

51

Int. Cl. 2:

H 02 K 5/16

19 **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**

F 16 C 32/04

DEUTSCHES



PATENTAMT

DE 26 56 469 A 1

11

Offenlegungsschrift 26 56 469

21

Aktenzeichen:

P 26 56 469.2

22

Anmeldetag:

9. 12. 76

43

Offenlegungstag:

15. 6. 78

31

Unionspriorität:

22 23 31

54

Bezeichnung:

Radiales aktives magnetisches Lager

61

Zusatz zu:

P 24 57 084.1

71

Anmelder:

Licentia Patent-Verwaltungs-GmbH, 6000 Frankfurt

72

Erfinder:

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

DE 26 56 469 A 1

Licentia Patent-Verwaltungs-G.m.b.H.
Frankfurt/Main, Theodor-Stern-Kai 1

PASS Lehmann/si
19.11.76

BI 76/111

P a t e n t a n s p r ü c h e :

1. Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb, bestehend aus der Kombination eines oder mehrerer Ständer und einem Rotor mit einem von Sensoren überwachten Luftspalt, wobei jeweils dem von der Ständerwicklung durch Speisung mit Drehstrom erzeugten Antriebsdrehfeld ein Steuerdrehfeld überlagert ist, derart, daß einem n-polpaarigen Antriebsdrehfeld ein $n \pm 1$ polpaariges über Sensoren moduliertes Steuerdrehfeld überlagert ist, nach Patent (Patentanmeldung P 24 06 790), und daß eine in die als Sensoren wirkenden Steuerdrehfeldwicklungen induzierte, von einer Exzentrizität des Rotors abhängige Spannung den Strom der Steuerdrehfeldwicklungen stellt, nach Patent (Patentanmeldung P 24 57 084, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß dem Antriebsstrom mit Antriebsspannungsfrequenz in der Antriebswicklung ein Sensorstrom mit höherer Trägerfrequenz überlagert wird.
2. Anordnung nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß die in der als Sensor wirkende Steuerdrehfeldwicklung bei vorhandener Exzentrizität induzierte Spannung von Antriebsfrequenz durch Filter unterdrückt wird.
3. Anordnung nach Anspruch 1 und 2, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß die in der Steuerdrehfeldwicklung bei vorhandener Exzentrizität durch Sensorträgerfrequenz

809824/0429

induzierte Spannung in einem Demodulator um den Betrag der Trägerfrequenz verringert wird.

4. Anordnung nach Anspruch 3, d a d u r c h g e k e n n -
z e i c h n e t, daß die der Exzentrizität nach Größe
und Frequenz entsprechende Spannung differenziert wird.
5. Anordnung nach Anspruch 3 und 4, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t, daß eine Summe aus einer der
Exzentrizität proportionalen Spannung und einer dem
zeitlichen Differentialquotient proportionalen Spannung
gebildet wird.
6. Anordnung nach Anspruch 5, d a d u r c h g e k e n n -
z e i c h n e t, daß die gebildete Summenspannung in
einem Modulator um die Antriebsfrequenz erhöht wird.
7. Anordnung nach Anspruch 6, d a d u r c h g e k e n n -
z e i c h n e t, daß die um Antriebsfrequenz erhöhte
Summenspannung über einen Phasenschieber und einem Ver-
stärker den Stellstrom der Steuerdrehfeldwicklung erzeugt.

Licentia Patent-Verwaltungs-G.m.b.H.
Frankfurt/Main, Theodor-Stern-Kai 1

Pass Lehmann/si

Erf.-Nr. B 76/111

Radiales aktives magnetisches Lager

Die Erfindung bezieht sich auf ein radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb, bestehend aus der Kombination eines oder mehrerer Ständer und einem Rotor mit einem von Sensoren überwachten Luftspalt, wobei jeweils dem von der Ständerwicklung durch Speisung mit Drehstrom erzeugten Antriebsdrehfeld ein Steuerdrehfeld überlagert ist, derart, daß einem n -polpaarigen Antriebsdrehfeld ein $n+1$ -polpaariges über Sensoren modulierte Steuerdrehfeld überlagert ist, nach Patent (Patentanmeldung P 24 06 790), und daß eine in die als Sensoren wirkenden Steuerdrehfeldwicklungen induzierte von einer Exzentrizität des Rotors abhängige Spannung den Strom der Steuerdrehfeldwicklungen stellt, nach Patent (Patentanmeldung P 24 57 084).

