

⑤

Int. Cl. 2:

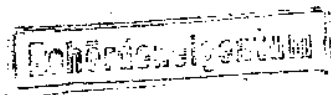
H 02 K 5-16

⑯ BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES



PATENTAMT



DT 23 58 527 A1

⑪

Offenlegungsschrift 23 58 527

⑫

Aktenzeichen:

P 23 58 527.5-32

⑬

Anmeldetag:

20. 11. 73

⑭

Offenlegungstag:

28. 5. 75

⑳

Unionspriorität:

③② ③③ ③①

⑤①

Bezeichnung:

Radiales aktives magnetisches Lager

⑦①

Anmelder:

Licentia Patent-Verwaltungs-GmbH, 6000 Frankfurt

⑦②

Erfinder:

Hermann, Peter Konrad, Prof. Dr.-Ing., 1000 Berlin

Prüfungsantrag gem. § 28 b PatG ist gestellt

DT 23 58 527 A1

Licentia Patent-Verwaltungs GmbH
6 Frankfurt/Main, Theodor Stern Kai 1

Lehmann/li

B I 73/57

Radiales aktives magnetisches Lager.

Die Erfindung betrifft ein radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb, bestehend aus Ständer und Rotor mit einem von Sensoren überwachten Luftspalt.

Es ist bekannt geworden, durch besondere Anordnungen Rotationskörper elektromagnetisch zu lagern (DAS 1 750 602) und elektromotorisch in Umdrehungen zu versetzen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Anordnungen für die Lagerung und den Antrieb eines Rotationskörpers zu kombinieren, um so zu wirtschaftlichen Ausführungsformen zu kommen.

Die Lösung dieser Aufgabe wird bei einer eingangs beschriebenen Anordnung darin gesehen, dass dem von Ständerwicklungen durch Speisung mit Drehstrom erzeugten Drehfeld ein Steuerfeld überlagert wird, das von Wicklungen im Ständer durch die Ausgangsströme von Verstärkern erzeugt wird, die ihrer-

2358527

seits mit Spannungen ausgesteuert werden, die dem Produkt der von den Sensoren gelieferten, der Abweichung des Luftspaltes vom Sollwert entsprechenden, Spannungen und von Hilfsspannungen proportional gemacht werden, die die Frequenz des das Drehfeld speisenden Netzes haben.

In Weiterbildung der Erfindung überträgt eine Drehfeldwicklung in einem genuteten Ständerblechpaket über einen Arbeitsluftspalt auf einen Rotationskörper ein antreibendes Drehfeld, und eine zusätzliche konzentrisch zum Rotationskörper angeordnete Steuerwicklung erzeugt im Arbeitsluftspalt ein rotationssymmetrisches Zusatzfeld. Der Ständer besitzt ein oder zwei Drehfeldsysteme der gleichen Bauart wie bei üblichen Drehstrommotoren, mit denen das antreibende magnetische Drehfeld erzeugt und über den Luftspalt bzw. über zwei Luftspalte auf den Läufer übertragen wird. Im Drehfeld dieses oder dieses Ständer erfährt der Rotor ein Antriebsmoment. Der Rotor kann nach Art von Käfigläufern ausgebildet sein. Er kann aber auch als ferromagnetischer Zylinder oder Hohlzylinder mit grösserer oder kleinerer Wandstärke ausgebildet sein und als Hystereseläufer eines Hysteresemotors wirken, wobei er beispielsweise auch selbst als Zentrifugenrotor dienen kann, wenn die Aufgabenstellung eine solche Zentrifuge mit magnetischer Lagerung betrifft. Für im Vakuum zu betreibende Zentrifugen mit hoher Umfangsgeschwindigkeit kann die magnetische Lagerung, und zwar insbesondere die aktive magnetische Radiallagerung ein funktionswichtiger Bestandteil für eine technisch betriebssichere Ausführung sein.

509822/0488

2358527

Als aktives magnetisches Lager wird dabei ein solches verstanden, bei dem der konzentrisch zu haltende Luftspalt mit Sensoren überwacht wird, die über eine elektronische Schaltung Elektromagnete so regeln, dass sich der Rotor zentriert und somit gelagert wird. Die achsiale Lagerung kann dabei wie auch sonst im Elektromaschinenbau selbsttätig durch das vom Ständer auf den Läufer übertretende Antriebsdrehfeld erfolgen.

Durch ein rotationssymmetrisches Zusatzfeld (Steuerfeld) wird die Luftspaltinduktion des Rotors jeweils an der Stelle verstärkt, an der eine Zugkraft auf den Rotor zum Zwecke der Regelung der konzentrischen Rotorlage ausgeübt werden muss, und an der gegenüberliegenden Seite geschwächt.

Für rotationssymmetrische unipolare Steuerfelder wird ein besonderes magnetisches Rückschlussjoch am Ständer der Maschine vorgesehen, das den Steuerfluss über einen weiteren konzentrischen Luftspalt zum Rotor hin schliesst.

An Hand einer Zeichnung sei ein schematisches Ausführungsbeispiel der Erfindung erläutert. In Fig. 1 ist eine besonders einfache Ausführungsform eines magnetischen Lagers mit Antrieb dargestellt. Der Ständerkern 1 trägt in halbgeschlossenen Nuten eine zweipolige Drehfeldwicklung 2. Der Läufer 3 kann als Käfigläufer ausgebildet sein oder auch aus einem Hohlzylinder aus Hysteresematerial bestehen. Die konzentrische Steuerwicklung 4 wird von dem konzentrischen Rückschlussjoch 5 und vom Ständerkern 1 der Drehfeldwicklung 2 umschlossen.

2358527

Der Steuerfluss ist rotationssymmetrisch. Er schliesst sich über den zusätzlichen Zusatzluftspalt 7, den Läufer 3, den Drehfeldluftspalt 6, den Ständerkern 1 und das Rückschlussjoch 5.

Fig. 2 zeigt ein Ausführungsbeispiel, bei dem zwei Drehfeldsysteme vorgesehen sind.

Die Polringe 8 und 9 bestehen aus einzelnen Zähnen, deren magnetischer Fluss über die achsialen Kerne 10 an einen mittleren Jochrückschlussring 11 geführt wird. Dieser bildet ungezahnt mit dem Hystereseläufer 12 einen zylindrischen Luftspalt 13, der die Funktion des Luftspaltes 7 in Fig. 1 erfüllt, also zum magnetischen Rückschluss des Steuerflusses für die Lagerstellkräfte dient. Die gezahnten Polringe 8 und 9 bilden mit dem Hystereseläufer 12 die Drehluftspalte 14 und 15 von zwei Drehfeldwicklungssystemen 16 und 17, die mit den Kernen 10 verkettet sind. Die beiden Drehfeldsysteme können natürlich auch in der im Maschinenbau sonst üblichen Weise in den Nutlücken zwischen den Zähnen der Polringe 8 und 9 angeordnet werden. Dann würden die Wickelköpfe die achsiale Baulänge des erfindungsgemässen Lagerantriebes nach oben und unten achsial verlängern, was für Zentrifugen unerwünscht sein kann. Die gezeichnete Ausführungsform ist daher trotz grösserer Ständerstreulüsse in bestimmten Fällen vorteilhaft, ohne jedoch für den Erfindungsgedanken zwingend zu sein. Zur Veranschaulichung der räumlichen Anordnung ist in Fig. 2a die Draufsicht auf das Lager nach Fig. 2 dargestellt mit Drehfeldwicklung 16 in nur einer Phase I. Die Zähne des Polringes 8

sind nur im zweiten Quadranten der Fig. 2a dargestellt, damit man die jeweils aus vier zweilagigen Spulen bestehenden Wicklungen I_{16a} und I_{16b} besser erkennt. Die Unterlage ist gestrichelt und die Oberlage ausgezogen dargestellt. Die Übergänge von Unterlage zu Oberlage in den Wickelköpfen an Kröpfungen aussen und innen können auch schraubenförmig gestaltet werden. Da diese Kröpfungen über den Aussendurchmesser des Rückschlussjochringes 11 überstehen, erkennt man die um eine halbe Polteilung gegen die Drehfeldwicklung 16 versetzten Kröpfungen der Drehfeldwicklung 17 in Phase I, also I_{17a} und I_{17b} gegenüber I_{16a} und I_{16b} . Insbesondere erkennt man, dass Differenzflüsse zwischen a- und b-Spulen, da sie auf gegenüberliegenden Seiten des Rotors liegen, sich axial über Rotorluftspalt 13 (Fig. 2) und Rückschlussjochring 11 schliessen können und daher auch durch Spannungsdifferenzen an a- und b-Wicklungen erzwungen werden können.

