme und einer speziellen Ansteuerung zusätzlich zum Antriebsmoment radiale und/oder axiale Lagerkräfte generieren können (vgl. auch US 2006/0238053 A und US 5 424 594 A), werden eingesetzt, um auf eine dedizierte radiale oder axiale magnetische Lagerung verzichten zu können. Abhängig vom Typ der eingesetzten elektrischen Maschine(n) besteht beispielsweise nicht in jeder Winkelstellung die Möglichkeit, Lagerkräfte einzubringen (z.B. bei einem 6/4 „Switched Reluctance“ Motor - geschaltete Reluktanzmaschine), und/oder der resultierende Wirkungsgrad bei der Generierung von Lagerkräften ist gegenüber einer dedizierten magnetischen Lagerung geringer.

[0004] Daraus ergibt sich das Problem einer optimalen Betriebsführung eines kombinierten Lager-Antrieb-Systems durch die funktionelle Kombination von Lager- und Motorkomponenten zur Maximierung des Gesamtwirkungsgrades, und dies bei der gleichzeitigen Gewährleistung der erforderlichen Lagerpräzision und höchster Störkraftresistenz.

[0005] Zur Lösung dieser Aufgabe sieht die Erfindung ein Lager- und Antriebs-System wie eingangs angegeben vor, das dadurch gekennzeichnet ist, dass die Ansteuerung der Maschine zwei Betriebsmodi aufweist, von denen der eine Betriebsmodus eine Minimierung der Krafteinflüsse der elektrischen Maschine auf die betreffenden Lagerfreiheitsgrade und der andere Betriebsmodus eine aktive Lagerkraftgenerierung der elektrischen Maschine(n) zur Lagerunterstützung bewirkt, und dass eine Detektions- und Schalteinheit zur Umschaltung zwischen den zwei Betriebsmodi bei Über- bzw. Unterschreiten eines vorgegebenen Grenzwerts von zumindest einem Betriebsparameter vorgesehen ist, mit der eine Regel- oder Steuereinheit für die Maschine und die Lagerung verbunden ist.

[0006] Vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0007] So ist es insbesondere günstig, wenn die Detektions- und Schalteinheit zur Erfassung

einer Abweichung des Läufers bzw. Ankers der Maschine aus einer geometrischen Mittellage eingerichtet ist. Vorzugsweise sieht die Regel- oder Steuereinheit eine auf einem gespeicherten Kennfeld oder Modell samt Beobachter basierende asymmetrische Bestromung der Spulen der Maschine vor.

[0008] Weiters ist es von Vorteil, wenn als Betriebsparameter die Auslenkung und bzw. oder die Auslenkungsgeschwindigkeit des Läufers bzw. Ankers und bzw. oder die Beschleunigung des Gehäuses der Maschine vorgegeben sind. Es kann grundsätzlich ein Betriebsparameter allein oder aber eine gewichtete Kombination von mehreren Betriebsparametern bei Überschreiten bzw. Unterschreiten eines vorgegebenen Grenzwerts die Umschaltung des Betriebsmodus bewirken. Im letzteren Fall ist es demgemäß günstig, wenn die Detektions- und Schalteinheit eingerichtet ist, der Umschaltung des Betriebsmodus im Fall von mehreren Betriebsparametern eine gewichtete Kombination von Betriebsparametern zugrunde zu legen.

[0009] Auch ist es vorteilhaft, wenn mehrere elektrische Maschinen vorhanden sind, die eine unabhängige Leistungsregelung sowie eine Einrichtung zur Leistungsaufteilung aufweisen. Dabei kann es zweckmäßig sein, wenn die Einrichtung zur Leistungsaufteilung eingerichtet ist, die elektrischen Maschinen im Sinne einer Maximierung des Gesamtwirkungsgrads der elektrischen Maschinen anzusteuern; wenn die Einrichtung zur Leistungsaufteilung eingerichtet ist, die elektrischen Maschinen im Sinne einer Maximierung des Gesamtwirkungsgrads der elektrischen Maschinen samt Ansteuerung anzusteuern; dahingehend angesteuert werden, dass der Gesamtwirkungsgrad oder wenn die Einrichtung zur Leistungsaufteilung eingerichtet ist, die elektrischen Maschinen (2.1, 2.2) im Sinne einer Minimierung der Betriebstemperatur von Leistungskonvertern (26) anzusteuern, die die elektrischen Maschinen ansteuern; auch ist es günstig, wenn die elektrischen Maschinen mittels der Einrichtung zur Leistungsaufteilung dahingehend angesteuert werden, dass die Verluste innerhalb des Maschinengehäuses minimiert werden.

[0010] Das vorliegende System kann dabei rotatorisch oder translatorisch sein.

[0011] Von Vorteil ist das System besonders dann, wenn es mit einem Schwungradspeicher zur Speicherung von elektrischer Energie (Flywheel Energy Storage System-FESS) ausgeführt ist.

[0012] Die Erfindung ermöglicht eine hinsichtlich Gesamtwirkungsgrad und Lagerpräzision bei höchster Störkraftresistenz optimale Betriebsführung von Systemen, die mindestens eine elektrische Maschine samt Ansteuerung und eine berührungsfrei arbeitende, aktiv beeinflussbare Lagerung samt Ansteuerung aufweisen, wobei eine Erhöhung der Gesamtenergieeffizienz des Lager- und Antriebs-Systems mittels einer automatischen Detektions- und Schalteinheit in Verbindung mit einer Steuer- bzw. Regeleinheit erzielt wird.

[0013] Die Bezeichnung „(automatische) Detektions- und Schalteinheit“ ist dabei allgemein zu verstehen und soll dabei nicht nur konkrete Schalter betreffen, sondern auch andere Realisierungen, z.B. Software-Lösungen, Fuzzy Control-Lösungen etc. mit einbeziehen.

[0014] Die elektrische Maschine samt Ansteuerung ist so ausgeführt, dass eine aktive Einflussnahme auf die Lagerkraft des jeweiligen Lagerfreiheitsgrades zumindest bei gewissen Betriebszuständen des Lager- und Antriebs-Systems möglich ist. Dies kann auch im Fall von mehreren elektrischen Maschinen samt Ansteuerung realisiert werden. Die automatische Detektions- und Umschalteinheit und die Steuer- bzw. Regeleinheit bestimmen den Betriebsmodus - abhängig vom aktuellen Betriebspunkt bzw. Zustand des Lager- und Antriebs-Systems - zumindest der elektrischen Maschine(n) hinsichtlich „kräftefrei“ und „lagerkraftgenerierend“; bei Vorhandensein mehrerer elektrischer Maschinen geben diese Einheiten die Aufnahme- bzw. Abgabe-Leistungsaufteilung zwischen diesen elektrischen Maschinen vor. Als Umschaltbedingung kann hierbei die Abweichung der Struktur (Läufer bzw. Anker) von der Sollage und bzw. oder die Abweichungsgeschwindigkeit und bzw. oder eine gewichtete Kombination dieser beiden Parameter oder beispielsweise auch die Beschleunigung des Gehäuses herangezogen werden.

[0015] Der Betriebsmodus „kräftefrei“ bewirkt eine Bestromung der einzelnen Spulen der elektrischen Maschine(n) dahingehend, dass die Kräfte der elektrischen Maschine(n) trotz

Auslenkung des Läufers aus der geometrischen Mittellage in Richtung der betreffenden Lagerfreiheitsgrade minimiert werden. Hierdurch wird beispielsweise ein Betrieb eines rotatorischen Lager- und Antriebs-Systems in seiner Trägheitshauptachse ohne zusätzliche, von der dedizierten Lagerung zu generierenden Lagerkräfte ermöglicht, wodurch der Energiebedarf für die Lagerung minimiert wird.

[0016] Ein anderer Betriebsmodus bewirkt bei Bedarf eine aktive Lagerkraftgenerierung der elektrischen Maschine(n), um die dedizierte Lagerung zu unterstützen, beispielsweise um außergewöhnlich große Störkräfte auf eine Struktur (z.B. Läufer) abzustützen oder bei Ausfall der dedizierten Lagerung als redundantes Lager zu fungieren. Dadurch ist entweder eine höhere Lagerpräzision, selbst bei großen Störkräften bzw. Störkraftanstiegsgeschwindigkeiten, möglich, die ohne den zusätzlichen Einsatz der elektrischen Maschine(n) als Lagerunterstützung zu starken Abweichungen der Struktur von der jeweiligen Sollposition führen würden, oder es ist eine schwächere Dimensionierung der dedizierten Lagerung möglich, die dadurch wiederum geringere Verluste aufweist.

[0017] Die Umschaltung zwischen den unterschiedlichen Betriebsmodi kann abhängig vom Betriebszustand des Lager- und Antriebs-Systems z.B. wie folgt bewerkstelligt werden:

[0018] (1) Solange z.B. der Rotororbit und/oder die translatorische Geschwindigkeit des Rotormittelpunkts und/oder die Beschleunigung des Maschinen-Gehäuses innerhalb vorgeschriebener Grenzen bleibt bzw. bleiben, erfolgt

[0019] o die Kraftgenerierung nur mittels der berührungsfreien Lagerung im bekannten „Unbalance Control“-Betrieb, d.h. für rotatorische Systeme vorteilhafterweise die Lagerung des Rotors in dessen Trägheitshauptachse, und

[0020] o die Bestromung der Spulen der elektrischen Maschine(n) dahingehend, dass auch bei einer Lage des Rotors (Läufers) außerhalb des geometrischen Mittelpunkts die Einflüsse auf die betreffenden Lagerfreiheitsgrade minimiert werden (= "kräftefreier Lauf").

[0021] (2) Sobald eine Verletzung der obigen Bedingung für den Rotor auftritt (z.B. wenn sich der Rotormittelpunkt außerhalb einer vordefinierten Schranke (z.B. für Rotoren ein vordefinierter Orbit und/oder eine zu hohe Auslenkungsgeschwindigkeit) befindet), erfolgt eine automatische Umschaltung des Betriebsmodus, wobei

[0022] o die dedizierte Lagerung eine anteilige Rückführung der Struktur (des Läufers) in deren Sollposition bzw. deren Soll-Orbit für rotatorische Systeme bewirkt,

[0023] o die elektrische Maschine so angesteuert wird, dass sie Lagerkräfte generieren kann (= "Lagerbetrieb") und somit die dedizierte Lagerung dabei unterstützt, die Struktur wieder in deren Sollposition bzw. deren Soll-Orbit für rotatorische Systeme zu bringen.

[0024] Um eine weitere Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades zu erzielen, können die automatische Detektions- und Schalteinheit und die Steuer- bzw. Regeleinheit dahingehend ausgeführt werden, dass eine Leistungsaufteilung zwischen mehreren elektrischen Maschinen erfolgt. Diese kann z.B. mit einer übergeordneten separaten Reglerbaugruppe oder mit einer in die Antriebsregelung integrierte Baugruppe ausgeführt sein, welche die Stellgröße in Abhängigkeit vom Betriebszustand für die jeweilige Antriebsregelung vorgibt.

[0025] Wenn das Gesamtwirkungsgrad-Optimum im Teillastbereich liegt, kann die Betriebsführung der elektrischen Maschine(n) wie folgt realisiert werden:

[0026] ■ Bei Lager- und Antriebs-Systemen mit einer elektrischen Maschine:

[0027] o $P_{el,system} < P_{\eta,max}$ (System-Aufnahme-/Abgabe-Leistungen unterhalb der Leistung, die zum maximalen Wirkungsgrad der elektrischen Maschine führt): Es erfolgt eine Modulation oder Pulsation der Ansteuer- bzw. Abgabeleistung, d.h. eine modulierte oder gepulste Ansteuerung der elektrischen Maschine im Arbeitspunkt

mit optimalem Gesamtwirkungsgrad, wobei beispielsweise eine Pulsweitenmodulation für die Leistung eingesetzt werden kann, bei der die Pulsweite dem Verhältnis aus erforderlicher Abgabeleistung zu Abgabeleistung mit maximalem Gesamtwirkungsgrad entspricht: $P_{el,system}/P_{\eta,max}$.

[0028] o $P_{el,system} \geq P_{\eta,max}$ (Aufnahme-/Abgabe-Leistungen gleich oder oberhalb der Leistung für maximalen Gesamtwirkungsgrad): Es erfolgt ein durchgehender (ungepulster) Betrieb mit der erforderlichen Aufnahme-/Abgabe-Leistung.

[0029] Bei Rotoren mit n elektrischen Maschinen:

[0030] Die Aufteilung der Aufnahme-/Abgabe-Leistungen der einzelnen im System wirkenden Maschinen erfolgt so, dass sich in Summe der bestmögliche Gesamtwirkungsgrad ergibt:

[0031] o $P_{el,system} / n < P_{\eta,max}$: Betrieb von m elektrischen Maschinen mit jener Leistung, welche zum optimalen Wirkungsgrad der elektrischen Maschinen führt, d.h.

$$m = \text{floor}\left(\frac{P_{el,system}}{P_{\eta,max}}\right),$$

mit der Funktion floor(), die nach unten rundet, und einer elektrischen Maschine, die wie oben beschrieben gepulst betrieben wird, und im Mittel die Leistung

$$P = P_{el,system} - P_{\eta,max} \cdot m.$$

liefert.

[0032] o $P_{el,system}/n < P_{\eta,max}$: es werden die Leistungen der n Maschinen so aufgeteilt, dass der Gesamtwirkungsgrad maximiert wird. Dieser ist gegeben durch

$$\eta_{ges} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\eta(P_i)}}.$$

[0033] Die optimale Leistungsaufteilung erhält man aus dem Gleichungssystem

$$\frac{\partial \eta_{ges}}{\partial P_i} = 0; \quad i = 1, \dots, n.$$

[0034] Die Funktion $\eta(P_i)$ kann beispielsweise durch ein Polynom oder durch Splines an gemessene Kurven oder an Simulationsergebnisse angepasst werden, wodurch die Optimierung online durchgeführt werden kann.

[0035] Ebenso kann die Leistungsaufteilung im Vorfeld (offline) berechnet und in einem Kennfeld abgespeichert werden.

[0036] Beim Einsatz von elektrischen Maschinen mit der Funktionsmöglichkeit als lagerndes Element kann je nach Anwendungsfall zwischen unterschiedlichen Ausprägungen unterschieden werden:

[0037] • Eine Lagerfunktion/Lagerunterstützung des Antriebs hinsichtlich auf den Schwerpunkt wirkender Kräfte erfordert den Einsatz von mindestens einer lagerfähigen elektrischen Maschine, die möglichst nahe dem Schwerpunkt bzw. optimaler Weise im Schwerpunkt angeordnet ist.

[0038] • Eine Lagerfunktion/Lagerunterstützung des Antriebs hinsichtlich auf den Schwerpunkt wirkender Kräfte sowie Momente erfordert den Einsatz von mindestens zwei lagerfähigen elektrischen Maschinen, die idealerweise weit außerhalb des Schwerpunktes angeordnet sind.