Eine vorstehend beschriebene Anordnung wird dadurch weitergebildet, daß dem Antriebsstrom mit Antriebsspannungsfrequenz in der Antriebswicklung ein Sensorstrom mit höherer

Trägerfrequenz überlagert wird.

Es wurde also bisher die Steuerdrehfeldwicklung sowohl als Sensorwicklung als auch als Stellglied für den Regelkreis zur Erzeugung der radialen Lagerkräfte verwendet, wobei die Speisefrequenz der Antriebswicklung als Trägerfrequenz für diesen Regelkreis dient unter Verwendung des Antriebsfelds selbst zur Erzeugung der Sensorspannung in der Steuerwicklung.

In der Ausführung von Antriebslagern nach dieser Art haben sich befriedigende Lagerstellkräfte nur im Bereich von Frequenzen ergeben, die klein sind im Vergleich mit der als Trägerfrequenz des Regelkreises verwendete Antriebs-Speise-spannungsfrequenz.

Dem weiterbildenden Erfindungsgedanken entsprechend wird unter Beibehaltung der Merkmale für Antriebs- und Steuerdrehfeldwicklungen sowie der Verwendung der Steuerdrehfeldwicklung als Sensor und Stellgliedorgan im Regelkreis eine Trägerfrequenz f_t eingeführt, die höher ist als die Speisefrequenz f der Antriebsquelle. Die Trägerfrequenzspannung wird in einem Generator oder in einem Umrichter erzeugt und zu einer Modulation der Antriebsströme in der Antriebswicklung vorzugsweise durch induktive Einkopplung verwendet. Die Modulation erfolgt mit so geringer Amplitude, daß das Antriebsdrehmoment dadurch nur unwesentlich verändert wird.

In der Steuerwicklung wird je nach Größe und Richtung einer Exzentrizität des Rotors gegen den Ständer eine Spannung induziert, die den Strömen der Antriebswicklung und dem Betrag der Exzentrizität e proportional ist und deren Phasenlage in Bezug auf die Stromkomponente gleicher Frequenz der Antriebswicklung durch die Richtung der Exzentrizität bestimmt wird.

Dem Erfindungsgedanken entsprechend werden aus den in den Phasen der Steuerwicklung induzierten Sensorspannungen die von der Speisefrequenzkomponente der Antriebsströme bedingten Spannungskomponenten ausgesiebt, was ohne störende Phasenwinkelbeeinflussung der mit Trägerfrequenz f_t induzierten Sensor-Spannungskomponenten wegen des großen Frequenzunterschieds $f \ll f_t$ leicht möglich ist. Die wirksamen Sensor-Spannungskomponenten werden in einer besonderen multiplikativen Demodulatorschaltung mit f_t frequenztransformiert. Das heißt, daß die Drehfeld-Spannungskomponenten der beiden Phasenausgänge der Demodulatorschaltung von der Frequenz f_t bei zweiphasiger Steuerdrehfeldwicklung auf die Frequenz Null transformiert werden. Bei fester Exzentrizität handelt es sich also um

Gleichspannungskomponenten, die den Komponenten der Exzentrizität des Rotors in zwei zueinander (und zur Drehachse) senkrechten Richtungen bezogen auf den Ständer proportional sind.

Den zeitlichen Änderungen der Exzentrizität entsprechend, die gedämpft ausgeregelt werden sollen, werden die Meßwerte, kombiniert mit den in Differentiationsgliedern ermittelten Differentialquotienten, über Verstärker und eine Modulationsschaltung, die eine Frequenztransformation auf die Speisefrequenz der Antriebswicklung bewirkt, den Phasenwicklungen der Steuerwicklung zugeführt. In Kombination mit dem mit gleicher Frequenz umlaufenden Antriebsdrehfeld bewirken die so ausgesteuerten Ströme der Steuerwicklungen die Stellkräfte, die den Rotor gut gedämpft zentrieren.

Der Vorteil der neuen Anordnung besteht darin, daß stabilisierende Lagerkräfte mit höheren Frequenzen erzeugt werden können. Die Grenzfrequenz der noch zu stabilisierenden Lagerschwingungen ist im Verhältnis $f_t : f$ gesteigert. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß die Steuerströme wegen der im Demodulator vorgenommenen Frequenztransformation keine rückkoppelnde Wirkung auf die Sensorspannung ausüben, deren niedriger Frequenzanteil durch Siebmittel vom Verstärker ferngehalten wird. Daher kann auch die Regelsteilheit erhöht werden.