Die beiden Drehfeldsysteme 16 und 17 sind bei einer 2-poligen Ausführung räumlich um 90° gegeneinander versetzt angeordnet, so dass also die Wellenfunktion für die Luftspaltinduktion B_{14} im Luftspalt 14 und B_{15} im Luftspalt 15 den Gleichungen

$$B_{14} = B_0 \cos(\omega_n t + \alpha) \quad B_{15} = B_0 \cos(\omega_n t + \alpha + \pi/2)$$

genügt.

Hierin ist ω_n die Kreisfrequenz des Drehfeldspeisenetzes und α der den Umfangspunkt kennzeichnende Winkel. Der laufende Zeitwert wird mit t bezeichnet.

Im Raum zwischen den Drehfeldwicklungen und dem Hysterese-läufer sind die konzentrischen Steuerwicklungen 18 und 19 untergebracht. Der magnetische Luftspaltwiderstand von Luftspalt 13 wird durch grössere achsiale Polbreite kleiner gemacht als der der Drehfeldluftspalte 14 und 15, so dass der Steuerfluss der Steuerwicklung 18 sich fast nur dem Drehfeldfluss im Drehfeldluftspalt 14 und der der Steuerwicklung 19 fast nur dem Drehfeldfluss im Drehfeldluftspalt 15 überlagert. Die Wirkung der Steuerwicklung 18 im Drehfeldluftspalt 15 und der Steuerwicklung 19 im Drehfeldluftspalt 14 ist im übrigen kompensierbar.

Die Luftspalte werden von Sensoren laufend überwacht, die eine etwaige Exzentrizität ϵ des Läufers in x- und y-Richtung ϵ_x und ϵ_y , die senkrecht aufeinander und auf der Drehachse stehen, in Form elektrischer Messwerte erfasst.

Zur Erläuterung der Wirkungsweise der elektronischen Schaltung sei angenommen, dass jeweils momentan eine dem Betrag der Exzentrizität

$$\epsilon_0 = \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2}$$

proportionale Stellkraft bewirkt werden soll, und zwar in einer Richtung γ , für die gilt

$$\tan \gamma = -\epsilon_y / \epsilon_x$$

die also der Richtung der Exzentrizität entgegengerichtet ist und sie daher zu verringern sucht.

In besonders vorteilhafter Weise wird einem weiteren Erfindungsgedanken entsprechend die Multiplikation der von

von den Sensoren gelieferten elektrischen Messwerte $k\varepsilon_x$ und $k\varepsilon_y$ mit Hilfsspannungen u_0 der Speisefrequenz ω_n der Drehfeldsysteme des Motors in nachstehender ganz bestimmter Phasenlage vorgenommen und für die Aussteuerung der Steuerwicklungen der beiden Drehfeldsysteme die Summenwirkung der Produkte beider elektrischer Messwerte in x- und y-Richtung mit Hilfsspannungen u_1 und u_2 unterschiedlicher Phasenlage zur Aussteuerung von zwei Verstärkern a und b mit den Spannungen u_a und u_b verwendet. Dabei wird die Steuerwicklung 18 (Fig. 2) von ^a dem Verstärker ~~18~~ und ^b 19 gespeist.

Unter Bezugnahme auf die obengenannten Wellenfunktionen von B_{14} und B_{15} sind diese Beziehungen durch folgende Gleichungen definiert:

$$\begin{aligned} u_a &= k\varepsilon_x \cdot u_1 + k\varepsilon_y \cdot u_2 & \text{und} \\ u_b &= k\varepsilon_x \cdot u_2 - k\varepsilon_y \cdot u_1 & \text{wobei} \\ u_1 &= u_0 \cos \omega_n t & \text{und} \\ u_2 &= u_0 \sin \omega_n t \end{aligned}$$

die Hilfsspannungen mit dem Scheitelwert u_0 sind. Es wird dabei vorausgesetzt, dass die positive Richtung diejenige ist, in die das Drehfeld des Systems 16 im Zeitpunkt $t=0$ zeigt, also $\alpha=0$ entspricht und durch ein positives u_a von Steuerwicklung 18 in dieser Richtung verstärkt, an der gegenüberliegenden Seite des Luftspaltes also geschwächt wird. Entsprechend liegt die positive y-Richtung bei $\alpha=\pi/2$. In diese Richtung zeigt das Drehfeld des Systems 17 im Luftspalt 15 im Zeitpunkt $t=0$.

Im einzelnen sollen drei Fälle beschrieben werden:

1. sei angenommen, dass ξ konstante Richtung hat, also relativ zum Ständer nicht umläuft. Dieser Fall wird z.B. bei horizontaler Drehachse durch das Läufergewicht dargestellt, dem eine richtungskonstante gleich grosse Stellkraft des Lagers das Gleichgewicht hält, die ausgelöst wird durch eine (geringfügige) bleibende Lagenexzentrizität des Läufers nach unten.
2. Als zweiter Fall sei angenommen, dass ξ synchron mit dem Läufer umläuft, wie es durch Unwucht und insbesondere beim Durchlaufen kritischer Drehzahlen der Fall ist, und dass der Drehfeldantrieb synchron erfolgt, was bei Hysteresemotoren der Fall sein kann.
3. Schliesslich soll der Fall behandelt werden, dass ξ synchron mit dem Läufer umläuft und der Drehfeldantrieb asynchron mit einem Schlupf gegen die Speisefrequenz erfolgt.

Fall 1:

Es ist $\xi_x = 0$; $\xi_y = \text{konst.}$ Der Steuerstrom i_{18} in Steuerungsspule 18 (Fig. 2) wird von einem Verstärker geliefert, dessen Eingang von ξ_x und ξ_y über Multiplikatoren (beispielsweise in Form von Hallgeneratoren) mit einer Spannung angesteuert wird, die die Gleichung

$$i_{18} = k(\xi_x \cos \omega_n t + \xi_y \sin \omega_n t)$$

2358527

für den Steuerstrom i_{18} erfüllt. Entsprechend wird ein weiterer Verstärker für Steuerspule 19 so angesteuert, dass

$$i_{19} = k (\epsilon_x \sin \omega_n t - \epsilon_y \cos \omega_n t)$$

wird. Die in diesem Steuerstrom proportionalen Steuerflüsse überlagern sich den Drehfeldflüssen, so dass wegen $\epsilon_x = 0$ wird:

$$B_{14} = B_0 \cos(\omega_n t + \alpha) + k_1 \epsilon_y \sin \omega_n t$$

$$B_{15} = B_0 \cos(\omega_n t + \alpha + \pi/2) - k_1 \epsilon_y \cos \omega_n t$$

Die Stellkraft F wird durch die Integration der mechanischen Spannung über den Umfang ermittelt, die dem Quadrat der Luftspaltinduktion B_{14} bzw. B_{15} proportional ist.

Es zeigt sich, dass zwar die Kraftwirkungen F_{14} und F_{15} , also die Stellkräfte durch die Drehfeldluftspalte 14 und 15, mit der Frequenz $2 \omega_n$ pulsieren, jedoch zeitlich um 180° phasenverschoben, so dass die Summenstellkraft nicht mehr mit $2 \omega_n$ moduliert ist.

Die Summenkraft $F_{14} + F_{15}$ entsteht in Höhe

$$F = F_{14} + F_{15} = 2\pi B_0 k_1 \epsilon_y$$

in y -Richtung. Qualitativ kann man die Wirkungsweise auch so interpretieren:

Dem Drehfeld in Drehfeldluftspalt 14 wird ein rotationsymmetrisches Wechselfeld gleicher Frequenz und solcher Phasenlage überlagert, dass jeweils in den Phasenzeitpunkten, in denen das Drehfeld in vertikaler Richtung nach oben oder nach

2358527

unten zeigt, der Betrag der Luftspaltinduktion oben im Ringspalt erhöht und unten erniedrigt wird. Wegen der Richtungsumkehr sowohl des Drehfeldes als auch des rotationssymmetrischen Steuerwechselfeldes nach jeweils einer halben Periode findet die Betragssteigerung am gleichen Ort statt. Die erzeugte mittlere Stellkraft hebt also den Rotor an. Sie pulsiert aber mit doppelter Speisefrequenz wegen der Nulldurchgänge vom Drehfeld und Wechselfeld.