[0039] Es sei erwähnt, dass außer der oben angeführten „Unbalance Control“ selbstverständ-

lich auch andere Regelalgorithmen, wie z.B. „Active Vibration Control“, im Rahmen der Erfindung anwendbar sind.

[0040] Die Sollposition bzw. der Soll-Orbit kann entweder im Vorhinein festgelegt oder mittels eines übergeordneten Reglers vorgegeben werden. Dieser übergeordnete Regler sucht jene Sollpositionen bzw. jenen Soll-Orbit, der in Summe die geringsten erforderlichen Ströme in den Radiallagern und der/den elektrischen Maschine(n) ergibt. Hierzu können die Ströme von Lager und elektrischen Maschinen für jeweils einen Arbeitspunkt erfasst werden und die Sollposition bzw. der Soll-Orbit kann mittels Minimierungs-Algorithmus gefunden werden. Beispielsweise können hierzu kleine Änderungen in der Sollposition bzw. dem Soll-Orbit durchgeführt werden, und die resultierende Änderung in der Summe der mittleren Ströme kann zur Optimierung für den jeweiligen Arbeitspunkt herangezogen werden.

[0041] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von in der Zeichnung dargestellten, bevorzugten Ausführungsbeispielen, auf die sie jedoch nicht beschränkt sein soll, noch weiter erläutert. Es zeigen:

- [0042]** Fig. 1 ein Blockschema eines rotatorischen Lager- und Antriebs-Systems mit Schwungrad (FESS - Flywheel Energy Storage System-Schwungrad-Energiespeichersystem) mit Hybridmagnetlager-Regelung und -Ansteuerung;
- [0043]** Fig. 2 in einem Blockschaltbild eine Einheit zur digitalen Regelung und Leistungselektronik für das System gemäß Fig. 1;
- [0044]** Fig. 3 in einem schematischen Querschnitt als Beispiel einen geschalteten Reluktanzmotor (SRM) mit sechs Statorpolen und vier Rotorpolen (kurz: 6/4-SRM), wie er im System gemäß Fig. 1 und 2 vorgesehen ist;
- [0045]** Fig. 4 in einer schematischen Querschnittsdarstellung ähnlich Fig. 3 den Aufbau eines aktiven radialen Magnetlagers;
- [0046]** Fig. 5 ein beispielhaftes Schaltbild eines 2-Quadranten-Konverters eines Zwischenkreises zur Ansteuerung der SRM- und Magnetlagerspulen;
- [0047]** Fig. 6 ein Blockschaltbild einer Einheit für die SRM-Phasenregelung und -Ansteuerung, wie sie in der Maschinen-Regelung und -Ansteuerung gemäß Fig. 7 eingesetzt werden kann;
- [0048]** Fig. 7 ein Blockschaltbild einer Einheit für die Maschinen-Regelung und -Ansteuerung, wie sie in der Einheit für die digitale Regelung und Leistungselektronik gemäß Fig. 2 eingesetzt werden kann;
- [0049]** Fig. 8 ein Blockschaltbild einer Einheit für die Radialmagnetlager-Regelung und -Ansteuerung, wie sie in der digitalen Regelung und Leistungselektronik gemäß Fig. 2 eingesetzt werden kann;
- [0050]** Fig. 9 ein Blockschaltbild einer Einheit für die Axialmagnetlager-Regelung und -Ansteuerung, wie sie in der digitalen Regelung und Leistungselektronik gemäß Fig. 2 eingesetzt werden kann;
- [0051]** Fig. 10 in einem Diagramm die in einem SRM erzeugten Kräfte bei verschiedenen Exzentrizitäten in Abhängigkeit vom Rotorwinkel Θ ;
- [0052]** Fig. 11 ein zu Fig. 10 vergleichbares Kräfte-Diagramm, im Gegensatz zur Fig. 10 jedoch bei einer konstanten Exzentrizität und bei verschiedenen Strömen;
- [0053]** Fig. 12 in einem Diagramm die erforderliche Stromkorrektur ΔI_0 für verschiedene Sollströme, um einen kräftefreien Betrieb zu erreichen;
- [0054]** Fig. 13 in einem Diagramm die Kraft/Strom-Abhängigkeit eines beispielhaften SRM;
- [0055]** Fig. 14 ein Schema eines FESS ähnlich wie Fig. 1, jedoch in Außenläuferausführung, mit einer konischen Magnetlagerung;

- [0056]** Fig. 15 ein Blockschaltbild einer Einheit für die Regelung und Ansteuerung eines konischen Magnetlagers, wie gemäß Fig. 14, wobei die Darstellung in Fig. 15 ähnlich jener in den Fig. 6 und 7 ist;
- [0057]** Fig. 16 ein Schema ähnlich jenem gemäß Fig. 1, nun jedoch für ein System mit zwei geschalteten Reluktanzmotoren;
- [0058]** Fig. 17 ein Diagramm zur Veranschaulichung des Wirkungsgrad η eines geschalteten Reluktanzmotors in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung P ;
- [0059]** Fig. 18 schematisch in einem Axialschnitt einer Anordnung mit einer Welle, die an ihrem oberen Ende und unteren Ende mit Hilfe von aktiven Luftlagern radial gelagert ist;
- [0060]** Fig. 19 eine schaubildliche Ansicht einer magnetisch gelagerten Linearantriebseinheit;
- [0061]** Fig. 20 ein axiales Schema dieses Linearantriebs gemäß Fig. 19, der auf dem Reluktanzprinzip basiert; und
- [0062]** Fig. 21 ein Schema einer Einheit für eine digitale Regelung und Leistungselektronik der in Fig. 19 und 20 veranschaulichten Linearantriebseinheit.

[0063] In Fig. 1 ist schematisch als Beispiel ein rotatorisches Lager- und Antriebs-System 1, konkret in Form eines FESS 1 mit aktiver Magnetlagerung und mit einer elektrischen Maschine 2 in Form eines SRM-Motors 2, dargestellt. Der Motor 2 samt Schwungrad 3 ist innerhalb eines Behälters 4 angebracht. Die das Schwungrad 3 tragende Welle 5, d.h. der Rotor 5, ist an beiden Enden in einem jeweiligen radialen aktiven Magnetlager 6, 7 gelagert; die zusammen eine berührungsfrei arbeitende, aktiv beeinflussbare Lagerung 6-7 für den Rotor 5 definieren. Weiters sind ein oberes Axiallager 8 und ein unteres Axiallager 9, ein Radialpositionssensor 10 und ein Axialpositionssensor 11 sowie eine obere und eine untere Stator-Trägerhülse 12 bzw. 13 veranschaulicht. Überdies sind übliche Fanglager 14 bzw. 15 gezeigt. Die Axialmagnetlagerung 8, 9 ist ebenfalls eine aktive, berührungsfreie Lagerung.

[0064] Eine diesem System 1 zugehörige Einheit 16 für eine hocheffiziente, zuverlässige Hybridmagnetlager-Regelung und Ansteuerung ist schematisch in einem Block 16 in Fig. 1 gezeigt, und sie verfügt über eine Einheit 17 für eine digitale Regelung und Leistungselektronik, die nachfolgend näher anhand der Fig. 2 erläutert werden wird. Weiters sind ein Modul für eine digitale Signalaufbereitung 18 sowie ein Modul für eine analoge Signalaufbereitung 19 samt nachgeschaltete Analog/Digital-Wandler 20 vorgesehen. Schematisch sind weiters eine Fehlererkennungseinheit 21 sowie ein Zwischenkreis 22 gezeigt, über den der mit einem Doppelpfeil angedeutete Energietransfer zum Motor 2 stattfindet.

[0065] Die Berechnung und Bereitstellung der benötigten Ströme, in Fig. 1 allgemein mit I bezeichnet, wird in der Einheit 17 für die digitale Regelung und Leistungselektronik durchgeführt. Dabei werden bei 23 Sensorsignale betreffend Positionen, Rotorwinkel, Rotordrehzahl und Temperatur der Einheit 16 vom Maschinenteil zugeführt.

[0066] Das Schwungrad 3 treibt den Rotor 5 und lädt somit das System 1. Zur radialen und axialen Stabilisierung sind in den oberen und unteren Trägerhülsen 12, 13 die radialen Elektromagnet-Lager 6, 7, sowie die beiden Axiallager 8, 9 montiert. Das Fanglager 14 ist ein mechanisches Lager, das bei einem Systemausfall in Funktion tritt. Das Schwungrad 3 läuft im Inneren des evakuierten Gehäuses 4 um; dieses Gehäuse 4 dient weiters als Träger für die verschiedenen Sensoren, wie beispielsweise die Radial- und Axial-Positionssensoren 10, 11; auf die Darstellung weiterer, an sich herkömmlicher Sensoren, wie etwa für die Rotordrehzahl, den Rotorwinkel und die Temperatur, wurde aus Gründen einer übersichtlichen Darstellung verzichtet.

[0067] Um eine möglichst lange Speicherzeit (Stand-by-Zeit) zu erzielen, wird der Rotor 5 durch die Magnetlager 6, 7 in seiner Trägheitshauptachse mittels einer sog. „Unbalance Control“ geführt. Dadurch werden minimale Radiallagerkräfte erforderlich, wodurch der Lager-Energiebedarf minimiert wird. Dies kann jedoch zu einer Exzentrizität des Läufers, d.h. Rotors 5, der elektrischen Maschine 2 führen, wodurch diese bei konventioneller Bestromung zusätzli-

che Kräfte generiert, die wiederum durch die Magnetlager 6, 7 kompensiert werden müssen, wodurch deren Energiebedarf wiederum steigen würde. Die Erfindung ermöglicht einen Betriebsmodus der elektrischen Maschine 2, um diese Kräfte zu minimieren, womit die Effizienz der Magnetlager 6, 7 steigt und eine längere Speicherdauer erzielt werden kann.

[0068] Der geschaltete Reluktanzmotor (SRM) 2 weist gemäß Fig. 3 einen Stator 25, an dem Spulen angebracht sind, und den Rotor 5 auf, der ausgeprägte Pole aufweist. Fig. 3 zeigt einen SRM 2 mit sechs Stator- und vier Rotorpolen. Aufgrund der Läuferform entsteht eine Winkelabhängigkeit des magnetischen Widerstandes (der Reluktanz), da sich der Luftspalt mit dem Drehwinkel des Läufers 5 ändert. Durch ein sequentielles Beschalten der Spulen 1a, 1b; 2a, 2b; 3a, 3b, kann somit ein Erregerfeld erzeugt werden, dem der Rotor 5 synchron folgt, da dieser eine Winkelstellung anstrebt, die eine minimale Reluktanz aufweist.

[0069] Der Vorteil dieses elektrischen Motors 2 ist, dass keine Permanentmagnete erforderlich sind, ein vernachlässigbares Schleppmoment verursacht wird und zur Ansteuerung die gleiche Konvertertopologie wie für die aktiven Magnetlager eingesetzt werden kann. Durch eine separate Regelung der einzelnen Spulen jeder Phase 1a, 1b oder 2a, 2b oder 3a, 3b werden aktiv beeinflusste radiale Kräfte generiert. Die Ansteuerung jeder Spule erfolgt über eigene 2-Quadranten-Konverter 26 (eine Stromrichtung, positive und negative Spannung), wie beispielhaft in Fig. 5 gezeigt:

[0070] Dieser 2-Quadranten-Konverter 26 weist eine linke und eine rechte Halbbrücke 27 bzw. 28 mit je einer Diode D und einem Transistor T auf. Der Konverter 26 versorgt eine Last 29, die eine Spule des elektrischen Motors 2 oder der Magnetlager 6, 7 ist. Die Transistoren T werden von einer (in Fig. 5 nicht näher veranschaulichten) Pulsweitenmodulation (PWM) angesteuert, deren Pulsweite vom jeweiligen Stromregler vorgegeben wird. Angelegt ist die Zwischenkreisspannung U_{ZK} .

[0071] Um eine optimale Betriebsführung zu erzielen, werden folgende Signale erfasst:

- [0072] ■** Ströme der einzelnen Magnetlagerspulen I_{AMBij} , sowie die Ströme der Spulen jeder Motorphase I_{SRMij} , mittels Stromsensoren, die beispielsweise nach dem Kompensationsprinzip auf Hall-Basis arbeiten, wobei allgemein i die Nummer bzw. Anzahl der Magnetlager AMB bzw. der Motoren SRM und j die Nummer bzw. Anzahl der jeweiligen Spulen angibt
- [0073] ■** Rotordrehzahl (durch Strichmarken am Rotor und optischer Erfassung oder mittels Zahnprofil und Wirbelstromsensor oder induktivem Sensor)
- [0074] ■** Rotorwinkelstellung Θ (entweder über Absolutwertgeber, beispielsweise basierend auf dem Hall-Prinzip, oder inkrementell aus dem Drehzahlsignal). Bei inkrementeller Erfassung errechnet sich die aktuelle Winkelstellung $\Theta = d_{Akt} / d_{End}$ mit dem aktuellen Zählerstand d_{Akt} eines laufend aufwärts zählenden Zählers, der jeweils bei Durchfahren einer Nullmarke in d_{End} gespeichert und daraufhin auf Null gesetzt wird. Nachdem in diesem Fall bei Rotorstillstand der Absolutwinkel nicht erfasst bzw. errechnet werden kann, ist eine spezielle Anlaufprozedur erforderlich, bis sich der Rotor 5 so schnell dreht, dass die PLL einrastet; beispielsweise wird dabei der Rotor 5 durch eine Bestromung einer Phase, z.B. 1a, 1b, in eine definierte Stellung gebracht und dann, zu Folge Kenntnis von Drehmoment und Trägheitsmoment, durch eine zeitlich vorgegebene Bestromung in Rotation versetzt.
- [0075] ■** Rotorposition (mittels Wirbelstromsensoren)
- [0076] ■** Zwischenkreisspannung mittels Isolationsverstärker zur galvanischen Trennung zwischen Leistungskreis und Regler-Kleinsignalelektronik.

[0077] Alle analogen Signale werden nach einer Anti-Aliasing-Filterung durch den Analog/Digital-Konverter 20 (Fig. 1) in die digitale Domäne gewandelt und einem digitalen Signalprozessor (DSP) oder Mikro-Controller (μC) zugeführt. Die digital vorliegenden Signale (z.B.

Drehzahl) werden diesem Signalprozessor bzw. μC direkt zugeführt.

[0078] Die aktive magnetische Radiallagerung 6, 7 weist (vgl. Fig. 8) eine spezielle Regelung auf, die zwei Betriebsmodi hat, zwischen denen je nach Rotorlage und -geschwindigkeit umgeschaltet wird. Das Stellglied, d.h. das jeweilige Lager, z.B. 6, ist als Y-Anordnung (jeweils drei Elektromagneten mit getrennten Flussschleifen in 120° Teilung, siehe Fig. 4) ausgeführt, was die minimale Elektromagnetanzahl für das Radiallager 6 bzw. 7 ergibt.