Anhand einer Zeichnung sei ein schematisches Ausführungsbeispiel beschrieben.

In Fig. 1 ist jede Phase einer zweipoligen zweiphasigen Antriebswicklung I und II des Ständers 1 eines Antriebslagers schematisch dargestellt. Der Rotor 2 kann als Induktionsläufer mit Käfig oder Läuferwicklung ausgeführt sein, er kann aber auch als Hystereseläufer oder als Reluktanzläufer sowie permanentmagnetischer Läufer eines Synchronmotors gestaltet sein. Im Ständer 1 ist weiterhin eine vierpolige zweiphasige Steuerwicklung bestehend aus

Je vier in Reihe geschalteten Wicklungsabschnitten w_{st} für die beiden Phasensysteme I_{st} und II_{st} mit den Anschlußklemmen 3 und 4 für I_{st} sowie 5 und 6 für II_{st} . Die Anschlußklemmen der Antriebsdrehfeldwicklung sind entsprechend mit 7; 8; 9 und 10 bezeichnet. Die Antriebswicklung wird von einem zweiphasigen Netz 11 gespeist. In den Stromkreisen beider Phasen sind zum Einkoppeln der Trägerfrequenz-Erregerströme die Wandler 12, die primär von dem Trägerfrequenzgenerator 24 gespeist werden, in Reihe geschaltet. Die Steuerspannungswicklung I_{st} und II_{st} ist, wie es die Fig. 2 zeigt, mit dem Eingang des Hochpasses 18, dieser mit dem Demodulator 19 und dieser über den Differentiator 21 mit dem Zweikanalverstärker 20 verbunden. Auf diesen folgt der Modulator 22 zur Transformation auf f und ein Endverstärker 23. Die Klemmenbezeichnungen am Ausgang dieses Verstärkers stimmen mit denen der Steuerwicklung überein, mit denen sie verbunden sind. Als Trägerfrequenzgenerator dient der zweiphasige Frequenzvervielfacher 24, der von dem zweiphasigen Netz 11 gespeist wird (Klemmen 7; 8; 9; 10). Die erzeugte Trägerfrequenzspannung (Klemmen 25; 26; 27 und 28) wird den Wandlern 12 in beiden Phasen zugeführt sowie dem Demodulator 19.

Fig. 3 zeigt Einzelheiten der beispielweisen Schaltung der Funktionselemente nach Fig. 1. Der Demodulator 19, als Einzelzeichnung aus Fig. 2, enthält zwei Elektromagnete E_1 und E_2 , die mit den Phasenspannungen des Trägerfrequenzgenerators der Frequenz f_t erregt werden (Anschlußklemmen 25 bis 28), und in deren Luftspalten je zwei Hallgeneratoren untergebracht sind, die je zwei Anschlußklemmen i und zwei Anschlußklemmen h haben, an denen die erzeugte Hallspannung entnommen wird. Jede Steuerwicklungsphase ist über einen Hochpaß 18 (Fig. 1) und über einen Isoliertransformator 31 (Fig. 3 Anschlußklemmen 40 bis 43) mit den Stromanschlußklemmen i von je einem Hallgenerator in den beiden Magneten in der in Fig. 3 dargestellten Weise verbunden. Je zwei Hallspannungen in unterschiedlichen Magneten und mit unterschiedlichen Stromphasen sind in der dargestellten Weise in Reihe geschaltet. Die an diesen Reihenschaltungen