Dadurch, dass die Kraftwirkung des zweiten Drehfeldluftspaltes 15 hinzukommt, in dem wegen der 90° Phasenverschiebung des Drehfeldes und des Wechselfeldes die Maximalkräfte jeweils im Augenblick der Nullpunkte der Felder und Kräfte im Drehfeldluftspalt 14 auftreten, ergänzen sich die beiden Stellkräfte beider Spalte zu einem nichtpulsierenden Summenwert. Auch in seitlicher Richtung entstehen keine pulsierenden Kräfte.

Der zweite Modellfall, von synchron mit dem Drehfeld und dem synchron laufenden Läufer Stellkräfte zu erzeugen, ist noch leichter durchschaubar, weil solche Kräfte bereits im einzelnen Drehfeldsystem entstehen, wenn die entsprechende Steuer-
spule mit Gleichstrom erregt wird. Damit liegt jedoch die Richtung der Stellkraft zur Drehfeldrichtung dieses Systems fest, und es müssen wiederum beide Drehfeldsysteme benutzt werden, um mit den beiden Gleichströmen der Steuerspulen den gewünschten räumlichen Phasenwinkel der Kraftrichtung zur Rotorlage mit den senkrecht aufeinander stehenden Kraftkomponenten beider Systeme zu erzeugen.

807822/0488

BAD ORIGINAL

2358527

In diesem besonderen Falle sind die beiden Drehfeldsysteme also nicht deshalb erforderlich, weil sonst unerwünschte Störkräfte doppelter Frequenz auftreten, sondern nur um erforderliche resultierende Stellkräfte in jeder Winkellage zum Rotor (bzw. Drehfeld) erzeugen zu können.

Nach den bisherigen Erläuterungen ist auch der dritte Modellfall leicht einsichtig zu machen. In diesem Fall wird

$$B_{r4} = B_0 \cos(\omega_n t + \alpha) + k_1 (\varepsilon_x \cos \omega_n t + \varepsilon_y \sin \omega_n t) \quad \text{und}$$

$$B_{r5} = B_0 \cos(\omega_n t + \alpha + \pi/2) + k_1 (\varepsilon_x \sin \omega_n t - \varepsilon_y \cos \omega_n t)$$

Mit diesen Induktionswerten ergibt sich, wenn

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 \sin \omega_f t \quad \text{und}$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 \cos \omega_f t$$

die mit ω_f umlaufende Exzentrizität ist, als Kraftwirkung

$$F = 2\pi B_0 k_1 \varepsilon_0 \cos(\omega_f t + \alpha)$$

Die beiden Einzelkräfte F_{14} und F_{15} sind in diesem Fall mit der doppelten Schlupffrequenz $2(\omega_n - \omega_f)$ im Gegentakt moduliert, ergänzen sich aber zu der gewünschten mit ω_f umlaufenden und ε_0 proportionalen Grösse. Dieser Fall ist von praktisch grosser Bedeutung, z.B. bei der Überwindung kritischer Drehzahlen beim Hochlauf überkritisch betriebener Zentrifugen.

Beim Antrieb mit Asynchronmotoren wird maximales Drehmoment bereits mit niedriger Schlupffrequenz von 2 - 10 Hz erreicht. Die Steuerspulen werden nur mit der niedrigen Schlupffrequenz $\omega_n - \omega_f$ angesteuert. Entsprechend klein wird daher auch die von den Verstärkern für die Steuerspulen erforderliche Blind- und Scheinleistung und damit der für die Lagerung und die Über-

windung kritischer Drehzahlen erforderliche Aufwand an aussteuerbarer Verstärkerleistung.

Neben der Einsparung an Kerneisen und Raumbedarf für Drehfeldantriebe und Lagerung durch die erfindungsgemässe Kombination ist der Vorteil der Erfindung somit ganz wesentlich auch darin zu sehen, dass die Steuerverstärker für gleiche Stellkräfte und auf den Ständer bezogene Stellfrequenzen erheblich kleiner und leistungsrärmer gewählt werden können als bei bisher bekannter Ausführung mit getrennter Lagerung und Antrieb.

Es kommt jedoch noch ein weiterer Vorteil hinzu, der sich auf verringerten erforderlichen Kupferaufwand für gegebene Antriebsleistung sowie Stellkraft und Stellfrequenz der Lagerung bezieht.

Bisher wurden in Fig. 1 und 2 Ausführungsformen des Erfindungsgedankens mit getrennten Wicklungen für Drehfelderzeugung und Steuerfluss angegeben. Die Funktion der Steuerspulen kann jedoch, wie Fig. 3 zeigt, auch von den Drehfeldwicklungen mit übernommen werden.

In Fig. 3 sind die beiden Drehfeldwicklungen 36 und 37 in 6-phasiger Sternschaltung dargestellt. Die übliche 3-phasige Drehfeldschaltung der Wicklungen der vorstehend beschriebenen Ausführungsformen zeigt im Unterschied dazu Fig. 3a. Die römischen Ziffern I, II und III kennzeichnen die drei Phasen des Drehstromnetzes. Sechshephasige Speisung I₊; I₋; II₊; II₋; III₊; III₋, erfolgt über Transformatoren in der Stromversorgung 32 der Fig. 3, die die jeweiligen positiven und negativen

Phasenspannungen, bezogen auf die Sternpunkte S_6 und S_7 , zur Verfügung stellen. Die zu jeder Phase gehörenden zwei Wicklungen a und b sind räumlich auf gegenüberliegenden Seiten des zweipoligen Rotors im Ständer angebracht, so dass ein Differenzfluss dieser Teilspulen, wie er bei unsymmetrischem Sternpunkt S_6 ^{bzw.} und S_7 im Potentialdiagramm des Sechphasensystems zustande kommt, sich über den Rotor und den Luftspalt 13 (Fig. 2) zum Ständerjoch schliessen kann.

In Fig. 3 sind zwei Verstärker 33 und 34 angegeben, deren Ausgangsspannung zwischen den Sternpunkten S_6 und S_7 der Drehfeldsysteme 36 und 37 einerseits und dem Sternpunkt 0 der Stromversorgung 32 andererseits wirksam ist. Da der Sternpunkt der Stromversorgung in seiner symmetrischen Lage bei niedriger Netzreaktanz festliegt, verlagern die Steuerverstärker die Sternpunktpotentiale der Drehfeldsysteme und bewirken damit ganz entsprechende Steuerflüsse wie die Wicklungen 18 und 19 in Fig. 2. Die Eingänge der Verstärker 33 und 34 werden auch in gleicher Weise, wie zu Fig. 2 bereits beschrieben, mit Spannungen beaufschlagt, die sich aus den Sensorenspannungen ϵ_x und ϵ_y der Luftspaltsensoren nach der Multiplikation mit Spannungen, die dem Stromversorgungsteil, z.B. zwischen I und 0 einerseits und II und III andererseits zu entnehmen sind, und Faktoren $a \cos \omega_n t$ und $a \sin \omega_n t$ in der Weise ergeben, dass die Eingangsspannung u_{36} des Verstärkers 33 wird

$$u_{36} = u_{I,0} k \epsilon_x - u_{III,0} \frac{k}{\sqrt{3}} \epsilon_y = a (\epsilon_x \sin \omega_n t - \epsilon_y \cos \omega_n t) \quad \text{und}$$

entsprechend gilt für u_{37} des Verstärkers 34

$$u_{37} = u_{III,0} \frac{k}{\sqrt{3}} \epsilon_x + u_{I,0} k \epsilon_y = a (\epsilon_x \cos \omega_n t + \epsilon_y \sin \omega_n t)$$

wobei gilt:

$$u_{I+0} = u_0 \cos \omega_n t \quad \text{und} \quad u_{III} = u_0 \sqrt{3} \sin \omega_n t$$

Eine Variante zu der in Fig. 2 dargestellten Ausführungsform des Erfindungsgedankens zeigt Fig. 2b.