[0079] Im Einzelnen zeigt Fig. 4 beispielhaft einen Aufbau eines radialen aktiven Magnetlagers, z.B. des Magnetlagers 6 (oder 7) gemäß Fig. 1. Es besteht aus einem Rotor, nämlich dem Rotor 5, und einem Stator 31, der wiederum mit drei Elektromagneten aufgebaut ist. Auf jedem Elektromagneten ist eine Spule (Spule 6.1, Spule 6.2 und Spule 6.3) angebracht, die über beide Schenkel des Elektromagneten gewickelt ist. Diese Anordnung mit drei um 120° versetzten Elektromagneten wird wie erwähnt Y-Anordnung genannt.

LAGERBETRIEBSMODUS 1:

[0080] Die Regelung arbeitet nach der beispielsweise in Betschon F.: Design Principles of Integrated Magnetic Bearings, Diss. ETH Nr.13643, Dissertation, ETH-Zürich, 2000; oder Schweitzer G., Maslen E.H.: Magnetic Bearings Theory, Design, and Application to Rotating Machinery, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009; beschriebenen „Unbalance Control“, die den Rotor 5 in seiner Trägheitschauptachse rotieren lässt, wodurch die erforderlichen Lagerkräfte und damit auch der Energiebedarf der Lagerung minimiert werden. Hierbei wird ein, im digitalen Regler 55 (Fig. 8) implementiertes FIR (Finite Impulse Response)-Filter 32 mit adaptiven Koeffizienten (vgl. Fig. 8) benutzt, um den Anteil am Positionssensorsignal, der durch die Unwucht des Rotors 5 entsteht, zu filtern, wodurch der nachgeschaltete Positionsregler 33, hier als einfacher digital implementierter PID-Regler ausgeführt, nicht auf die Abweichung aufgrund der Unwucht reagiert, sondern nur auf den restlichen Signalanteil.

[0081] Die statische Nullposition wird durch den integralen Anteil eines übergeordneten Reglers 71, der die mittleren Spulenströme der Lager minimiert, festgelegt. Damit führen auch fertigungs- oder zusammenbaubedingte Abweichungen zwischen der Lagermittellage und der geometrischen Nullposition zu keinem zusätzlichen Kräftebedarf und damit Leistungsbedarf für die Lagerung.

LAGERBETRIEBSMODUS 2:

[0082] Zur Positionsregelung mit dem PID-Regler 33 wird in diesem Betriebsmodus nicht das gefilterte und damit um den Unwuchtanteil reduzierte Positionssensorsignal herangezogen, sondern das tatsächliche Signal (Ist-Position), wodurch der Rotor 5, so gut wie mit den verfügbaren Lagerkräften und der Regelung möglich, in die Sollposition (hier: Mittellage) gebracht wird.

[0083] In beiden Lagerbetriebsmodi errechnet der Positionsregler 33 eine Sollkraft in x- und y-Richtung. Der Sollstrom jedes der drei Elektromagneten des jeweiligen Radiallager-Stellgliedes (6 bzw. 7) wird mittels Interpolation aus einem Kennfeld (s. Block 34 in Fig. 8, „Kennfeld“

$$I_{AMBij,soll}(F_{x,AMBij}, F_{y,AMBij}, S_{x,AMBij}, S_{y,AMBij}))$$

bestimmt. Hierin ist der Sollstrom jedes Elektromagneten in Abhängigkeit von der Rotorauslenkung und der erforderlichen Kraft gespeichert. Diese Sollströme werden mittels unterlagerten Stromreglern 56, die der Einfachheit halber als Proportionalregler ausgeführt sein können, Signal-Begrenzern 57, Pulsweitenmodulatoren 58 und 2-Quadranten-Konvertern 26 (s. Fig. 5) in die einzelnen Spulen des Stellgliedes 6 bzw. 7 eingeprägt. Die Spulenströme werden mittels Stromsensoren gemessen und den Reglern digitalisiert zugeführt.

[0084] Auch die elektrische Maschine 2 weist zwei Betriebsmodi („kräftefrei“/„lagernd“) auf: Fig. 6 zeigt das Regelkonzept einer Phase des SRM 2. Dabei sind in Fig. 6 im Detail die SRM-Phasenregelung und Ansteuerung 35 gezeigt. Die Reglervorgaben werden durch einen übergeordneten Regler 50, der in Fig. 7 dargestellt ist, berechnet. F_{SRMij} bezeichnet in Fig. 6 (und 7)

die erforderliche Kraft der Phase j der elektrischen Maschine 2 bzw. i (mit $i=1, 2, \dots$), die für den kräftefreien Betrieb Null ist. In Abhängigkeit von der translatorischen Position s_{xSRMij} bzw. s_{ySRMij} und dem Drehwinkel Θ wird in einer Einheit 36 die Stromkorrektur ΔI_{ij} berechnet, die zum Sollstrom $I_{SRMij,soll}$ addiert oder subtrahiert wird. Der Sollstrom und auch der Ein- und Ausschaltwinkel θ_{on} bzw. θ_{off} werden durch die Sollleistung P_{SRMij} bestimmt, die ebenfalls durch den übergeordneten Regler 50 (s. Fig. 7) vorgegeben wird.

[0085] Im Block 37 (Betriebsparameter) wird die Sollleistung durch ein Winkelgeschwindigkeits (ω)-abhängiges Kennfeld in Sollstrom sowie Ein- und Ausschaltwinkel umgerechnet. Eine Schaltlogik 38 gibt dann vor, ob die jeweilige Phase bestromt werden soll, falls der aktuelle Winkel innerhalb von Ein- und Ausschaltwinkel liegt.

[0086] Für die Stromregelung, s. Stromregler 39, 40 in Fig. 6, wird der Stromregelfehler e_{SRMija} der Spule ja bzw. e_{SRMijb} der Spule jb (mit $j = 1, 2, 3, \dots$) gebildet und dem Stromregler 39 bzw. 40 zugeführt. Der Stromregelfehler wird aus der Differenz vom Sensorsignal I_{SRMija} bzw. I_{SRMijb} des aktuell fließenden Stroms I_{SRMija} bzw. I_{SRMijb} und dem entsprechenden Sollstrom berechnet. Der Ausgang des Stromreglers 39 bzw. 40 wird auf den zulässigen PWM-Bereich (s. Begrenzer 41, 42) begrenzt und dem zugehörigen Pulsweitenmodulator (PWM) 43 bzw. 44 zugeführt, welcher die Leistungskonverter 26 (s. Fig. 5) ansteuert.

[0087] Die Leistungsverstärker 26 werden somit über Pulsweitenmodulation 43, 44 angesteuert, deren Einschaltdauer durch den Stromregler 39 bzw. 40 bestimmt wird. Der Stromregler 39, 40 ist üblicherweise als P- oder PI-Regler ausgeführt, wobei die Regelparameter, wenn genügend Rechenleistung des Motorreglers 50 zur Verfügung steht, adaptiv in Abhängigkeit von der Winkelstellung angepasst werden, um die starke Nichtlinearität der Induktivität zu berücksichtigen. Der „Schaltlogik“-Block 38 in Fig. 6 gibt vor, bei welchen Winkelstellungen die jeweilige Phase, mit den für die beiden Spulen getrennt voneinander vorgegebenen Ströme, erregt werden soll.

[0088] Die Stromvorgabe des Stromreglers setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Im „Betriebsparameter“-Block 37 sind „offline“ ermittelte Kennfelder abgelegt, die den nötigen Strom sowie Ein- und Ausschaltwinkel in Abhängigkeit von der Sollleistung und der aktuellen Drehzahl beinhalten. Dieser Strom wird zu einem im „Stromkorrektur“-Block 36 berechneten Korrekturstrom addiert bzw. subtrahiert. Die Funktion dieses Blocks 36 sowie die enthaltenen Berechnungen werden im Folgenden noch näher beschrieben.

[0089] Im Übrigen ist in Fig. 2 (und auch Fig. 14) schematisch die Soll-Zwischenspannungsvorgabe 26' veranschaulicht.

[0090] In Fig. 7 ist die elektrische Maschinen-Regelung und -Ansteuerung 50 dargestellt. Zugeführt werden die aktuelle translatorische Position der elektrischen Maschine 2 bzw. i in x- und y-Richtung, s_{xSRMi} bzw. s_{ySRMi} , und die entsprechenden Sollpositionen $s_{xSRMi,soll}$ bzw. $s_{ySRMi,soll}$ sowie die aktuelle Zwischenkreisspannung U_{ZK} und deren Sollwert $U_{ZK,soll}$. Ein Positionsregler 51 gibt eine Kraft vor, um den Rotor 5 in die Sollposition zu bringen, und durch eine Kraftaufteilung wird die Sollkraft F_{SRMij} für die jeweilige Phase gebildet. Durch eine Betriebsmodus-Schalteinheit 52 kann durch einen übergeordneten Regler, dargestellt in Fig. 1, zwischen lagerndem und kräftefreiem Betrieb umgeschaltet werden. Im kräftefreien Betrieb ist die Sollkraft gleich Null. Eine Koordinatentransformations-Einheit 53 rechnet den Kraftvektor in das lokale Koordinatensystem der jeweiligen Phase um.

[0091] Ein Leistungsregler 54 bildet aus dem Spannungsregelfehler e_U eine Sollleistung für die jeweilige Phase P_{SRMij} , die nötig ist, um mit entsprechender Dynamik die geforderte Zwischenkreisspannung auf ihrem Sollwert zu halten.

[0092] Die Sollleistungen und Sollkräfte werden der SRM-Phasenregelung und -Ansteuerung 35, s. Fig. 6, zugeführt.

[0093] Fig. 8 zeigt die Radialmagnetlager-Regelung und -Ansteuerung 55. Eingangsgrößen sind die aktuelle Rotorposition an der Lagerstelle i in x- und y-Richtung, $s_{x,AMBi}$ bzw. $s_{y,AMBi}$, und deren Sollgrößen $s_{x,AMBi,soll}$ bzw. $s_{y,AMBi,soll}$ sowie der durch den in Fig. 2 dargestellten Regler vorgegebene Betriebsmodus. Je nach Betriebsmodus wird dem Positionsregler 33, der die

Sollkraft der Magnetlager, $F_{x,AMBi}$ bzw. $F_{y,AMBi}$, vorgibt, die tatsächliche Rotorposition oder das mittels des adaptivem FIR-Filters 32 um die Unwucht verringerte Positionssignal zugeführt. Über die Kennfeld-Einheit 34 wird der notwendige Sollstrom $I_{AMBij,soll}$ des Elektromagneten j des Magnetlagers i berechnet. Ein Stromregler 56 regelt dann das jeweilige Sensorsignal I_{AMBij} des aktuellen Stroms I_{AMBij} auf den Sollstrom und minimiert damit den Stromregelfehler $e_{I,AMBij}$. Der Ausgang des jeweiligen Stromreglers 56 wird auf den zulässigen PWM-Bereich begrenzt (Begrenzer 57) und einem Pulsweitenmodulator (PWM) 58 zugeführt, welcher die Leistungskonverter 26 (s. Fig. 5) ansteuert.

[0094] In Fig. 9 ist weiters die Regelung/Ansteuerung 60 des Axialmagnetlagers 8, 9 (Fig. 1) dargestellt. Der aus der aktuellen axialen Position s_z und deren Sollwert gebildete Positionsregelfehler $e_{AxB,Pos}$ wird durch einen Positionsregler 61 minimiert. Der Ausgang dieses Reglers 61 ist die Sollkraft in axialer Richtung, $F_{z,soll}$, die durch eine Kennfeld-Einheit 62 in einen entsprechenden Sollstrom $I_{AxB1,soll}$ bzw. $I_{AxB2,soll}$ umgewandelt und Stromreglern 63 zugeführt wird. Der Regelfehler $e_{I,AxBj}$ des jeweiligen Stromreglers 63 wird aus dem Sollstrom und dem gemessenen Wert I_{AxBj} des fließenden Stroms I_{AxBj} gebildet. Der Index j bezeichnet dabei die jeweilige Spule (vgl. auch Fig. 2). Die Ausgänge der Stromregler 63 werden begrenzt (Begrenzer 64) und der PWM 65 zugeführt, welche die Leistungselektronik ansteuert.

[0095] In Fig. 2 ist die digitale Regelung und Leistungselektronik 17 des in Fig. 1 gezeigten Flywheel Energy Storage Systems 1 (FESS) näher veranschaulicht. Es handelt sich um einen übergeordneten Regler, der die Sollpositionen der Axiallager AxB (bzw. 8, 9 in Fig. 1), der radialen Magnetlager AMB1 und AMB2 (bzw. 6, 7 in Fig. 1) sowie für die elektrische Maschine SRM1 (bzw. 2 in Fig. 1) vorgibt. Diese Sollpositionen sowie der vom aktuellen Systemverhalten abhängige Betriebsmodus werden an die untergeordneten Reglerstrukturen 60: „Axialmagnetlager Regelung und Ansteuerung“ (s. Fig. 9); 55: „Radialmagnetlager Regelung und Ansteuerung“ (s. Fig. 8); und 50: „Elektrische Maschine Regelung und Ansteuerung“ (s. Fig. 7) übergeben.

[0096] Für den im Weiteren beschriebenen Motor 2 wurden beispielhaft die Daten laut der nachfolgenden Tabelle 1 verwendet.

TABELLE 1: MOTORDATEN

Anzahl Statorpole	6
Anzahl Rotorpole	4
Rotorpolwinkel in °	32
Statorpolwinkel in °	31
Wellenradius in mm	38
Rotorpolhöhe in mm	9,2
Rotorpolradius in mm	70
Rotorrückschlussdicke in mm	22,7
Statorpolhöhe in mm	34, 9
Statorpolradius in mm	71
Statorrückschlussdicke in mm	30, 6
Statoraußenradius in mm	136, 2
Länge in mm	52, 2
Luftspalt in mm	1
Windungszahl pro Spule	80

[0097] Fig. 10 zeigt die radial wirkenden Kräfte $F(N)$ eines solchen SRM 2 bei gleicher Bestromung der beiden Spulen einer Phase mit 20 A und bei verschiedenen Exzentrizitäten $s_{y,SRMij}$ von 0,1 mm bis 0,5 mm, jeweils über dem Drehwinkel Θ .

[0098] Fig. 11 zeigt die Radialkräfte $F(N)$ bei konstanter Exzentrizität von $s_{y,SRMij} = 0,5$ mm und einem Strom in Spule b von 20A, jedoch unterschiedlichen Strömen in Spule a, von 0A bis 20A, ebenfalls abhängig von Θ . Erkennbar ist, dass sich die radialen Kräfte deutlich reduzieren lassen und bei entsprechender Stromführung ein kräftefreier Betrieb in allen Winkelstellungen möglich ist.

[0099] Die dazu erforderliche Stromkorrektur $\Delta I_0(A)$ als Funktion des Winkels für verschiedene Sollstromvorgaben ist in Fig. 12 zu sehen. Man erkennt die lineare Abhängigkeit der Stromkorrektur von der Sollstromvorgabe (0A bis 20A). Des Weiteren ist diese auch linear von der Exzentrizität $s_{y,SRMij}$ abhängig.