mit den Ausgangsklemmen 44 bis 47 auftretenden Spannungen sind bei fester Exzentrizität Gleichspannungen, und zwar Meßwerte für die Exzentrizität in zwei senkrechten Komponentenrichtungen bezogen auf den Ständer. Der anschließende Differentiator 21 (Fig. 2') enthält je ein R-C-Glied in beiden Phasen, das mit einem Potentiometer einstellbar ist, um je nach erforderlicher Dämpfung dem Exzentrizitätsmeßwert eine Spannung hinzuzufügen, die der zeitlichen Änderung der Exzentrizität proportional ist. Die so ergänzten Meßwertspannungen werden mit Verstärker 20 verstärkt und dem Modulator 22 (Fig. 1 und 4) zugeführt, der die Transformation auf ein Drehfeldsystem der Frequenz f in entsprechender Weise wie der beschriebene Demodulator 19 vornimmt, jedoch mit vertauschter Funktion von Magnetstrom und Hallgeneratorstrom. Dieser Modulator enthält, wie es Fig. 4 zeigt, zwei Magnete E_3 und E_4 (Fig. 4), die mit den verstärkten Meßwertströmen (Klemmen 50 bis 53) erregt werden. In den Luftspalten sind vier Hallgeneratoren untergebracht, deren Stromanschlußklemmen i mit Strömen gespeist werden, die über Phasenschieber 29 und Trenntrafos 30 vom Speisenetz der Frequenz f (Anschlußklemmen 7 bis 10) erzeugt werden und deren in entsprechender Weise paarweise in Reihe geschaltete Hallspannungen (Anschlußklemmen 54 bis 57) über Endverstärker 23 (Fig. 2) zur Speisung der Steuerwicklung (Anschlußklemmen 3 bis 6) mit den Stellströmen dienen, die ein Drehfeld erzeugen, das in Verbindung mit dem Antriebsdrehfeld, das die gleiche Speisefrequenz und den gleichen Umlaufdrehsinn aber die doppelte Umlaufgeschwindigkeit wegen halber Polpaarzahl hat, eine radiale Stellkraft bewirkt, die den Rotor in seinen Schwingungen dämpft und zentriert.

Die Wirkungsweise wird anhand von Funktionsgleichungen für die Zeitfunktion der einzelnen Spannungen näher erläutert:

Die Phasenspannungen der Antriebsspannungen seien:

$u_I = U \sin(2\pi f t)$ und $u_{II} = U \cos(2\pi f t)$. Die des Trägerfrequenzgenerators:

$$u_{tI} = U_t \sin(2\pi f_t t) \text{ und } u_{tII} = U_t \cos(2\pi f_t t).$$

Durch die Einkopplung der Trägerfrequenz in die Antriebswicklung ergibt sich für die Antriebsströme:

$$i_I = -I \cos(2\pi f t) - I_t \cos(2\pi f_t t) \text{ und}$$

$$i_{II} = I \sin(2\pi f t) + I_t \sin(2\pi f_t t).$$

Bei einer Exzentrizität e mit den Komponenten $e \cos B$ in Phasenrichtung I und $e \sin B$ in Phasenrichtung II entstehen in den Phasen der Steuerwicklung I (Anschlußklemmen 3, 4) und II (Anschlußklemmen 5, 6) die Spannungen:

$$u_{stI} = k_1 e \sin(2\pi f t + B) + k_2 e \sin(2\pi f_t t + B) \text{ und}$$

$$u_{stII} = k_1 e \cos(2\pi f t + B) + k_2 e \cos(2\pi f_t t + B).$$

Die Luftspaltinduktion in den Demodulationsmagneten hat den Verlauf:

$$B_I = -B_0 \cos(2\pi f_t t) \text{ und } B_{II} = +B_0 \sin(2\pi f_t t).$$

Die Hallspannungen ergeben sich aus dem Produkt von B und dem Strom i im Hallgenerator. Dieser enthält wegen des Hochpasses nur die Komponenten, die durch den zweiten Summanden der Gleichungen für u_{st} bewirkt werden:

$$i_{hI} = k_3 e \sin(2\pi f_t t + B) \text{ und } i_{hII} = k_3 e \cos(2\pi f_t t + B).$$

Die Reihenschaltungen der Hallspannungen werden so durchgeführt, daß

$$u_{hI} = k_4 e (\cos(2\pi f_t t + B) \cos(2\pi f_t t) + \sin(2\pi f_t t + B) \sin(2\pi f_t t))$$

wird (Anschlußklemmen 44, 45).

Somit wird $u_{hI} = k_4 e \cos B$. Ferner wird u_{hII} : (Anschlußklemmen 46, 47)

$$u_{hII} = k_4 e (\sin(2\pi f_t t + B) \cos(2\pi f_t t) - \cos(2\pi f_t t + B) \sin(2\pi f_t t))$$

809824/0429

somit wird $u_{hII} = k_4 e \sin \beta$.