Angenommen wird dabei ein Zentrifugenrotor 12b von relativ grossem Aussendurchmesser D_b mit einem Lager- und Antriebsfortsatz kleineren Durchmessers d_b , der als Läufer für den erfindungsgemässen Ständer dient. Dieser Ständer mit den Blechpaketen 8b und 9b sowie der gemeinsamen Drehstromwicklung 16b ist nach dem in Fig. 2c dargestellten Wicklungsschema für eine Phase ausgeführt. Der Rückschlussjochring 10b weist noch einen zylindrischen Fortsatz 4b auf, der den grossen Durchmesser des Rotors umschliesst, so dass für den Steuerfluss zwischen Ständer und Rotor ein Luftspalt 13b entsteht, der einen viel kleineren magnetischen Widerstand hat als die aktiven Drehfeldluftspalte 14b und 15b und somit zu noch kleinerer Steuerleistung für die Lagerung führt als die Ausführung nach Fig. 2.

Die Steuerwicklung 18b in Fig. 2b entspricht in ihrer Funktion nicht direkt der Wicklung 18 der Fig. 2. Die Wirkung der Wicklung 18b entspricht der Differenz der Wicklungen 18 und 19 der Fig. 2 und die Wirkung der gestrichelt dargestellten Wicklung 19b der Summenwirkung dieser beiden Wicklungen 18 und 19. Die elektronische Schaltung ist trotzdem dieselbe, nur die resultierende Kraftrichtung ändert sich um 45° . Das wird durch die Winkellage der Sensoren berücksichtigt. Der Fortfall des Steuerflussluftspaltes (13 in Fig. 2) zwischen den

Drehfeldluftspalten in Fig. 2b ist für die Hystereseummagnetisierungsarbeit des Läufers von Vorteil. Diese Ummagnetisierungsarbeit wird bei gleichen Läuferabmessungen erhöht und damit auch das maximal erreichbare Antriebsmoment. Das ist der eine Vorteil der Ausführung nach Fig. 2b gegenüber derjenigen nach Fig. 2. Ein weiterer Vorteil besteht in der geringeren Ständerstreuung durch Anbringen der Drehfeldwicklungen in Nuten, die, wie auch sonst im Maschinenbau üblich, dicht am Luftspalt liegen, ein weiterer darin, dass die Drehfeldwicklung nur etwa dreiviertel soviel Kupfer für die Wickelköpfe 3c und 4c und die 90°-Versetzung 5c zwischen den Polringen 8c und 9c dieser als Abwicklung dargestellten Fig. 2c benötigt als die vier Wickelköpfe der beiden Drehstromwicklungen nach Fig. 2.

Schliesslich lässt sich auch noch die gestrichelt eingetragene Wicklung 19b in Fig. 2b einsparen, wenn man den einen Steuerverstärker 34 in Fig. 3 statt auf diese Wicklung auf den Sternpunkt der dann sechsphasig auszuführenden Wicklung 16b in Fig. 2b wirken lässt.

In an sich bekannter Weise kann ein solches aktives magnetisches Lager nicht nur zur Erzeugung einer Lagersteifigkeit benutzt werden mit einer der Exzentrizität proportionalen Rückstellkraft, sondern auch zur Dämpfung etwa angeregter Schwingungen um die Symmetrielage und zum Ausgleich von Kreiselkräften des Läufers, die Stellmomente erfordern in einer zur Exzentrizitätsebene senkrechten Richtung. Die entsprechenden Schaltungen der Sensoren vor dem Eingang in die Steuerverstärker

sind bei der erfindungsgemässen Ausführung die gleichen wie bei bekannten magnetischen Lagern mit getrenntem Antrieb.

Abschliessend sei noch auf den Vorteil des erfindungsgemässen Lagerantriebs hingewiesen, der sich gegenüber getrenntem Motor und magnetischem Lager ergibt, wenn diese aus konstruktiven Gründen dicht benachbart angeordnet werden müssen.

Der unvermeidbare Streufluss der Drehfelder ist dann nämlich auch im magnetischen Kreis des Lagers wirksam und stört dort. Ausserdem hat das magnetische Lager insbesondere bei hochwertigen Ausführungsformen einen bemerkenswerten permanentmagnetischen rotationssymmetrischen Vormagnetisierungs- und Streufluss, der sich dem Drehfeldsystem ungewollt mitteilt, und in der oben beschriebenen Weise eine mit dem Drehfeld umlaufende Störkraft erzeugt, die zu gefährlichen Rotorschwingungen Anlass geben kann.

Solche Störwirkungen sind bei dem erfindungsgemässen Kombinationslager vermieden, so dass grossere Betriebssicherheit erreicht wird.

Konzentrische Steuerspulen, wie in Fig. 1 und Fig. 2 dargestellt, kommen nur bei zweipoligen Maschinen infrage, allenfalls auch bei ungeradzahligen höheren Polpaarzahlen, hier jedoch mit ungünstigeren Kraftwirkungen. Für eine Polpaarzahl 2, also für vierpolige Maschinen, ist die Anordnung nach Fig. 3 besonders vorteilhaft, weil dann kein besonderer Steuerflussluftspalt (13 in Fig. 2) vorgesehen werden muss, da die Sternpunktverschiebung im Drehfeldsystem jeweils einander gegenüberliegende gleichnamige Pole oder Polpaare

einer Phase verstärken und schwächen kann, ohne einen Ausgleichfluss axial über den Läufer und einen Steuerflussluftspalt zu erfordern. Eine solche vierpolige Ausführung lässt daher auch höhere Steuerflussfrequenzen zu, da die Läuferlamellierung auch für den Steuerfluss dann überall parallel zur Flussrichtung verläuft.

Bei Hystereseläufern kommen insbesondere für schnellaufende Zentrifugen auch so geringe Wandstärken des Läuferzylinders infrage, dass sich die Frage der Läuferlamellierung gar nicht stellt, weil der Läufer selbst ein Einzelblech darstellt, das den Steuerfluss und den Drehfeldfluss sowohl tangential als auch axial mit hoher Frequenz führen kann. In diesem Falle sind zweipolige Maschinen angebracht, die geringeren Aufwand für die Stromversorgung und -verteilung bedingen, da bei gleicher Drehzahl nur die halbe Speisefrequenz wie bei vierpoligen Maschinen erzeugt werden muss.

Vorstehend wurde bereits darauf hingewiesen, dass ein Zusatzluftspalt 7 in Fig. 1 bzw. 13 und 13b in Fig. 2 und Fig. 2b sowie das dafür erforderliche Joch bei vierpoliger Ständerwicklung entfallen kann.

Es gibt jedoch eine zweipolige Drehfeldmaschine, bei der in einer der Fig. 3 entsprechenden Schaltung ebenfalls der Zusatzluftspalt entfallen kann.

Fig. 7 zeigt ein Ausführungsbeispiel dieser Art für ein zwei- bzw. vierphasiges Drehfeldsystem. Um einen ringförmigen Ständerjochring 71 werden die Wicklungsteile V_a ; V_b der Phase II sowie VI_a und VI_b der Phase I gewickelt. Der Läufer 72 bildet mit dem Ständerjochring einen Luftspalt, in dem die Wicklungen

wie gezeichnet direkt liegen. Man kann sie aber auch in den Nutlücken zwischen Zähnen hindurchführen, um einen geringeren Maschinenluftspalt zu erreichen. Diese übliche Bauform ist lediglich der leichteren Erkennbarkeit der erfindungsgemässen Schaltung wegen nicht dargestellt.

Die Wicklungsteile V_a und V_b werden in Parallelschaltung von der Phasenspannung II_+ und II_- gespeist ebenso VI_a und VI_b in Parallelschaltung von VI_+ und VI_- . Alle vier Wicklungsteile sind mit einer zum Sternpunkt St führenden Mittelanzapfung versehen. Ganz allgemein gilt, dass aufgrund der gegenseitigen Verkettung der Flüsse von Nachbarphasen die Mittelanzapfung der beiden parallel geschalteten Teilwicklungen einer Phase nicht gleiches Potential haben. Um trotzdem einen Motorsternpunkt zu bilden, ist es erforderlich, die beiden Mittelanzapfungen über eine Transformatorwicklung miteinander zu verbinden, in die vom Speisetransformatorher eine der Potentialdifferenz entsprechende Kompensationsspannung induziert wird. An Stelle einer Transformatorwicklung kann auch eine Saugdrossel verwendet werden. Der Mittelpunkt dieser Transformatorwicklung stellt dann den Motorsternpunkt St dar. Zwischen dem gemeinsamen Motorsternpunkt St und dem Sternpunkt O der Drehstromversorgung 74 wird auf den Verstärker 73 in der zu Fig. 3 beschriebenen Weise ein Steuerstrom eingespeist. Ein zweites um eine halbe Polteilung verdrehtes System kann gemäss Fig. 3 auch hier Anwendung finden, kann jedoch auch entfallen, wenn die mit doppelter Schlupffrequenz umlaufenden Störkräfte unerheblich sind.