[00100] Die aktuelle Exzentrizität wird aus den Positionssensorsignalen mittels Umrechnung, welche die geometrischen Verhältnisse der Platzierung der Positionssensoren, z.B. 10, 11, und den Mittelpunkt der jeweiligen elektrischen Maschine berücksichtigt, erfasst.

[00101] Die nötige Korrektur des Sollstroms wird im Stromkorrektur-Block 36 (s. Fig. 6) berechnet und entsprechend dem Sollwert addiert bzw. subtrahiert.

[00102] Das Regelkonzept für den „lagernden“ Betrieb ist gleich dem obigen Fall („kräftefrei“), allerdings muss die Differenz der beiden Spulenströme noch weiter vergrößert werden, um aktiv Kräfte zu generieren. Die geforderte Kraft wird in einem Positionsregler 51, der als PID-Regler ausgeführt sein kann, ermittelt, und auf die einzelnen Phasen aufgeteilt (s. Fig. 7).

[00103] Eine günstige Anordnung für die elektrische Maschine ist im Schwerpunkt des Rotors 5, da dadurch im „lagernden“ Betrieb die dedizierten Lager wesentlich entlastet werden können. Eine Anordnung der elektrischen Maschine außerhalb des Schwerpunkts (s. Fig. 1) reduziert die Lagerwirkung und es wird ein zusätzliches Drehmoment durch die Radialkräfte der elektrischen Maschine eingebracht, das von der dedizierten Lagerung zu kompensieren ist.

[00104] Aus dem quadratischen Zusammenhang zwischen Strom und Magnetkraft ergibt sich für die kräfteerzeugende Stromkorrektur

$$\Delta I_F = \frac{F}{K(\theta) \cdot I_{SRMij,soll}}$$

mit der in Fig. 13 dargestellten Steifigkeit $K(\theta)(N/A^2)$. Die Sollgröße der beiden Stromregler ist dann

$$I_{SRMija,soll} = I_{SRMij,soll} - (\Delta I_0 + \Delta I_F)$$

$$I_{SRMijb,soll} = I_{SRMij,soll} + (\Delta I_0 + \Delta I_F).$$

[00105] Durch die automatische Detektions- und Schalteinheit 52` (s. Fig. 2) erfolgt nun im Block 52`` („Umschaltung Betriebsmodus“) eine betriebszustandsabhängige Umschaltung zwischen den Betriebsmodi sowohl der Lagerung 6, 7 als auch der elektrischen Maschine 2.

[00106] Die Umschaltung erfolgt bei Über- bzw. Unterschreitung von Grenzwerten eines oder mehrerer Betriebsparameter. Beispielsweise kann die Beschleunigung des FESS-Gehäuses 4 oder die Auslenkung des Rotors 5 aus der Sollposition in folgender Weise herangezogen werden:

[00107] Solange die Beschleunigung des FESS-Gehäuses 4, $\Delta a_{\text{Gehäuse}}$, unterhalb eines Grenzwerts liegt, d.h.

$$\Delta a_{\text{Gehäuse}} < \text{Limit}_{\Delta a} ,$$

erfolgt die Kraftgenerierung nur mittels der berührungsfreien Lagerung im „Unbalance Control“-Betrieb, d.h. mittels der Lagerung des Rotors 5 in dessen Trägheitshauptachse. Die elektrische Maschine 2 wird kräftefrei betrieben, um die Magnetlager 6, 7 geringstmöglich zu beeinflussen.

[00108] Solange die Auslenkung Δr des Rotors 5 an den Rotorenden unterhalb eines Grenzwertes liegt, d.h.

$$\Delta r < \text{Limit}_{\Delta r}$$

und die Auslenkungsgeschwindigkeit $\frac{d\Delta r}{dt}$ an den Rotorenden unterhalb eines Grenzwertes liegt, d.h.

$$\frac{d\Delta r}{dt} < \text{Limit}_{d\Delta r/dt}$$

und solange die gewichtete Beziehung für die Auslenkung (Gewichtungsfaktor a) und für die Auslenkungsgeschwindigkeit (Gewichtungsfaktor b) an den Rotorenden unterhalb eines Grenzwertes liegt, also

$$a \cdot \Delta r + b \cdot \frac{d\Delta r}{dt} < \text{Limit}_{ab} ,$$

(wobei a, b im Vorhinein durch Tests bestimmt werden können) erfolgt die Kraftgenerierung ebenfalls nur mittels der berührungsfreien Lagerung im „Unbalance Control“-Betrieb, d.h. der Lagerung des Rotors 5 in dessen Trägheitshauptachse. Die elektrische Maschine 2 wird wiederum kräftefrei betrieben, um die Magnetlager 6, 7 geringstmöglich zu beeinflussen.

[00109] Ist die jeweilige Bedingung verletzt, erfolgt eine Umschaltung in den anderen Betriebsmodus - „lagerkraftgenerierend“.

[00110] Die erforderliche elektrische Gesamtleistung des Systems 1 wird basierend auf der Abweichung der tatsächlichen Zwischenkreisspannung und deren Sollwert errechnet. Ein Spannungsanstieg der Zwischenkreisspannung ergibt sich, wenn von extern kommende, im FESS 1 zu speichernde Energie in den Zwischenkreis eingebracht wird. Ein Spannungsabfall ergibt sich, wenn Energie aus dem Zwischenkreis entnommen wird und somit das FESS 1 entladen wird. Die Zwischenkreisspannung wird hierzu mittels Isolationsverstärker galvanisch getrennt, gefiltert und digitalisiert dem Leistungsregler zugeführt. Dieser kann beispielsweise als PID-Regler ausgeführt sein und im Mikrocontroller 30 der Regelung 17 der elektrischen Maschine 2 integriert sein.

[00111] Die axiale magnetische Lagerung ist laut Stand der Technik, wie in Fig. 9 dargestellt, ausgeführt. Die Funktionsweise ist analog der radialen magnetischen Lagerung, abgesehen davon, dass keine Unwuchtregelung ausgeführt ist.

[00112] Der Vollständigkeit halber wird nochmals auf die Darstellung der digitalen Regelung und Leistungselektronik 17 gemäß Fig. 2 verwiesen, wo eingangsseitig Einheiten 70 (für die Axial-Sollpositionsberechnung) und 71 (für die Radial-Sollpositionsberechnung) veranschaulicht sind. Weiters sind in Zuordnung zu den Radiallagern 6, 7 - AMB1, AMB2 (AMB - Active Magnet Bearing - aktives Magnetlager) -, zu den Axiallagern 8, 9 (bzw. AxB) und zur Maschine 2 bzw. SRM 1 die in den Fig. 8, Fig. 9 und Fig. 6 gezeigten Blöcke 55, 60 bzw. 35 gezeigt.

[00113] Die Fig. 14 und 15 veranschaulichen die Regelung und Ansteuerung eines Magnetlagers ähnlich Fig. 8 und 9, allerdings für ein konisches Magnetlager, das Kräfte in allen drei Koordinatenrichtungen erzeugen kann. Die gezeigte Regelung ist für drei Elektromagnete vor-

gesehen, die um 120° versetzt am Stator angeordnet sind (s. Fig. 14).

[00114] Konkret zeigt Fig. 14 ein FESS 1 ähnlich wie Fig. 1, jedoch in Außenläuferausführung und mit der angeführten konischen Magnetlagerung. Im Vergleich zu Fig. 1 ist hier die elektrische Maschine eine im Schwerpunkt liegende Permanentmagnet-erregte Synchronmaschine (PMSM), die ebenfalls lagernd und kräftefrei betrieben werden kann.

[00115] Die Außenläuferform bietet sich hier an, weil die Permanentmagnete durch das Composite-Material des Rotors 5' gestützt werden.

[00116] Auch bei PMSM-Maschinen treten bei exzentrischem Lauf radiale Kräfte auf, die je nach Läuferförmigkeit auch eine Winkelabhängigkeit aufweisen können (vgl. Charpentier J.F., Lemarquand G.: A comparative analysis of permanent magnet-type bearingless synchronous motors for fully magnetically levitated rotors, Journal of Applied Physics, vol. 83, no. 11, 1998). Durch eine entsprechende Ausführung der Magnetpole und des Windungssystems sowie eine separate Regelung der Spulen je Phase oder durch eigene Lagerwindungen (s. beispielsweise Yanbo Lv, Wenquan Zuo, Xiaoyan Diao and Huangqiu Zhu, Modeling and digital control System for bearingless permanent magnet synchronous motor based on magnetic energy equation, 1 Aug 2011) können PMSM, ebenso wie die SRM gemäß Fig. 1 bis 13, „kräftefrei“ oder „lagernd“ betrieben werden. Der Unterschied in der Ansteuerung von PMSM im Vergleich zum, im vorhergehenden Ausführungsbeispiel eingesetzten SRM liegt darin, dass beim PMSM Standard-Motoransteuer-Konverter eingesetzt werden können, die Stand der Technik sind.

[00117] Weiters sind in diesem Ausführungsbeispiel konische Magnetlager 6', 7' zur Lagerung des Rotors 5' vorhanden, wie beispielsweise auch in Mohamed et al., Conical Magnetic Bearings with Radial and Thrust Control, IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, 37 (12) (1992): 1859-1868, beschrieben. Diese bieten den Vorteil, dass mit bereits sechs Elektromagneten (drei je Rotorende) eine vollständige magnetische Lagerung des Rotors 5' möglich ist, wodurch ein kompakter Aufbau resultiert. Weiters ergibt sich ein reduzierter Aufwand in der Ansteuerelektronik. Durch diese Ausführung kann der komplette weichmagnetische Zweig gebleicht realisiert werden, wodurch sich geringere Ummagnetisierungsverluste ergeben als bei aus weichmagnetischem Vollmaterial hergestellten Magnetlagern.

[00118] Die Rotorposition wird in diesem Ausführungsbeispiel mittels vier, jeweils ebenfalls geneigt angeordneter Wirbelstromsensoren erfasst. An jedem Rotorende sind zwei dieser Sensoren 10' 11' platziert, wobei die Ebenen, die durch die jeweilige Sensorachse sowie die Mittelachse des Schwungrads 3' aufgespannt werden, jeweils aufeinander normal stehen.

[00119] Die „konische Lager-Regelung und -Ansteuerung“ 80 (s. außer Fig. 14 auch Fig. 15) ist analog zur Radialmagnetlager-Regelung und -Ansteuerung 55 in Fig. 8 ausgeführt. Der Unterschied liegt lediglich darin, dass dem Kennfeld, aus dem die Sollströme der Elektromagneten errechnet werden (Block 34' „Kennfeld“ $I_{AMBij,soll}$ ($F_{x,AMBij}$, $F_{y,AMBij}$, $F_{z,AMBij}$, $S_{x,AMBij}$, $S_{y,AMBij}$, $S_{z,AMBij}$)) sowohl die Sollkräfte in x- und y-Richtung aus dem Radial-Positionsregler 33' als auch die in z-Richtung aus dem Axial-Positionsregler 61' zugeführt werden. Hierzu erfolgt im Block 53' „Koordinatentransformation“ eine Umrechnung der Abstandssensorsignale in Radial- und Axialrichtung. Die Berechnung des Kennfelds (Block 34') erfolgt in an sich bekannter Weise über die geometrischen Beziehungen und die Nichtlinearität des magnetischen Kreises.

[00120] Die dem Kennfeld-Block 34' nachgeschalteten drei Stromregelungs-Blöcke entsprechen jenen gemäß Fig. 8, so dass sich eine neuerliche Beschreibung erübrigen kann.

[00121] In Fig. 16 ist ein FESS-System 1 mit aktiver Magnetlagerung ähnlich wie in Fig. 1 dargestellt, mit dem Unterschied, dass jetzt mehrere - z.B. zwei - elektrische Maschinen 2.1, 2.2 in Form von SRMs vorgesehen sind. Dementsprechend sind auch zwei Regelungs- und Ansteuerungs-Blöcke 35, je einer für eine der beiden elektrischen Maschinen 2.1, 2.2, vorgesehen. Im Übrigen entspricht die Ausführung jener gemäß Fig. 1 und 2, so dass auf die dortige Beschreibung verwiesen werden kann.

[00122] Von Bedeutung ist bei diesem dritten Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 16, dass dann, wenn zwei elektrische Maschinen 2.1, 2.2 eingesetzt werden, diese auch als unterstützende

Lagerung bei großen externen Störungen eingesetzt werden können, wobei aufgrund der in Fig. 16 gewählten Platzierung an den Wellenenden auch eine alleinige Lagerung mit den im Betriebsmodus „lagernd“ betriebenen elektrischen Maschinen 2.1, 2.2 möglich ist (redundante Lagerung, z.B. falls die dedizierte magnetische Lagerung, gemäß Fig. 1 bis 9, wird die erforderliche elektrische Gesamtleistung des Systems 1 basierend auf der Abweichung der tatsächlichen Zwischenkreisspannung und auf deren Sollwert errechnet. Der zugehörige Regler kann beispielsweise wiederum als PI-Regler ausgeführt sein und im Mikrocontroller (s. μC in Fig. 1) der Regelung der elektrischen Maschinen (Blöcke 35) integriert sein. Zusätzlich erfolgt die oben beschriebene Leistungsaufteilung zwischen den elektrischen Maschinen 2.1, 2.2 mittels Pulsweitenmodulation der Antriebsleistung.

[00123] Selbstverständlich können auch mehr als zwei elektrische Maschinen koaxial zueinander angeordnet sein. Ein Vorteil bei dem Vorsehen von zwei oder mehr elektrischen Maschinen ist der, dass - wie oben erwähnt - eine unabhängige Leistungsregelung vorgesehen werden kann, wobei dann auch eine Einrichtung zur Aufteilung der Leistung auf die Maschinen vorgesehen wird, die beispielsweise gemäß Fig. 16 durch die Einheiten 17 und 35 realisiert sein kann. Mit Hilfe dieser Leistungsaufteilung können die Maschinen, z.B. 2.1, 2.2, derart angesteuert werden, dass ein maximaler Gesamtwirkungsgrad der Maschinenkombination erhalten wird. Andererseits kann auch die Ansteuerung der Maschinen so erfolgen, dass ein maximaler Gesamtwirkungsgrad für die Maschinen samt Ansteuerung erzielt wird. Weiters ist es denkbar, die Leistungskonverter (26 in Fig. 5) hinsichtlich ihrer Betriebstemperatur zu überwachen, wobei die Einrichtung zur Leistungsaufteilung dann die Maschinen derart ansteuert, dass eine möglichst geringe Betriebstemperatur der Leistungskonverter 26, die die Maschinen ansteuern, sichergestellt wird. Schließlich ist es auch noch denkbar, die Innentemperatur des Maschinengehäuses 4 zu überwachen und die Leistungsaufteilung für die Maschinen, z.B. 2.1, 2.2, derart vorzusehen, dass durch die Ansteuerung der Maschinen die Verluste innerhalb des Gehäuses minimiert werden.