Sei die Lagerregelung in einer festen Richtung β die zu lösende Regelungsaufgabe, so müssen bei konstantem β elastisch rückstellende und dämpfende Stellkräfte in dieser Richtung β auf den Rotor ausgeübt werden, um ihn optimal zu zentrieren. Wenn mit der Zustellung auf Mitte allerdings auch eine Kippung der Rotorachse verbunden ist, so muß wegen der Kreiselkräfte des umlaufenden Rotors die Rückstellkraft mit der Richtung β der Exzentrizität einen Winkel β_k bilden, um optimal zu lagern. Beides ist nach dem Erfindungsgedanken durchführbar. Als Steuermeßwert dienen die um einen differenzierten Anteil ergänzten Meßwerte u_{hI} und u_{hII} . Diese werden verstärkt und prägen den Modulatormagneten E_3 und E_4 (Fig. 2) ihnen proportionale Erregströme auf, dadurch wird:

$$B_{mI} = (k_5 e + k e') \cos \beta \text{ und } B_{mII} = (k_5 e + k_6 e') \sin \beta.$$

Die Hallgeneratorströme i werden vom Speisenetz (Anschlußklemmen 7 bis 10) über Phasenschieber-Brückenschaltungen 29 und Isoliertransformatoren 30 gespeist. Sie betragen:

$$i_{mI} = i_0 \cos(2\pi f t + \beta_0) \text{ und } i_{mII} = i_0 \sin(2\pi f t + \beta_0).$$

Die Reihenschaltung der Hallspannungen, die in ähnlicher Weise wie beim Demodulator erfolgt, ergibt: (Anschlußklemmen 54, 55)

$$u_{mI} = (k_7 e + k_8 e') (\cos(2\pi f t + \beta_0) \cos \beta - \sin(2\pi f t + \beta_0) \sin \beta)$$

somit wird

$$u_{mI} = (k_7 e + k_8 e') \cos(2\pi f t + \beta_0 + \beta)$$

$$u_{mII} = (k_7 e + k_8 e') (\sin(2\pi f t + \beta_0) \cos \beta + \cos(2\pi f t + \beta_0) \sin \beta)$$

somit wird

$$u_{mII} = (k_7 e + k_8 e') \sin(2\pi f t + \beta_0 + \beta).$$

Über die Endverstärker 23 werden den Steuerwicklungen Ströme aufgeprägt, die diesen Modulatorspannungen proportional sind.

Durch passende Wahl von β_0 am Phasenschieber 29 kann man somit je nach Bedarf Rückstellkrafttrichtung und Richtung der Exzentrizität in Übereinstimmung bringen (wenn $\beta_0 = 0$ gemacht wird) oder bei vorhandenen Kreiselkräften einen entsprechenden Winkel $\beta_0 = \beta_k$ miteinander bilden lassen. Ferner kann man mit der Einstellung der Verstärkungsfaktoren der Verstärker 20 und 23 die Regelsteilheit und damit die Lagersteifigkeit nach Wunsch einstellen, und durch das Potentiometer der Differentiationsglieder 21 die Größen k_7 und k_8 so aufeinander abstimmen, daß z. B. aperiodische Rückstellung des Rotors erreicht wird. Ist beispielsweise die Rückstellkraft $F = c e$, worin c die mit k_7 eingestellte Steifigkeit der magnetischen Lagerung ist, und hat der Rotor die Masse m , so wird aperiodische Einstellung erreicht, wenn $k_8/k_7 = \sqrt{2 m/c}$ gemacht wird.

Anstelle des als Frequenzgenerator 24 zu Fig. 1 genannten Frequenzvervielfachers kann jeder beliebige andere Generator z. B. Maschinengenerator oder ein zweiphasiger Wechselrichter Verwendung finden. Ein Frequenzvervielfacher der Speisefrequenz f hat den Vorteil, eine zweiphasige Spannung aus der mehrphasigen Speisespannung einfacher und genauer zu erzeugen, als ein selbständiger Generator, auch wenn die Speisespannung dreiphasig (Drehstromnetz) ist. Im letzteren Falle muß die Modulationsspannung jedoch auch dreiphasig erzeugt werden, und es müssen drei Wandler 12 zum Einkoppeln in den Primärkreis vorgesehen werden.