Die Fig. 4 zeigt ein Ausführungsbeispiel für 4-polige Maschinen. Im Unterschied zu Fig. 3 sind nicht die Drehfeldpotentiale nach Art der Zeigerdiagramme sondern die räumliche Wirkrichtung für den erzeugten magnetischen Fluss der einzelnen Spulen zur Darstellung gebracht. Beim Stromdurchgang von aussen nach innen in den radial dargestellten Spulensymbolen entsteht gleich Polarität am entsprechenden Ständerpol. Einander gegenüberliegende Spulen sind, wie dargestellt, so in Reihe geschaltet, dass gleichnamige Pole entstehen, wie für vierpolige Maschinen erforderlich.

Jede der Phasen I und II arbeitet in jedem der beiden Drehfeldsysteme 64 und 74 auf zwei parallele Zweige von je zwei in Reihe geschalteten Spulen. Die Phasen I und II sind phasenmässig um 90° , räumlich um 45° gegeneinander versetzt. Die Drehfeldsysteme 64 und 74 sind, wie dargestellt, räumlich nur um 45° gegeneinander verdreht angeordnet. Im System 64 sind die Teilsternpunkte nur der Phase I als Mittelpunkte S_w und S_s je nur einer der beiden Reihenschaltungen von gegenüberliegenden Spulen für die Erzeugung der Stellkräfte durch die Regelverstärker 134 und 144 herausgeführt, und zwar S_w für die zeichnungsmässig waagerechten und S_s für die senkrecht wirkenden Kräfte. Im System 74 werden nur die Mittelpunkte S_w und S_s der Spulen-Reihenschaltungen der Phase II als Teilsternpunkte für die Stellkraftregelung herausgeführt und mit denen des Systems 64 sowie den Verstärkerausgängen von 134 für S_w und von 144 für S_s verbunden. Die Regelverstärker werden von den Produkten der Messwertspannungen der Sensoren und der Hilfsspannungen der Speisefrequenz angesteuert. Die Phasenlage der Hilfsspannung muss zwischen der der Phasen I und II liegen,

kann also z.B. zwischen I_+ und II_+ der Stromversorgung 124 entnommen werden. Diese Stromversorgung 124 dient ebenso wie die entsprechende 12 der Fig. 3 dazu, den Sternpunkt S für die $\pm$ Speisung mit I_+ ; I_- ; II_+ und II_- der Drehfeldsysteme 64 und 74 herzustellen, also praktisch auf Vierphasenspeisung überzugehen mit Hilfe von Mittelpunktanzapfung der Sekundärwicklung der beiden Transformatoren für Phase I und II im Stromversorgungsteil 124.

Da bei vierpoligen Maschinen die Speisefrequenz bereits das Doppelte der Synchron Drehfrequenz des Rotors ist, und da die Stellkraft je eines der beiden Drehfeldsysteme mit der doppelten Speisefrequenz durchmoduliert ist (zwischen Null und der doppelten der vom Sensor auszulösenden Stellkraft), ist die Ergänzung der Stellkraft eines Systems 64 durch ein zweites 74 mit im Gegentakt durchmodulierter Stellkraft für viele Anwendungsfälle nicht erforderlich.

Der Erfindungsgedanke kann dann, wie in Fig. 5 für den vierpoligen Motor dargestellt, vereinfacht ausgeführt werden. Hier wird nur für eine Phase (I) des speisenden Netzes ein Mittelpunktsternpunkt S und die Hilfsspannung für die Regelverstärker 135 und 145 dieser Phase I entnommen.

Um keine störende labile Stellkraft durch die nicht von Verstärkern zusätzlich angesteuerten Spulen der Phase II des Drehfeldsystems bei vorhandener Rotorexzentrität zu erhalten, ist es zweckmässig, die einander gegenüberliegenden Spulen dieser Phasen parallel zu schalten, wie in Fig. 5 dargestellt, so dass auch bei ungleichen Luftspalten von beiden Seiten des Rotors

gleiche magnetische Flüsse der ungesteuerten Phasen erzwungen werden. Die Schaltung nach Fig. 5 kann in entsprechender Weise auch für Drehströme ausgelegt werden, was für die nach Fig. 4 nicht ohne weiteres gilt. Beide sind auf vierpolige Maschinen bezogen.

In beiden Schaltungen (Fig. 4 und Fig. 5) sind nur die Teilsternpunkte von je zwei einander gegenüberliegenden Wicklungen eines oder beider Drehfeldsysteme an die Verstärkerausgänge angeschlossen, und die Verstärkereingänge werden jeweils nur mit dem Produkt der Sensorenspannung einer der Tastrichtungen x oder y mit der Hilfsspannung einer Phase, die in der gleichen Richtung wirkt, angesteuert. Das hat den Vorteil, dass mit jedem Drehfeldsystem mittlere Stellkräfte in jeder Richtung erzeugt werden können, so dass auch unter Verzicht auf die Glättung der Stellkräfte auf Einzelsysteme wie in Fig. 1 und Fig. 5 übergegangen werden kann.

Die Aussteuerung nur von Teilsternpunkten hat jedoch den Nachteil, dass die erzeugten Steuerströme, die die Verstärker bei dem induktiven Widerstand der Wicklungen aussteuern müssen, nicht nur die Differenzfrequenz von Speisefrequenz und gleichsinniger Umlauffrequenz einer durch Unwucht bedingten Exzentrizität führen (wie das zu Fig. 3 beschrieben wurde) sondern auch die Summenfrequenz mit gleicher Amplitude. Eine erfindungsgemäße magnetische Lagerung von überkritisch laufenden Rotoren, bei der beim Durchlauf der kritischen Drehzahl während des Hochlaufes starke synchrone, mit dem Rotor umlaufende Stellkräfte erzeugt werden müssen, für die das Lager vorzugsweise dimensioniert werden muss, wird daher besser

in einer Schaltung nach Fig. 3 ausgelegt als in einer solchen nach Fig. 4 oder 5, weil bei den letztgenannten viel höhere Steuerstromfrequenzen vorkommen, die wesentlich höhere Scheinleistungen der Ausgangsverstärker erforderlich machen als bei der vorgenannten Ausführung nach Fig. 3.

Auch bei vierpoligen Motoren wie in Fig. 4 ist eine Beschaltung mit vollständigen Sternpunkten aller Phasen wie in Fig. 3 für den Steuerstromkreis möglich, wenn auch hier die Verstärkereingangsspannung aus der Summe der Produkte beider Sensorenspannungen von $k\varepsilon_x$ und $k\varepsilon_y$ mit den beiden Hilfsspannungsphasen $u_0 \cos \omega_n t$ und $u_0 \sin \omega_n t$

gebildet werden. Die erforderliche Ausgangsscheinleistung der Verstärker kann dadurch auch für vierpolige Maschinen bei überkritisch laufenden Rotoren drastisch verringert werden.

Man kann aber auch bei einer zweipoligen Maschine ein vierpoliges Steuerfeld überlagern, wenn man nach Fig. 6 die beiden Teilsternpunkte S_w und S_s wie in Fig. 5 mit einem Gegentaktverstärker 136 so aussteuert, dass ihre Potentialverschiebung gegen den Sternpunkt S der Stromversorgung stets von gleicher Amplitude aber entgegengesetztem Vorzeichen ist. Der Eingang des bei dieser Schaltung einzigen Verstärkers 136 wird, wie zu Fig. 3 beschrieben, mit der Summe der Produkte der Sensorenspannungen mit den beiden 90° unterschiedlichen Phasenkomponenten der Speisespannung angesteuert.

Die Erfindung lässt sich jedoch auch so verwirklichen, dass die Drehfeldwicklung mit nur einseitig vom Läufer liegenden

Windungen in jeder Phase gewickelt und mit zwei- bzw. dreiphasigem Netz gespeist wird.