[00124] Wie im ersten Ausführungsbeispiel wird im Übrigen gemäß Fig. 16 der Rotor 5 im ersten Betriebsmodus in seiner Trägheitshauptachse mittels der magnetischen Lagerung gelagert. Die elektrischen Maschinen 2.1, 2.2 werden in diesem Betriebsmodus „kräftefrei“ betrieben. Die Auslenkungen des Rotors 5 werden über die geometrische Beziehung von Positionssensor 10 zu elektrischer Maschine 2.1 bzw. 2.2 bzw. Lager 6, 7 ermittelt. Auch hier erfolgt eine Umschaltung in den zweiten Betriebsmodus (Lagerkraftgenerierung der elektrischen Maschinen) entsprechend den zum ersten Ausführungsbeispiel beschriebenen Umschaltbedingungen.

[00125] In Fig. 17 ist zur Ergänzung allgemein der Wirkungsgrad η eines SRM-Motors 2 in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung P dargestellt, wobei auch das Wirkungsgrad-Maximum η_{\max} gezeigt ist. Der Zusammenhang zwischen η und P ist im übrigen bei PMSM-Maschinen ähnlich.

[00126] In Fig. 18 ist eine Rotorwelle 5 gezeigt, die am oberen und unteren Ende jeweils mit Hilfe eines aktiven Luftlagers 6' bzw. 7' gelagert ist. Weiters sind wiederum zwei elektrische Maschinen 2.1, 2.2 für den Antrieb der Rotorwelle 5 vorgesehen. Diese elektrischen Maschinen 2.1, 2.2 können wiederum SRM- oder PMSM-Maschinen sein, oder jede andere Motortechnologie aufweisen, die es ermöglicht, aktiv radiale Kräfte zu erzeugen.

[00127] Die Darstellung einer axialen Lagerung wurde in Fig. 18 der Einfachheit halber weggelassen, sie kann beispielsweise so wie in Fig. 1 bzw. wie bei Fig. 16 gezeigt ausgeführt sein.

[00128] Wenn im vierten Ausführungsbeispiel, gemäß Fig. 18, ein rotatorisches Lager- und Antriebs-System mit Luftlagerung und zwei elektrischen Maschinen gezeigt ist, so könnte selbstverständlich auch nur eine elektrische Maschine 2 vorgesehen sein. Die Lagerung des Rotors 5 erfolgt wiederum im normalen oder ersten Betriebsmodus einfach mittels der Luftlagerung, wobei die Maschine oder Maschinen 2.1, 2.2 „kräftefrei“ betrieben werden.

[00129] Sobald, wie im ersten Ausführungsbeispiel, die Umschaltbedingung erfüllt ist, wird der SRM 2 bzw. werden die SRMs 2.1, 2.2 wiederum, wie beschrieben, vom „kräftefreien“ Betriebsmodus in den „lagernden“ Betriebsmodus umgeschaltet, wodurch größere Störkräfte oder

der Ausfall der Luftlager nicht zu einem Anschlagen des Rotors 5 am Stator führen können.

[00130] In den Figuren 19 bis 21 ist als weiteres Ausführungsbeispiel ein translatorisches Lager- und Antriebs-System mit aktiver Magnetlagerung und einer elektrischen Maschine (SRM) gezeigt.

[00131] Im Einzelnen ist Fig. 19 eine schaubildliche Ansicht einer magnetisch gelagerten Linearantriebseinheit 90; die zugehörige digitale Regelung und Leistungselektronik 91 ist in Fig. 21 veranschaulicht; Fig. 20 zeigt im Einzelnen schematisch eine Linearmaschine 92, die auf dem Reluktanzprinzip basiert, als Antrieb, mit einem Läufer bzw. Anker 95. Auf die Darstellung von Abstandssensoren etc. wurde aus Gründen der Übersicht verzichtet.

[00132] Die magnetische Lagerung erfolgt mittels Elektromagneten nach Stand der Technik. Dabei sind jeweils vier Lagermagnete gemäß einer Achse zusammengefasst. Wie dabei aus Fig. 19 ersichtlich ist, gibt es obere Lagermagnete (Elektromagnete) 93, die für eine vertikale Stabilisierung sorgen. Weiters sind Lagermagnete (Elektromagnete) „rechts“ 94 und Lagermagnete (Elektromagnete) „links“ 96 für die horizontale Stabilisierung vorgesehen. Der Antrieb (92 in Fig. 20) weist einen linken Stator 98 und einen rechten Stator 97 auf, vgl. außer Fig. 19 auch Fig. 20.

[00133] Was die vorerwähnten Lagerungs-Achsen betrifft, so arbeitet die vertikale Lagerungs-Achse Ax1 mit den Magneten Ax1A, Ax1B unabhängig. Die Achse Ax2, mit den Magneten Ax2A, Ax2B, Ax2C und Ax2D führt die obere Lagerung des plattenförmigen Läufers 95 aus; die Achse Ax3, mit den Magneten Ax3A, Ax3B, Ax3C und Ax3D (Ax3B ist in Fig. 19 verdeckt) realisiert die untere Lagerung des Platten-Läufers 95.

[00134] Gemäß Fig. 20 sind am Läufer 95 Erregerspulen 1a, 1b; 2a, 2b; und 3a, 3b zur Bildung der Elektromagneten 99 angebracht. Durch die aus Fig. 20 in besonderen ersichtliche Statorform (Statorteile 97, 98), entsteht wie erwähnt eine positionsabhängige Reluktanz, die für den Vorschub des Läufers 95 genützt wird.

[00135] In Fig. 21 ist die digitale Regelung und Leistungselektronik 91 in einem abstrahierten Blockschaltbild veranschaulicht. Ähnlich wie bei den vorhergehenden Ausführungsbeispielen, die rotatorische Systeme betreffen, sind auch gemäß Fig. 21 für die Regelung der Lagerachsen sowie der elektrischen Maschine die Unterblöcke ausgeführt, mit dem Unterschied, dass (natürlich) keine Unbalance-Control zur Anwendung kommt und statt des Drehwinkels der elektrischen Maschine 2 die Verschiebung des Läufers 95 Verwendung findet.

[00136] Durch bewegungsrichtungsabhängige Bestromung der Spulenpaare Spule 1a bis Spule 3a (linke Spulen) sowie Spule 1b bis Spule 3b (rechte Spulen) der Antriebseinheit wird die Antriebskraft generiert. Wie beim rotatorischen System 1 entstehen auch beim translatorischen System 90 abhängig vom Abstand zwischen feststehendem Stator 97, 98 und beweglichem Läufer 95 Kräfte normal auf die Platte. Durch unterschiedliche Bestromung der linken und rechten Läuferspulenpaare 1a bis 3a bzw. 1b bis 3b können auch hier Asymmetrien ausgeglichen werden, d.h. ein „lagerkräftefreier“ Lauf kann erzielt werden, und durch die Umschaltung des Betriebsmodus in den „Lagerbetrieb“ können auch starke externe Störkräfte, die mit der magnetischen Lagerung allein nicht zu handhaben sind, abgestützt werden.

[00137] Im Einzelnen sind in der Einheit für die digitale Regelung und Leistungselektronik, s. Block 91 in Fig. 21, analog zu den vorhergehenden Ausführungsbeispielen eine Sollpositionsberechnungseinheit 70' für die Lagerachse 1 und eine Sollpositionsberechnungseinheit 71' für die Lagerachsen 2, 3 vorgesehen. Eine Detektions- und Schalteinheit 52' 52'' dient wiederum zur Erkennung der Über- bzw. Unterschreitung eines vorgegebenen Grenzwerts für zumindest einen Betriebsparameter, und zur Umschaltung von einem Betriebsmodus in den anderen.

[00138] Schließlich sind in Fig. 21 analog zu Fig. 2 eine elektrische Maschinen-Regelungs-Ansteuerung 35' sowie weiters drei Regelungs-Ansteuerungs-Blöcke 55.1 (für die Magnetlagerachse Ax1), 55.2 (für die Magnetlagerachse Ax2) und 55.3 (für die Magnetlagerachse Ax3) gezeigt. Schließlich sind die angesteuerten Blöcke SRM1 (vgl. auch Fig. 20) sowie die Lagermagnete für die Achsen Ax1, Ax2 und Ax3 veranschaulicht.

Patentansprüche

1. Lager- und Antriebs-System (1) mit mindestens einer elektrischen Maschine (2) samt Ansteuerung (50), wobei die Lagerkraft des jeweiligen Lagerfreiheitsgrades der Maschine (2) aktiv beeinflussbar ist, und mit einer berührungsfrei arbeitenden, aktiv beeinflussbaren Lagerung (6, 7) samt Ansteuerung (55), **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ansteuerung (50) der Maschine (2) zwei Betriebsmodi aufweist, von denen der eine Betriebsmodus eine Minimierung der Krafteinflüsse der elektrischen Maschine (2) auf die betreffenden Lagerfreiheitsgrade und der andere Betriebsmodus eine aktive Lagerkraftgenerierung der elektrischen Maschine (2) zur Lagerunterstützung bewirkt, und dass eine Detektions- und Schalteinheit (52', 52'') zur Umschaltung zwischen den zwei Betriebsmodi bei Über- bzw. Unterschreiten eines vorgegebenen Grenzwerts von zumindest einem Betriebsparameter vorgesehen ist, mit der eine Regel- oder Steuereinheit (35) für die Maschine (2) und die Lagerung (6, 7) verbunden ist.
2. Lager- und Antriebs-System nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Detektions- und Schalteinheit (52', 52'') zur Erfassung einer Abweichung des Läufers (5, 5') bzw. Ankers (95) der Maschine aus einer geometrischen Mittellage eingerichtet ist.
3. Lager- und Antriebs-System nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Regel- oder Steuereinheit (35) eine auf einem gespeicherten Kennfeld (34, 62) oder Modell samt Beobachter basierende asymmetrische Bestromung der Spulen (1a-3b) der Maschine (2) vorsieht.
4. Lager- und Antriebs-System nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Betriebsparameter die Auslenkung und bzw. oder die Auslenkungsgeschwindigkeit des Läufers (5, 5') bzw. Ankers (95) und bzw. oder die Beschleunigung des Gehäuses (4) der Maschine (2) vorgegeben sind.
5. Lager- und Antriebs-System nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Detektions- und Schalteinheit (52', 52'') eingerichtet ist, der Umschaltung des Betriebsmodus im Fall von mehreren Betriebsparametern eine gewichtete Kombination von Betriebsparametern zugrunde zu legen.
6. Lager- und Antriebs-System nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere elektrische Maschinen (2.1, 2.2) vorhanden sind, die eine unabhängige Leistungsregelung sowie eine Einrichtung (17, 35; Fig. 16) zur Leistungsaufteilung aufweisen.
7. Lager- und Antriebs-System nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einrichtung (17, 35; Fig. 16) zur Leistungsaufteilung eingerichtet ist, die elektrischen Maschinen (2.1, 2.2) im Sinne einer Maximierung des Gesamtwirkungsgrads der elektrischen Maschinen anzusteuern.
8. Lager- und Antriebs-System nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einrichtung zur Leistungsaufteilung eingerichtet ist, die elektrischen Maschinen (2.1, 2.2) im Sinne einer Maximierung des Gesamtwirkungsgrads der elektrischen Maschinen samt Ansteuerung anzusteuern.
9. Lager- und Antriebs-System nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einrichtung zur Leistungsaufteilung eingerichtet ist, die elektrischen Maschinen (2.1, 2.2) im Sinne einer Minimierung der Betriebstemperatur von Leistungskonvertern (26) anzusteuern, die die elektrischen Maschinen ansteuern.
10. Lager- und Antriebs-System nach einem der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die elektrischen Maschinen (2.1, 2.2) mittels der Einrichtung zur Leistungsaufteilung dahingehend angesteuert werden, dass die Verluste innerhalb des Gehäuses minimiert werden.

11. Lager- und Antriebs-System nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass es mit einem Schwungradspeicher (3) zur Speicherung von elektrischer Energie (Flywheel Energy Storage System-FESS) ausgeführt ist.
12. Lager- und Antriebs-System nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass es als rotatorisches System ausgeführt ist.
13. Lager- und Antriebs-System nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass es als translatorisches System (92) ausgeführt ist.