Statt Hallgeneratoren für die Multiplikation zu verwenden, kann man auch quadratische Kennlinien nichtlinearer Widerstände in Schaltungen ausnutzen, die aus zwei Spannungen A und B den Kombinationswert: $(A + B)^2 - (A - B)^2 = 4 A B$ als reine Produktgröße herstellen. Zahlreiche andere Modulationsverfahren stehen weiterhin zur Verfügung, bei denen jedoch neben der beabsichtigten Frequenzsubtraktion bzw. Frequenzaddition auch die Summandenfrequenzen und die nichterwünschten Seitenbänder (Frequenzaddition bzw. -subtraktion) auftreten, die nicht leicht so ausgesiebt werden können, daß die erwünschten

809824/0429

Glieder in ihrer Phasenlage unbeeinflusst bleiben. Es ist zu berücksichtigen, daß die Exzentrizität selbst eventuell rasche Veränderungen zeigt oder z. B. umläuft. Dann wird auch die Steuerstromfrequenz für die Stellkräfte um diesen Betrag der Umlauffrequenz der Exzentrizität größer oder kleiner als die Speisefrequenz. Mit Frequenz-Bandfiltern, wie in der Fernsprechtechnik sonst üblich, kann man in den hier erforderlichen Regelkreisen daher nicht arbeiten, weil es auf die Phasenlagen der Spannungen auch bei den frequenzmodulierten Trägerfrequenzgrößen ankommt.

Weitere Multiplikationsschaltelemente stehen mit magnetfeldabhängigen Widerständen zur Verfügung, die anstelle von Hallgeneratoren verwendet werden können. Mit vormagnetisierten Magneten und in Brückenschaltung betriebenen magnetfeldabhängigen Widerständen lassen sich damit die gleichen bipolaren nullpunktfesten Aussteuerungen ermöglichen wie mit Hallgeneratoren.

¹³
Leerseite

Offenlegungstag:

15. Juni 1978

2656469

[illegible]

B. 76/111 Lm 2Bl.

FIG.3

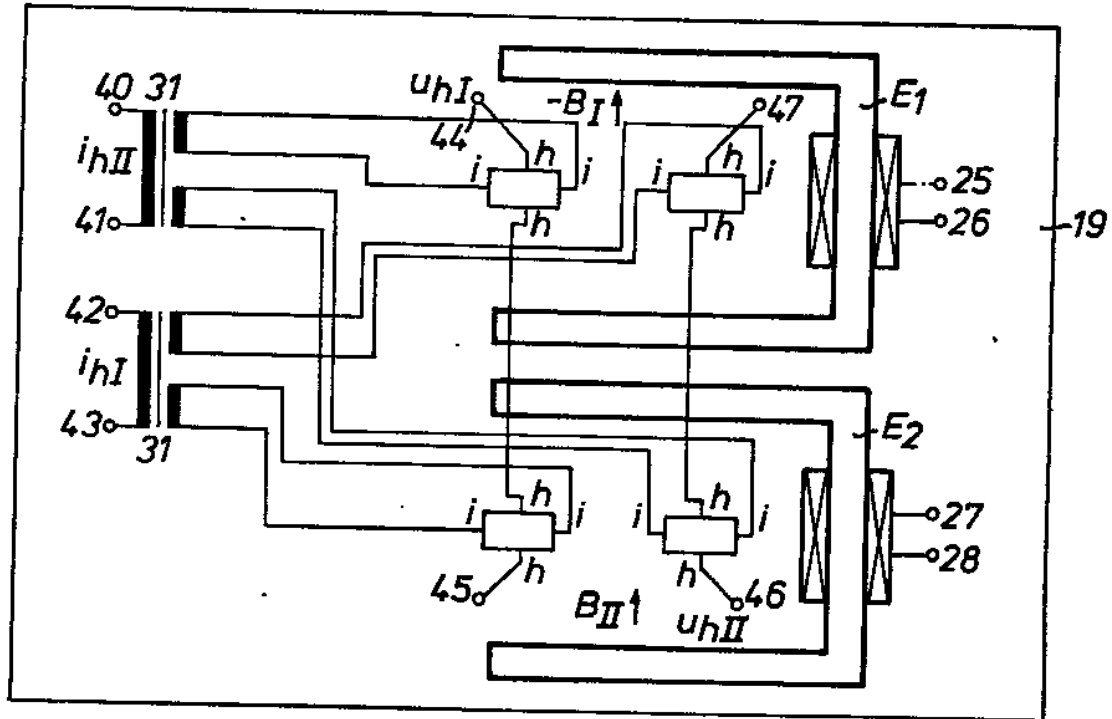


FIG.4