23 S. Beschreibung
17 Patentansprüche
4 Bl. Zeichnungen

Licentia Patent-Verwaltungs GmbH
6 Frankfurt a.M., Theodor Stern Kai 1

Lehmann/li

B I 73/57

P a t e n t a n s p r ü c h e

- 1.) Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb,
bestehend aus Ständer und Rotor mit einem von Sensoren
überwachten Luftspalt, dadurch gekennzeichnet, dass dem
von Ständerwicklungen durch Speisung mit Drehstrom er-
zeugten Drehfeld ein Steuerfeld überlagert wird, das von
Wicklungen im Ständer durch die Ausgangsströme von Ver-
stärkern erzeugt wird, die ihrerseits mit Spannungen aus-
gesteuert werden, die dem Produkt der von den Sensoren
gelieferten, der Abweichung des Luftspaltes vom Sollwert
entsprechenden, Spannungen und von Hilfsspannungen propor-
tional gemacht werden, die die Frequenz des das Drehfeld
speisenden Netzes haben.
- 2.) Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb
nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Drehfeld
zweipolig ist und dass der magnetische Fluss des Steuer-
feldes von einer konzentrischen Steuerspule erzeugt wird

. 25 .

und sich über den Rotor sowie über einen weiteren Ringpol und ein nicht genutztes Rückschlussjoch zum Jochring des Ständers hin schliesst.

- 3.) Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Fluss des Steuerfeldes durch einen Strom erzeugt wird, der einem Sternpunkt der Drehstromwicklung zugeführt wird, die dem Drehantrieb dient und sich über den Sternpunkt des Stromversorgungsnetzes für diesen Drehantrieb schliesst.
- 4.) Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb nach Anspruch 2 und 3, dadurch gekennzeichnet, dass bei Drehfeldsystemen mit der Polpaarzahl 1 ein zusätzlicher Ringpol angebracht wird.
- 5.) Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb nach Anspruch 1, 3 und 4, dadurch gekennzeichnet, dass zwei Drehfeldstände mit um eine halbe Polteilung gegeneinander verdrehten Drehfeldwicklungen vorgesehen werden, deren getrennte Sternpunkte von zwei Verstärkern mit Steuerströmen angesteuert werden, deren Eingangsspannungen u_a und u_b von den Spannungen der Sensoren in x-Richtung $k\varepsilon_x$ und y-Richtung $k\varepsilon_y$ sowie von Hilfsspannungen von der Kreisfrequenz ω_n des Drehstromspeisenetzes $u_1 = u_0 \cos \omega_n t$ und $u_2 = u_0 \sin \omega_n t$ über Multiplikations- und Summenschaltungen so gesteuert werden, dass $u_a = k\varepsilon_x \cdot u_1 + k\varepsilon_y u_2$ und $u_b = k\varepsilon_x u_2 - k\varepsilon_y u_1$ wird.

.26.

- 6.) Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass zwei Drehfeldsysteme mit um eine halbe Polteilung gegeneinander verdrehten Drehfeldwicklungen in Ständern vorgesehen werden, zwischen denen ein Ringpol mit den Rückschluss-Jochringen der beiden Ständerkerne magnetisch verbunden angeordnet ist sowie zwei konzentrischen Steuerwicklungen je zwischen einen der beiden Ständerkerne und dem Ringpol in der Mitte, und dass diese Steuerspulen von Verstärkern angesteuert werden, deren Eingangsspannungen u_a und u_b von den Spannungen der Sensoren in x-Richtung $k\varepsilon_x$ und y-Richtung $k\varepsilon_y$ sowie von Hilfsspannungen von der Kreisfrequenz ω_n des Drehstromspeisenetzes $u_1 = u_0 \cos \omega_n t$ und $u_2 = u_0 \sin \omega_n t$ über Multiplikations- und Summenschaltungen so gesteuert werden, dass $u_a = k\varepsilon_x u_1 + k\varepsilon_y u_2$ und $u_b = k\varepsilon_x u_2 - k\varepsilon_y u_1$ wird.
- 7.) Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb nach Anspruch 1, 2 und 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Ringpol ausserhalb der beiden Rückschluss-Jochringe vorgesehen wird und eine Steuerspule zwischen den Ständerkernen und eine zweite zwischen Ringpol und benachbartem Ständerkern angeordnet wird.
- 8.) Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb nach Anspruch 5 und 6, dadurch gekennzeichnet, dass nur eine Drehfeldwicklung mit zwei Ständerblechpaketen vorgesehen ist, deren Verdrehung um eine halbe Polteilung

- 4 -

- 27 -

gegeneinander von den Nutleitern der Drehfeldwicklung zwischen den beiden Ständerblechpaketen überbrückt wird, und dass nur eine konzentrische Steuerspule zwischen den Ständerblechpaketen vorgesehen ist, wobei der eine von zwei Verstärkern den Stern-punkt und der andere Verstärker die Steuerspule speist.

- 9.) Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb nach Anspruch 1 - 8, dadurch gekennzeichnet, dass das Drehfeld mit vierphasigem oder sechsphasigem Stromversorgungsnetz gespeist wird, das z.B. über Transformatoren aus zweiphasigem bzw. dreiphasigem Netz erzeugt wird.
- 10.) Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb nach Anspruch 1 - 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Drehfeldwicklung mit nur einseitig vom Läufer liegenden Windungen in jeder Phase gewickelt und mit zwei- bzw. dreiphasigem Netz gespeist wird.
- 11.) Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zwei vierpolige zweiphasige Drehfeldsysteme in zwei genuteten Ständerringen vorgesehen sind, die räumlich um 45° gegeneinander versetzt sind und dass Teilsternpunkte von nur je zwei einander gegenüberliegenden Spulen gebildet werden, und zwar von den beiden Spulenpaaren der einen Phase des einen Drehfeldsystems und den beiden Spulenpaaren der anderen Phase des zweiten Drehfeldsystems, und dass die Teilsternpunkte der jeweils parallelen Spulenpaare beider Drehfeldsysteme miteinander und mit den von luftspaltüberwachenden Sensoren angesteuerten Verstärkern verbunden sind.

. 18.

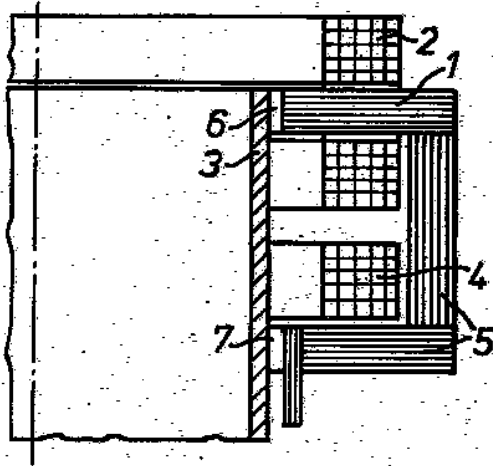
- 12.) Anordnung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Teilsternpunkte des einen Drehfeldsystems an zwei von den luftspaltüberwachenden Sensoren ausgesteuerten Verstärkern angeschlossen sind, die von dem Produkt der Sensorenspannungen und einer Hilfsspannung der diesen Sternpunkten zugeordneten Phase angesteuert werden und die Teilsternpunkte des anderen Drehfeldsystems entsprechend über zwei weitere Verstärker von der anderen Phase als Hilfsspannung angesteuert werden.
- 13.) Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein vierpoliges Drehfeldsystem vorgesehen ist, dass zwei Teilsternpunkte von je zwei einander gegenüberliegenden Spulen einer Phase gebildet werden und dass diese Teilsternpunkte von den luftspaltüberwachenden Sensoren nach Multiplikation mit Hilfsspannungen von 180° Phasenverschiebung über Verstärker angesteuert werden.
- 14.) Anordnung nach Anspruch 12 und 13, dadurch gekennzeichnet, dass die einander gegenüberliegenden Spulen der anderen Phase oder bei Drehstromspeisung der anderen beiden Phasen, die keine Teilsternpunkte bilden, parallelgeschaltet werden.
- 15.) Anordnung nach Anspruch 1, 3, 5 und 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Drehfeldwicklung um das Rückschlussjoch des Ständers herumgewickelt wird, wobei jede Phase mit parallel geschalteten Hälften der Wicklung auf den beiden einander gegenüberliegenden Rückschlussjochab-

. 29 .

schnitten gewickelt wird, und dass die Mittelpunkte dieser Teilwicklungen in einem Sternpunkt verbunden werden.