Hierzu 21 Blatt Zeichnungen

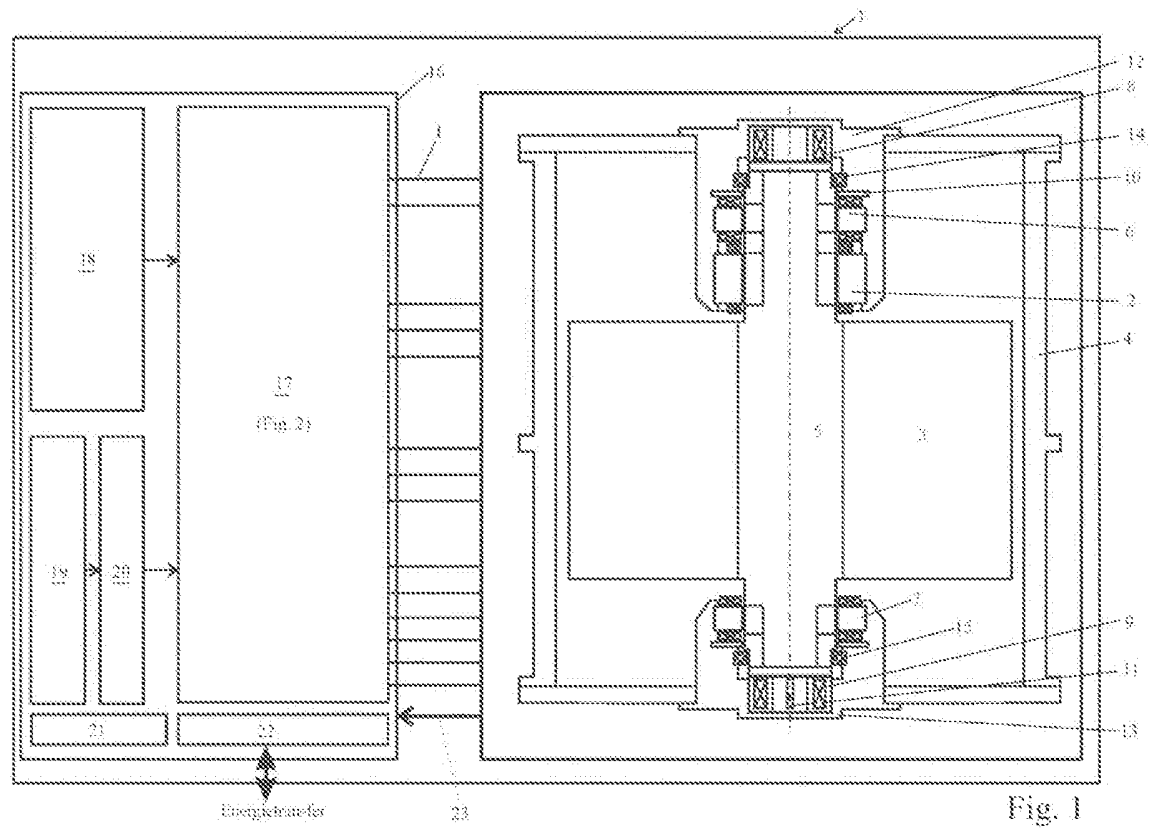


Fig. 2

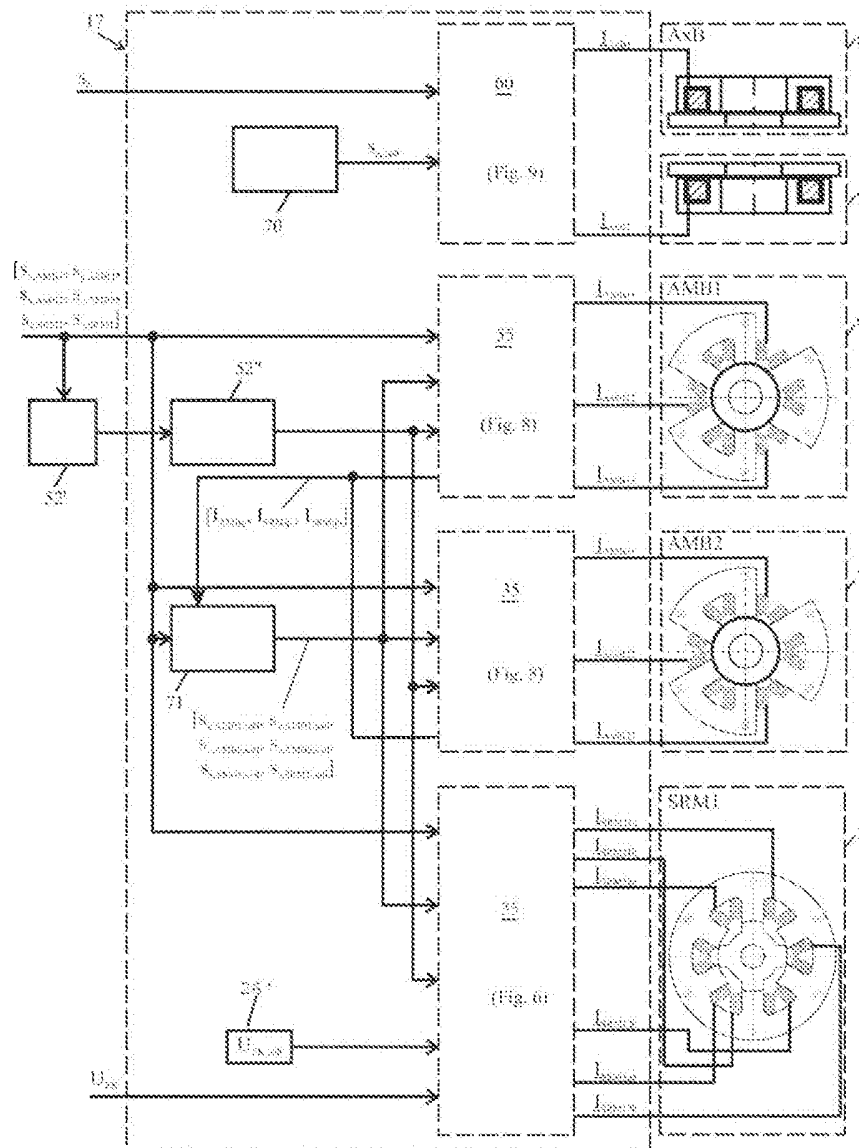


Fig. 3

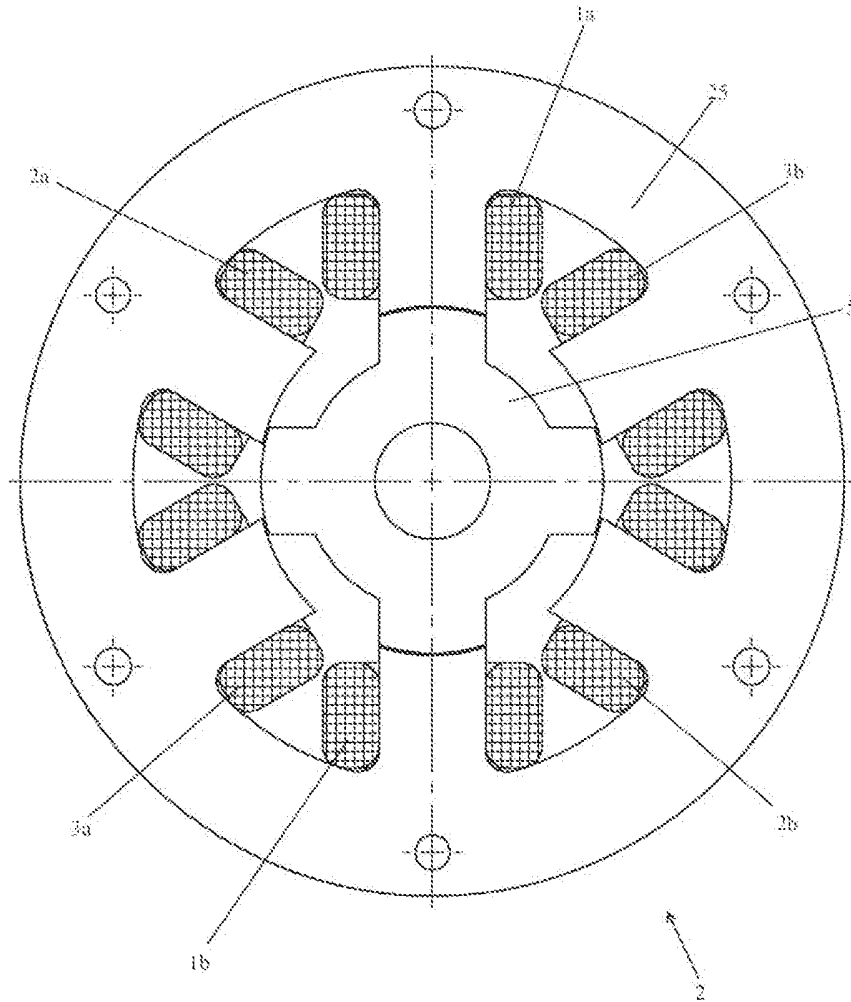


Fig. 4

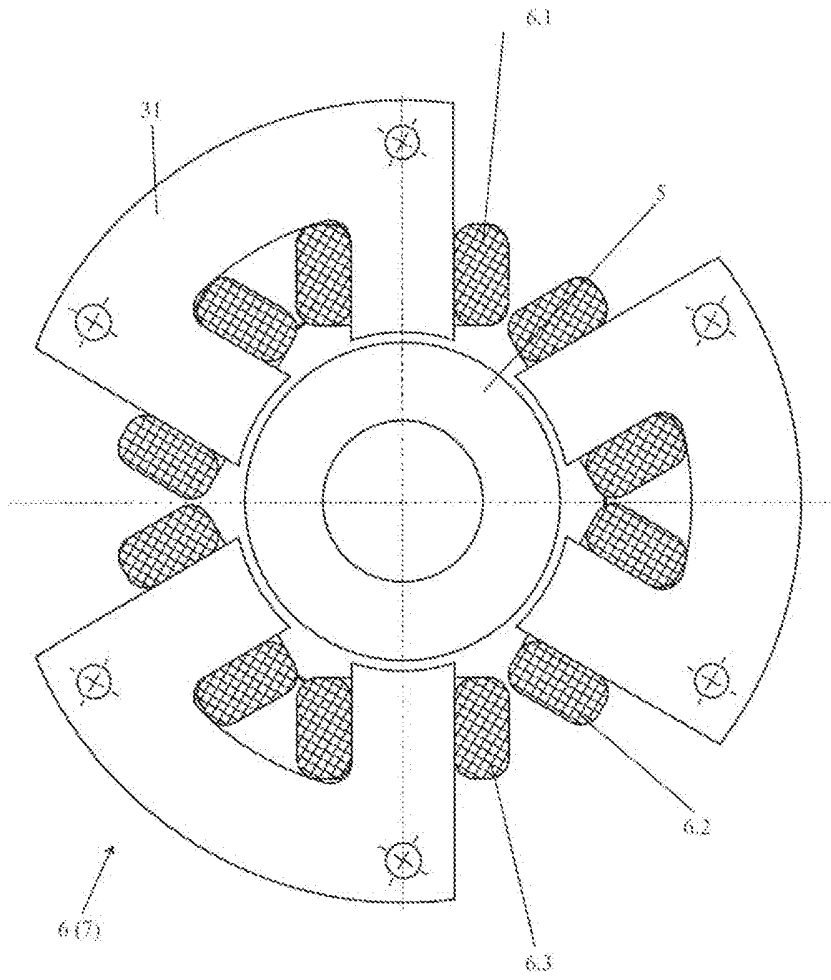
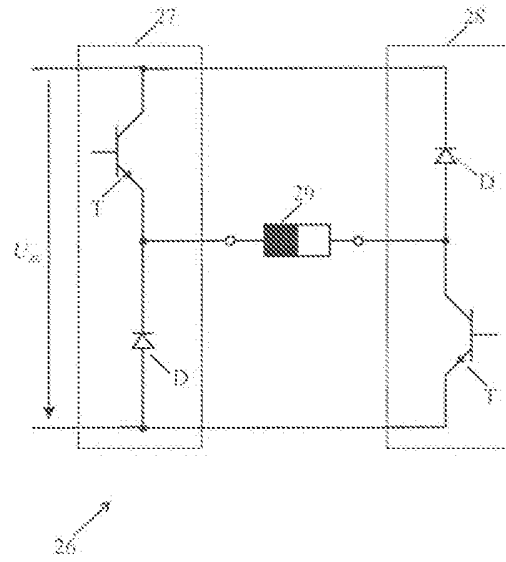
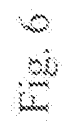


Fig. 5





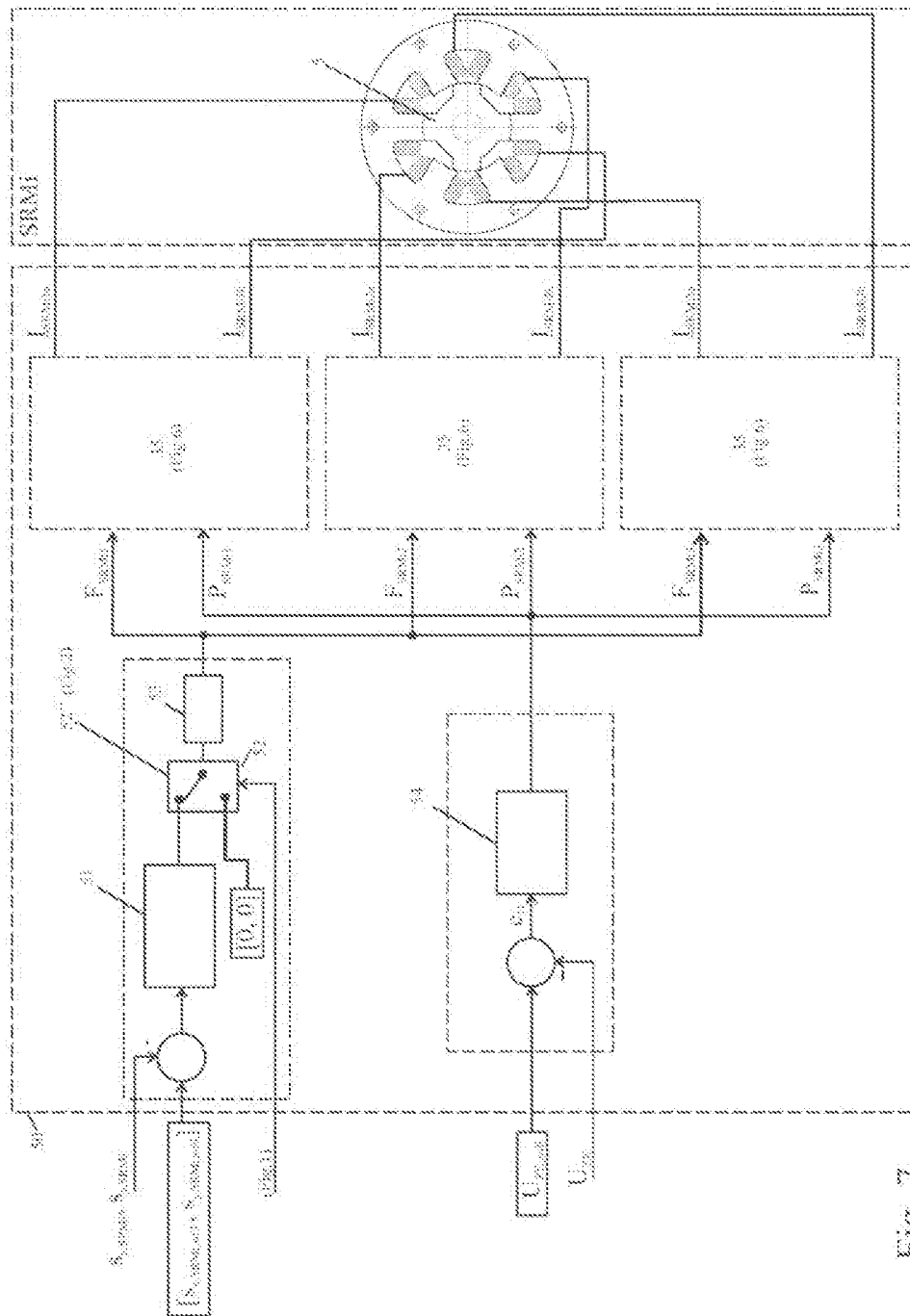


Fig. 7

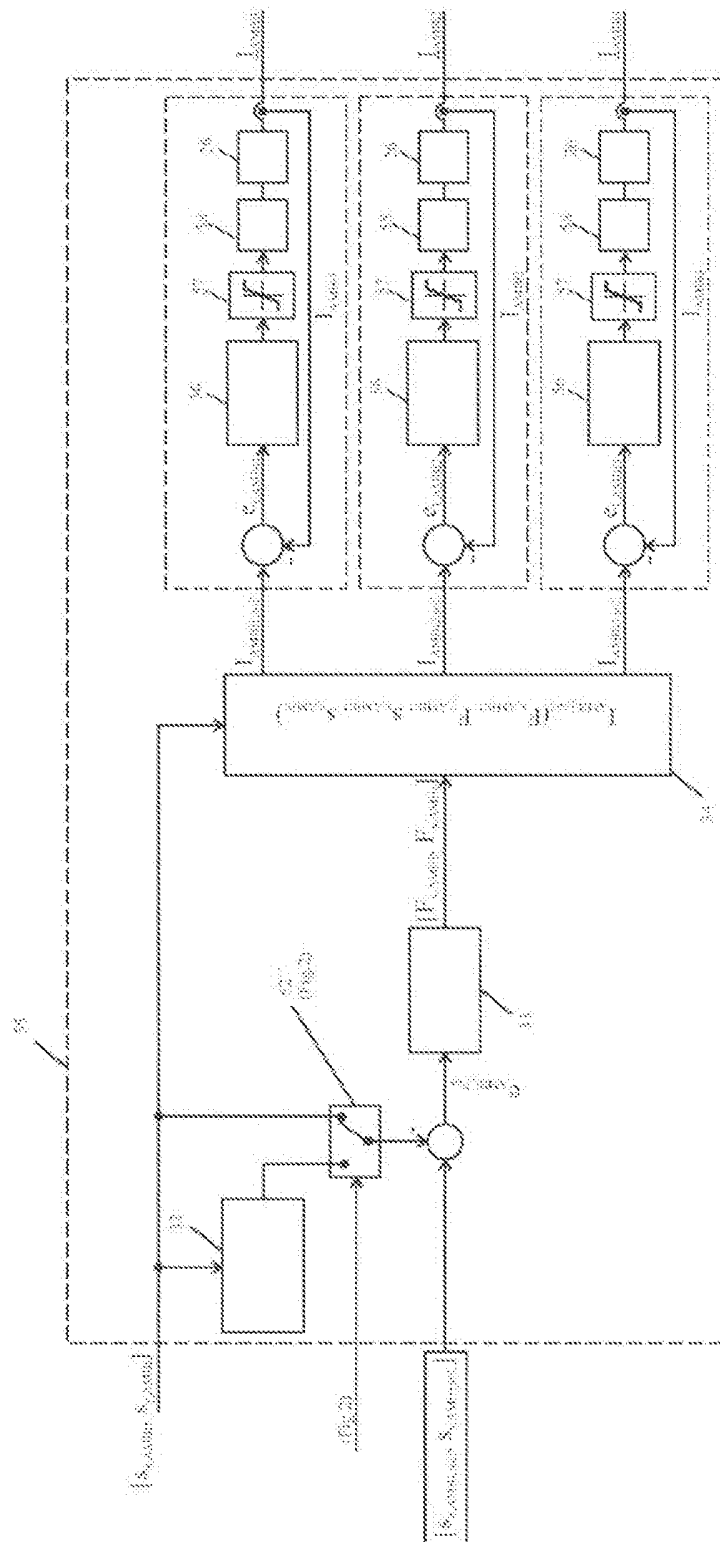


Fig. 8

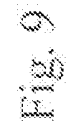


Fig. 10

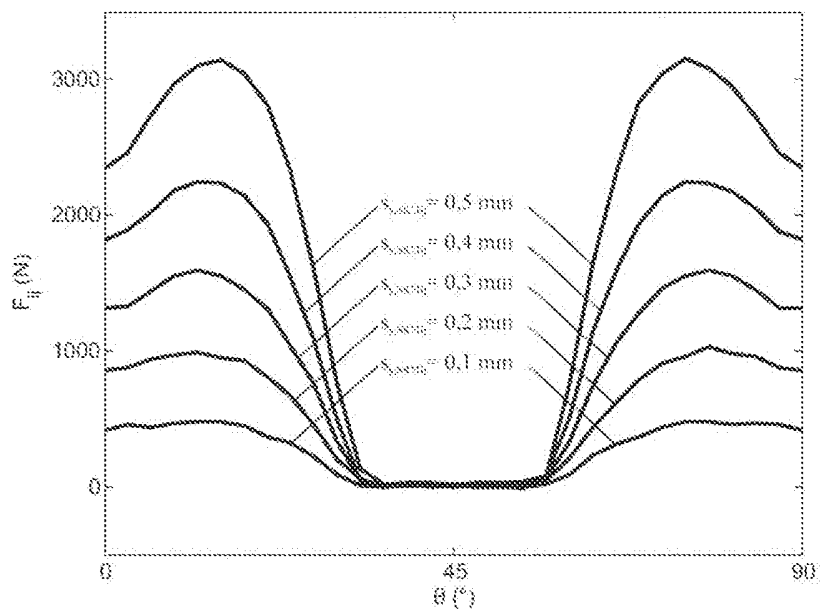


Fig. 11

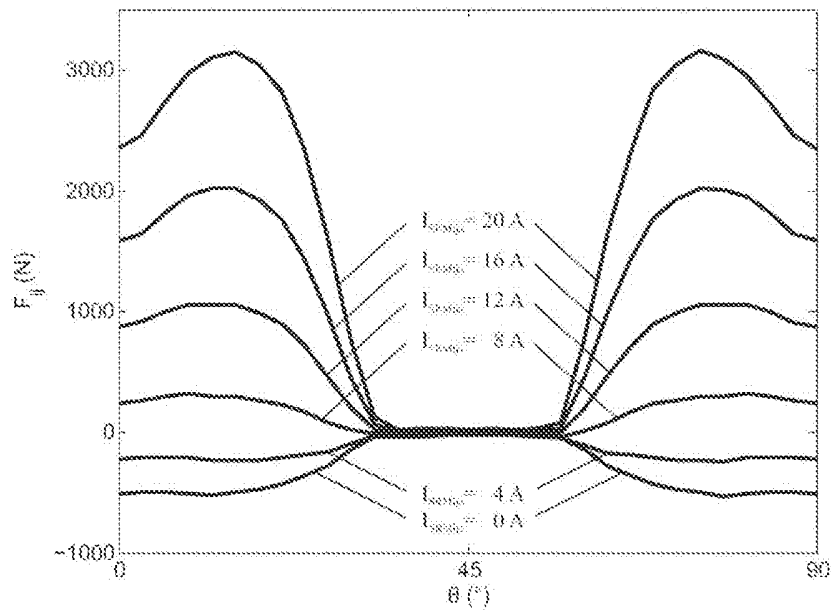


Fig. 12

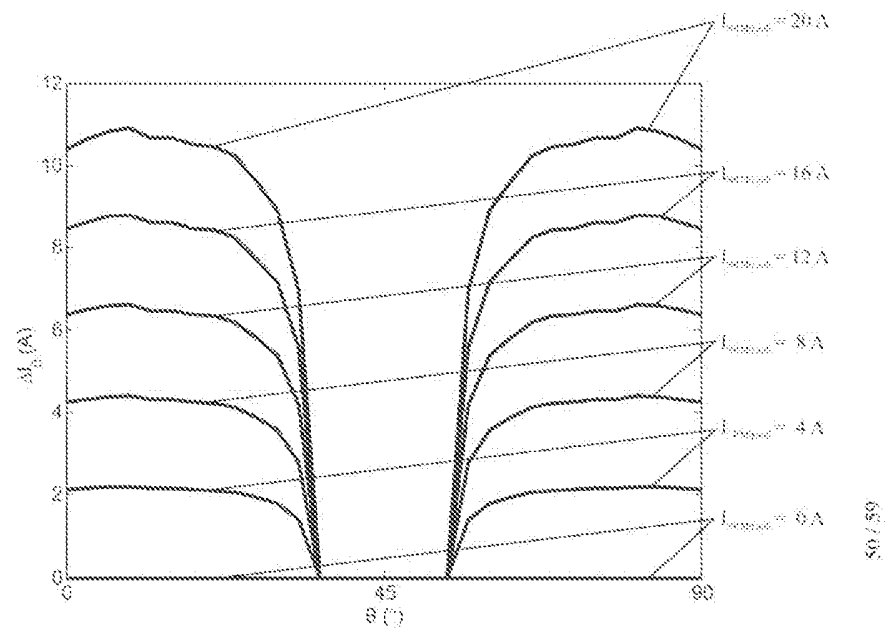
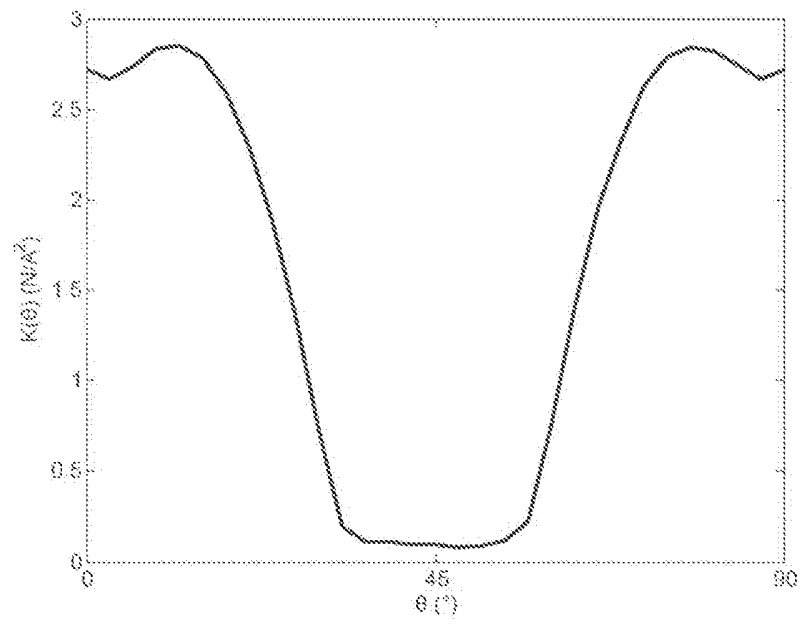
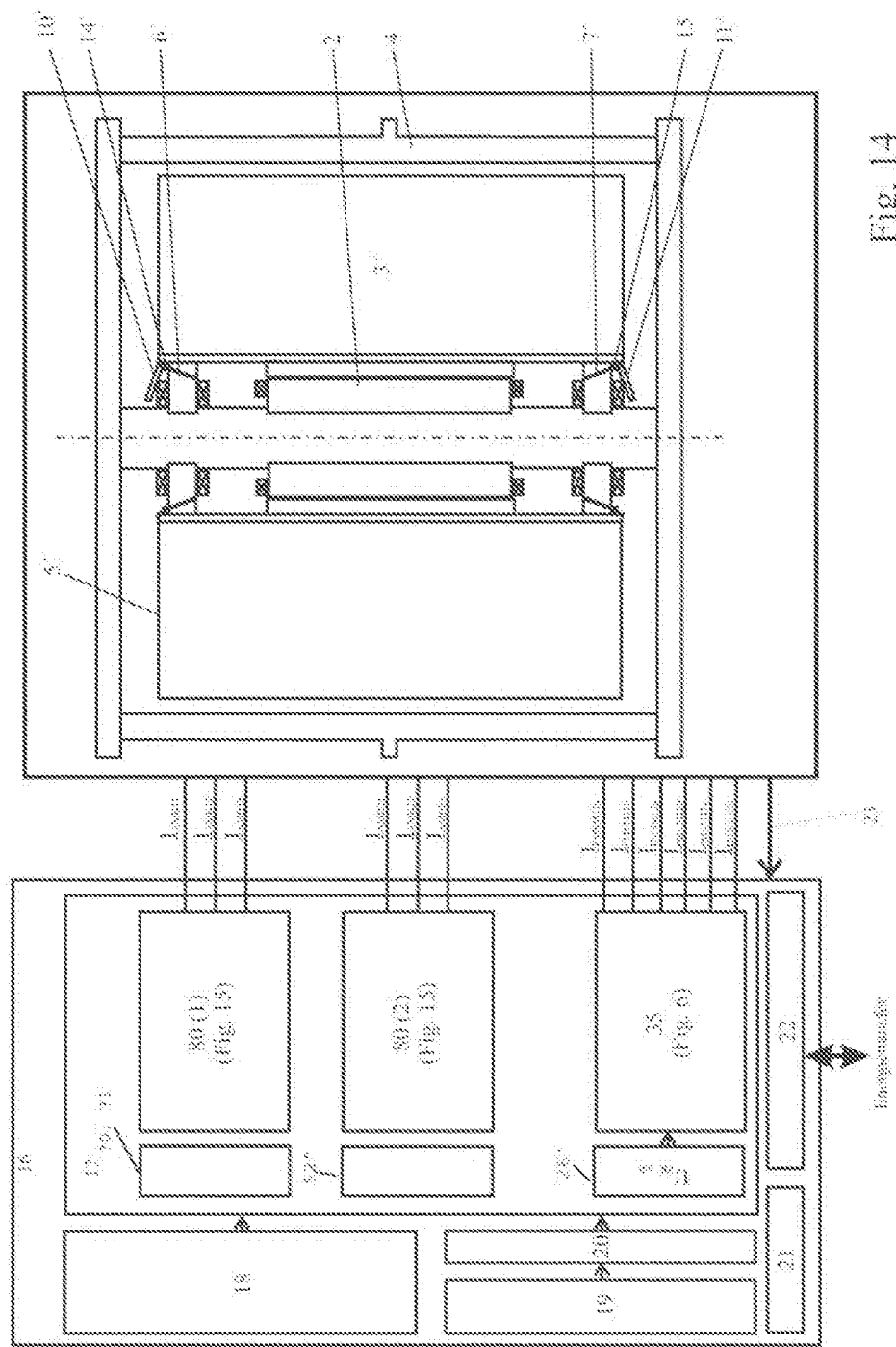