- 16.) Anordnung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen die Mittelpunkte der Teilwicklung einer Phase und den Sternpunkt des Motors Hilfsspannungen eingespeist werden.
- 17.) Anordnung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Hilfsspannung die von Verkettungsflüssen mit den Nachbarphasen induzierten Spannungen kompensiert.

FIG. 1



33.

FIG. 2

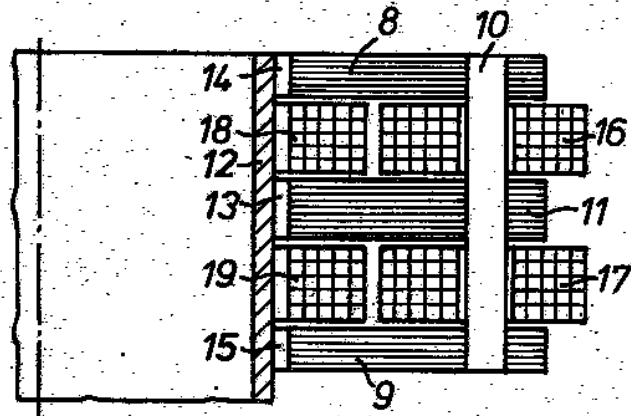
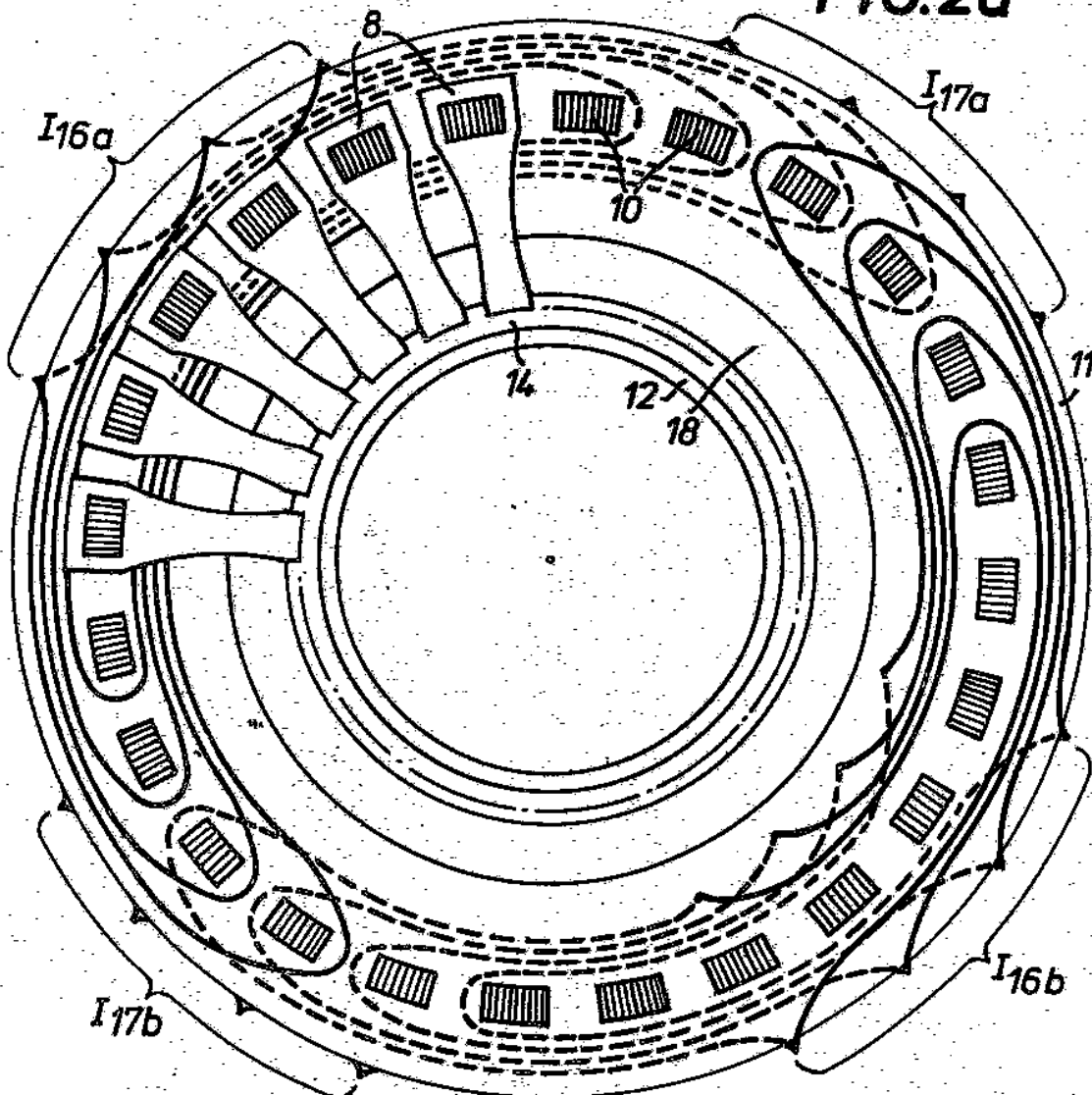


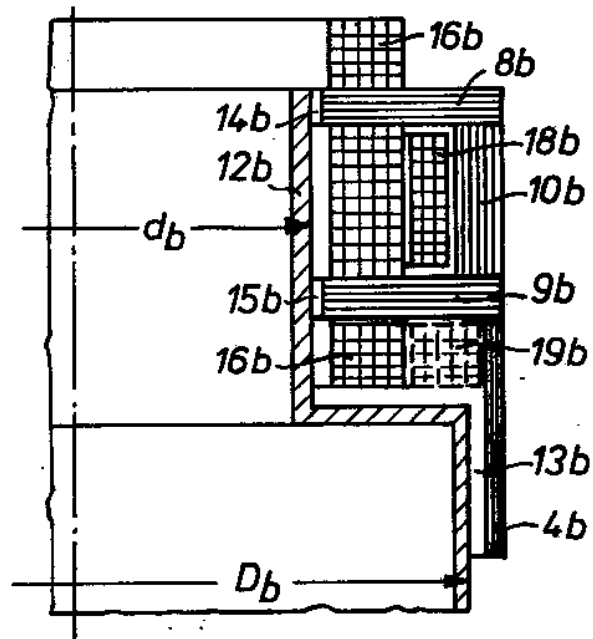
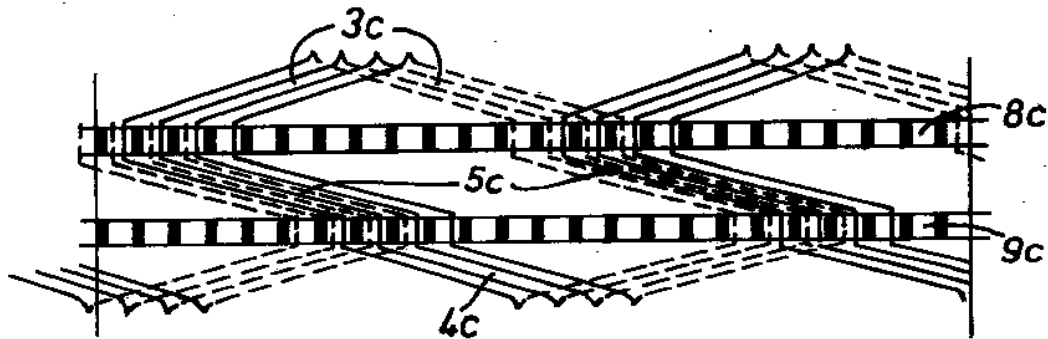
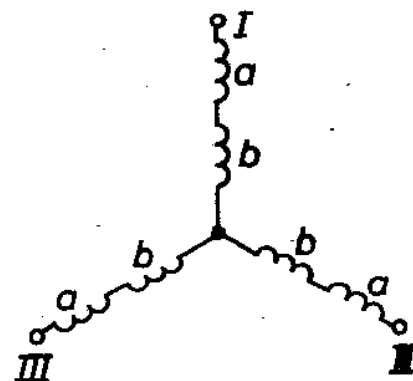
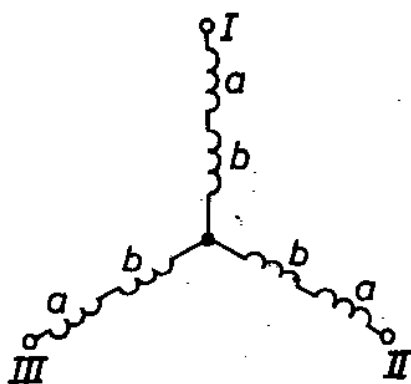
FIG. 2a



509822/0488

2114 8-16 AT:20.11.1973 OT:28.05.1975 ht

•30•

FIG. 2b**FIG. 2c****FIG. 3a**

34.