Fig. 13





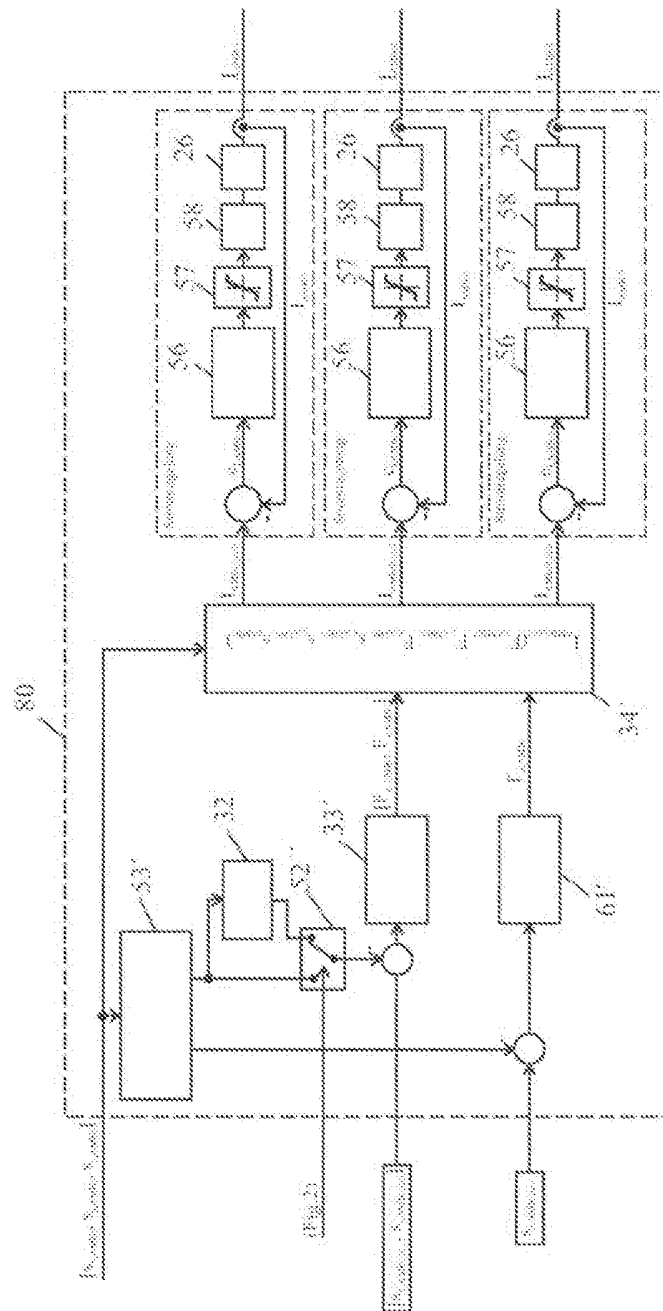
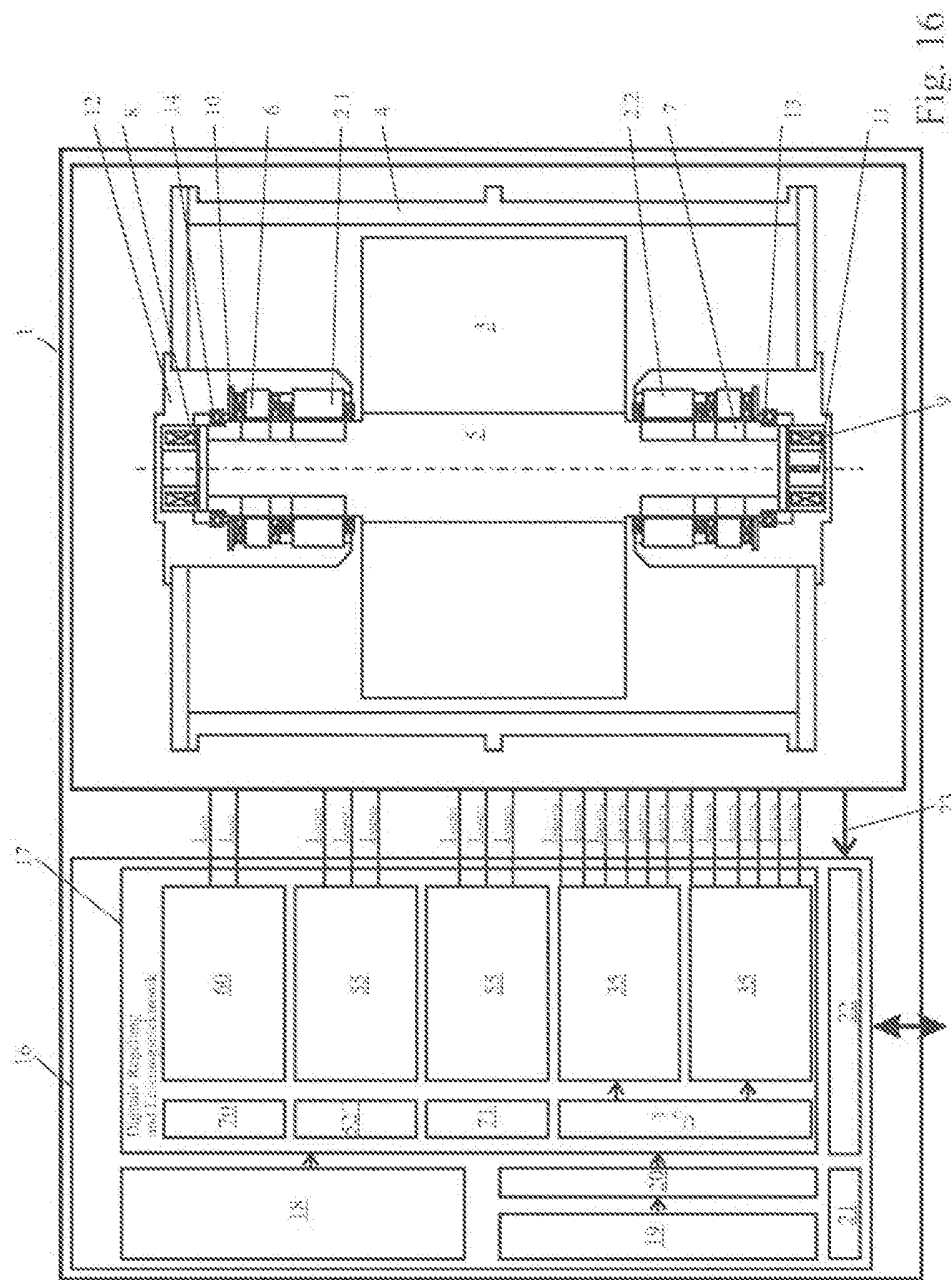


Fig. 15



54 / 59

Fig. 17

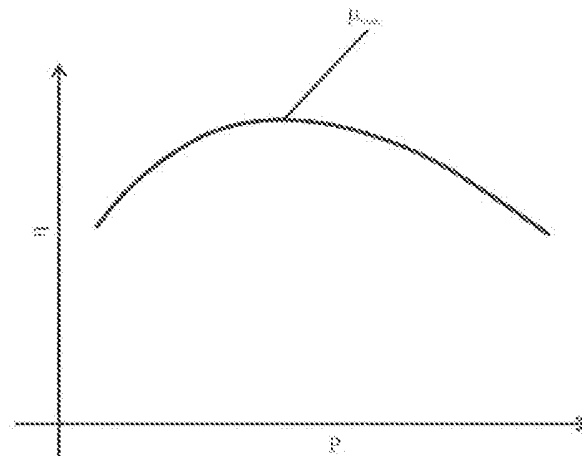


Fig. 18

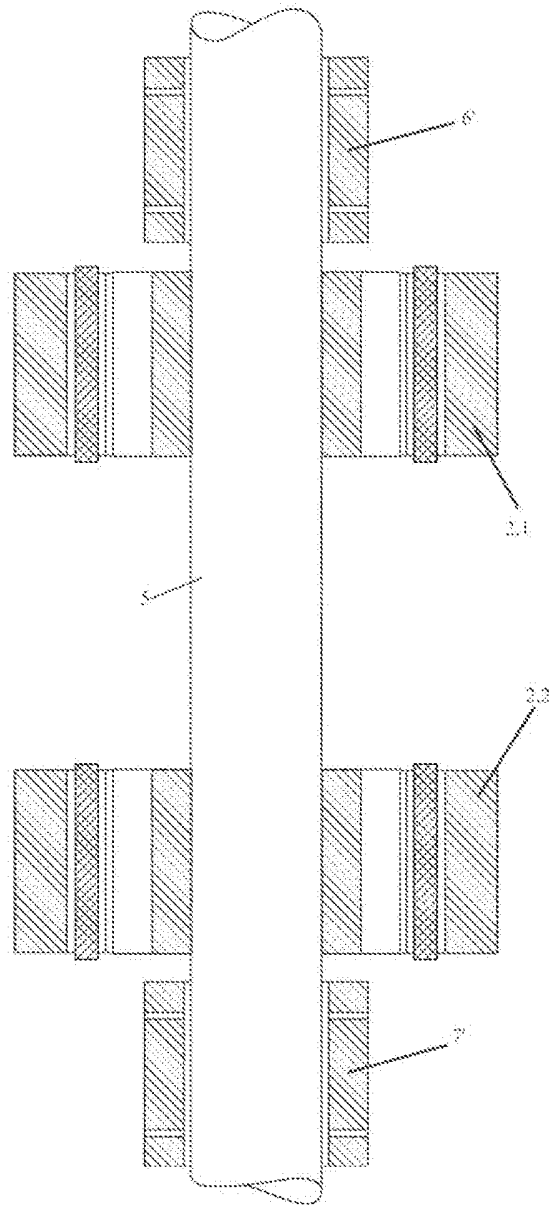
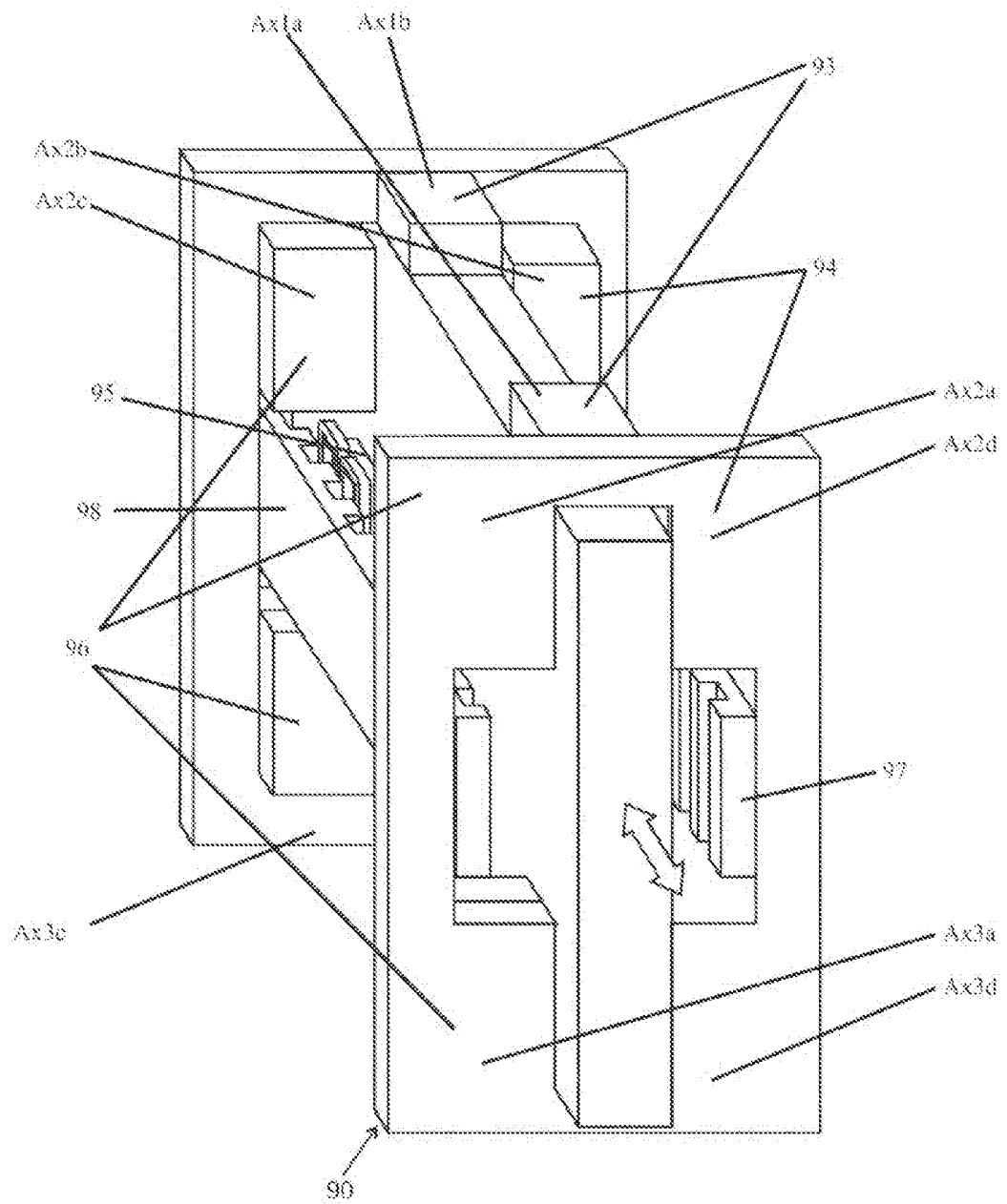


Fig. 19



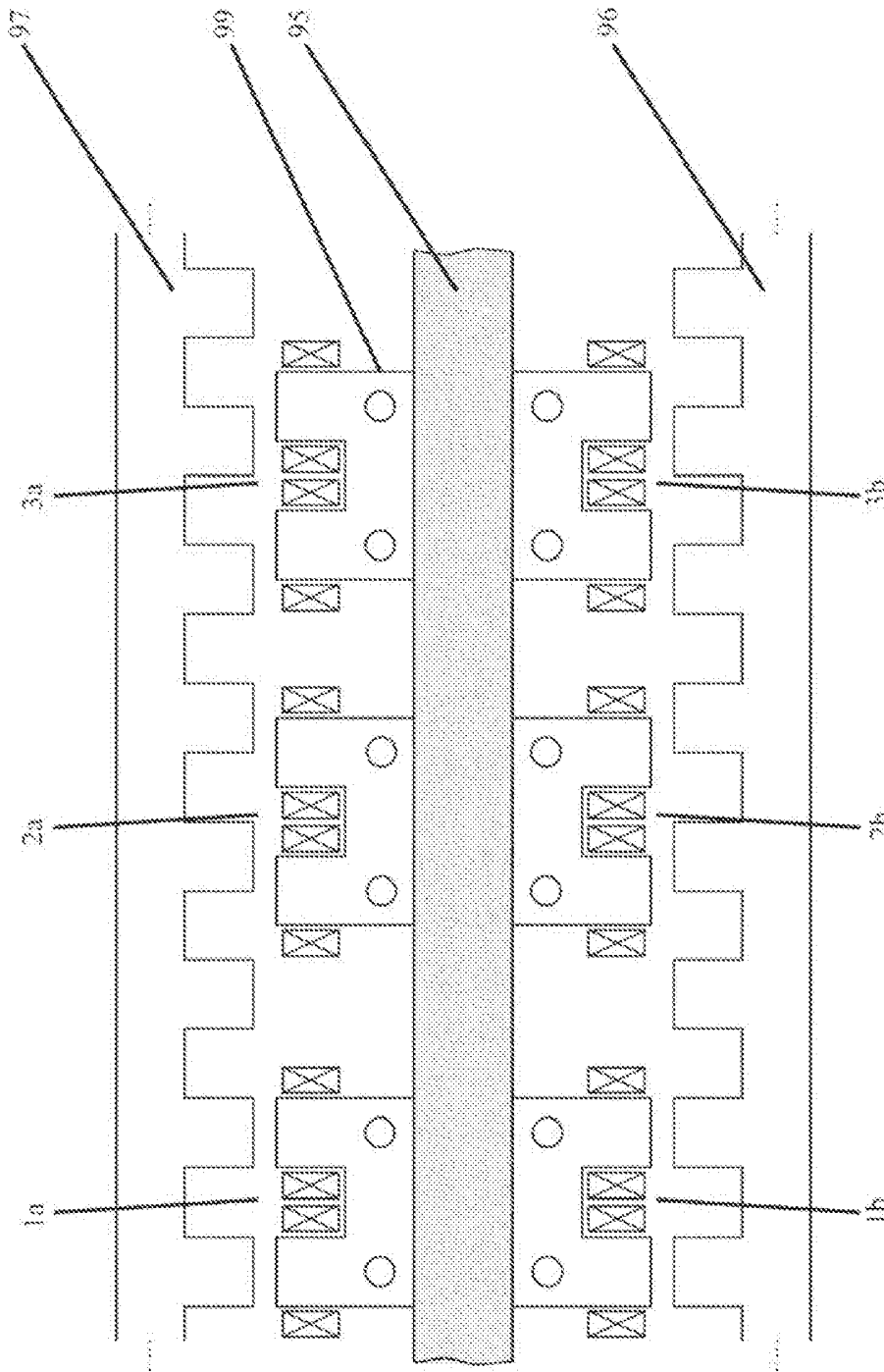


Fig. 20

92

Fig. 21