FIG. 3

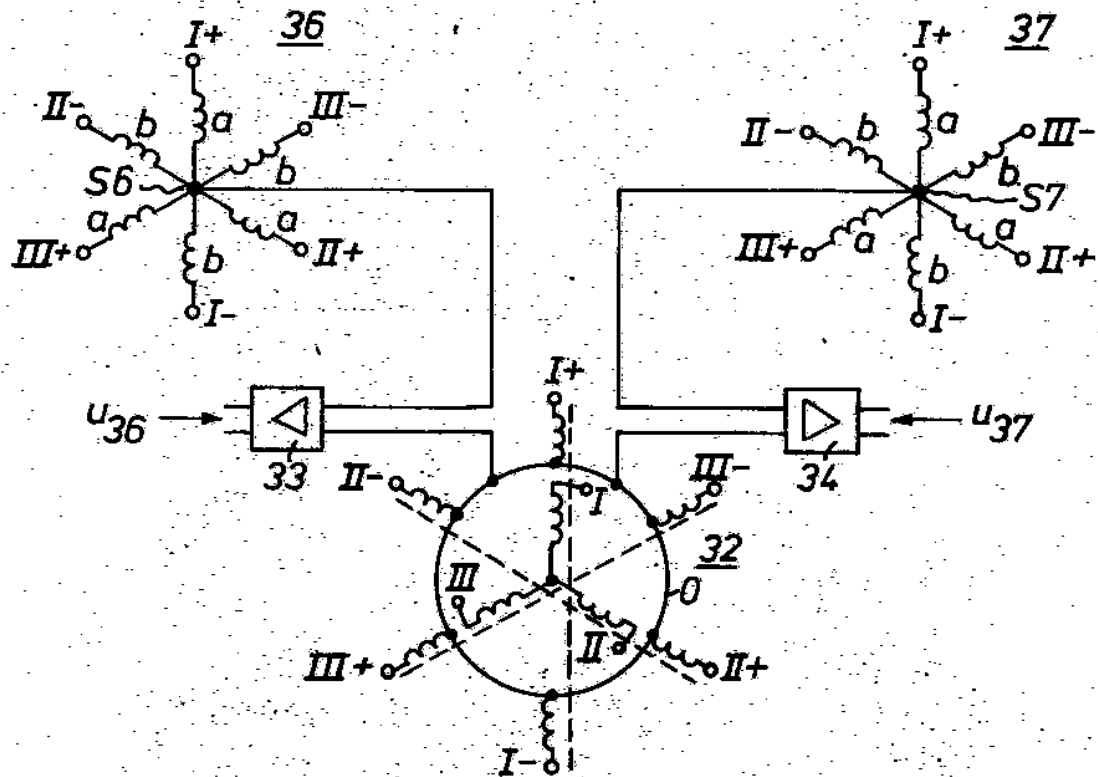
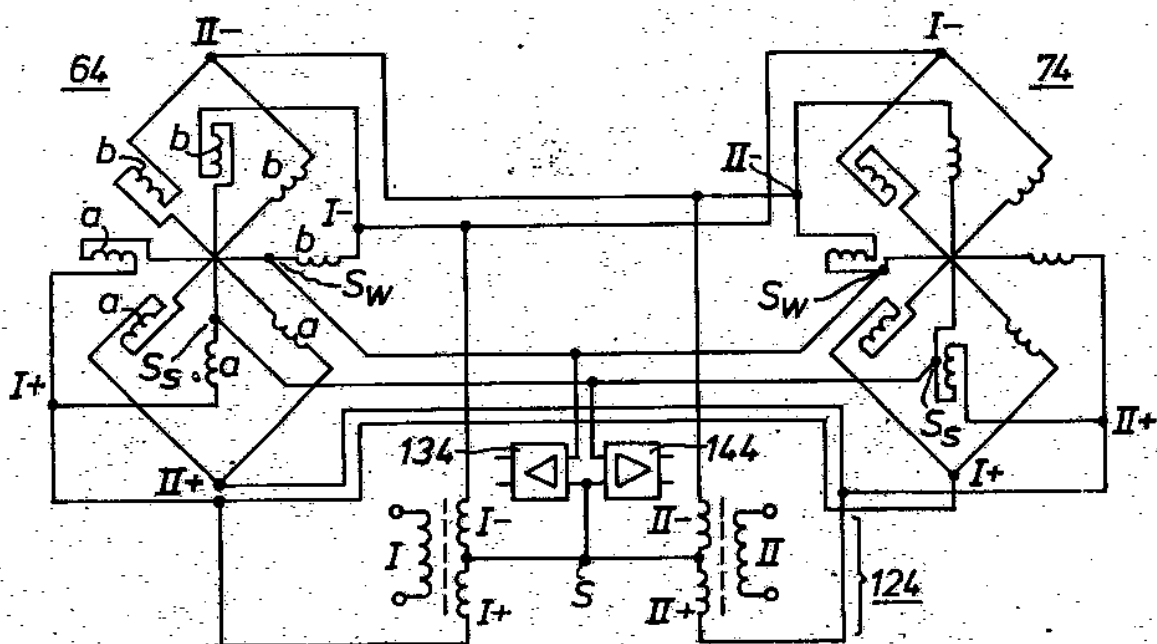


FIG. 4



• 32.

FIG. 5

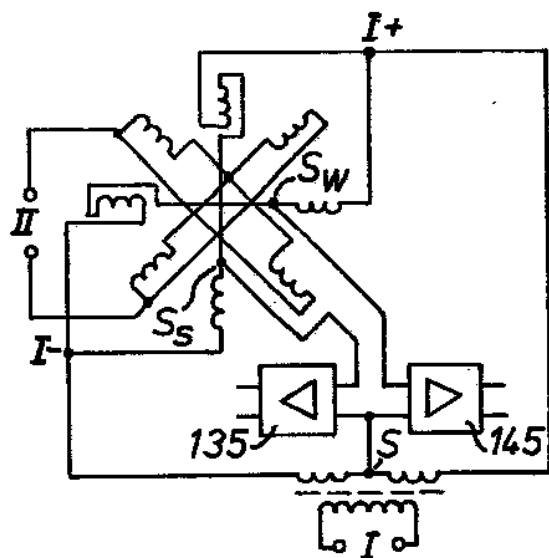


FIG. 6

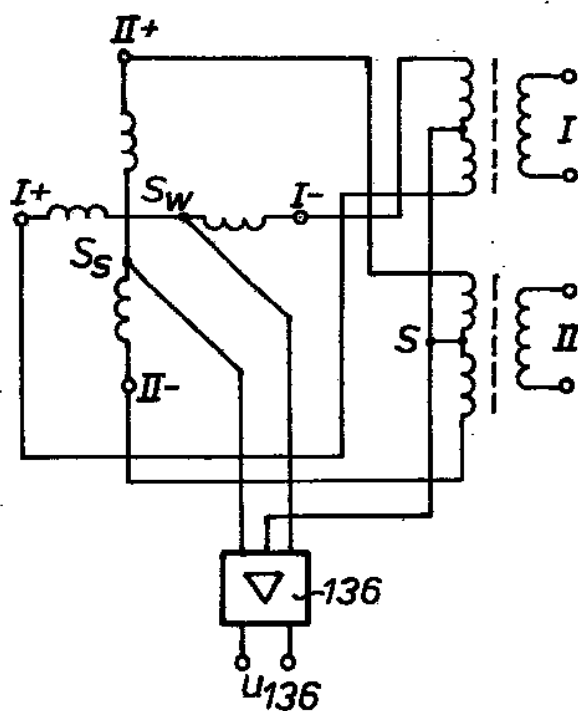


FIG. 7

