ハイブリッド型ラジアル磁気浮上回転モータの開発*

篠原 圭輔^{*1}, 大石 哲男^{*2}, 上野 哲^{*3}
金箱 秀樹^{*3}, 岡田 養二^{*4}Development of Hybrid Active Magnetic Bearing Type
Combined Motor-BearingKeisuke SHINOHARA, Tetsuo OHISHI, Satoshi UENO,
Hideki KANEBAKO and Yohji OKADA^{*5}^{*5} Department of Mechanical Eng., Ibaraki Univ., 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki, 316-8511 Japan

A new type of combined motor-bearing is proposed. It is intended for a rotor to have two functions of rotary motor and radial magnetic bearing. In the previous works, $P \pm 2$ pole algorithm has been proposed to realize combined motor-bearing function. But the construction and the control system was complicated. In this paper, hybrid active magnetic bearing (HB AMB) type combined motor-bearing is proposed which uses DC magnetic flux to control radial force. The structure is the combination of hybrid type magnetic bearing and PM type AC motor. First, the fundamental operation of the proposed hybrid AMB type combined motor-bearing is explained. Then the minimum pole number that realizes the independent control of levitation and rotation is derived theoretically. Finally, the experimental setup is made to confirm the capability of the proposed motor. The results show high stability and strong rotating torque of the proposed motor-bearing.

Key Words: Magnetic Bearing, Rotary Machinery, Electromagnetic Actuator, Digital Control, Combined Motor-Bearing.

1. はじめに

近年の工業技術の発展に伴い、モータの高速回転、高出力化が要求され、軸の支持に磁気軸受が次第に使用されてきている⁽¹⁾。これらの応用の中には、回転力を与えるモータが必要なものがあり、モータの両端を磁気軸受により支持する構造が多い。このため、装置が大型化することによって軸長が増加し、弾性モードに悪影響を与えるといった問題がある。そこで、磁気軸受と交流モータの構造が類似していることに注目し、これらを一体化した浮上モータが提案された^(2,3,4)。このモータは、ロータのラジアル方向の位置制御と回転トルクの発生を単一のステータで行えるようにしたものである。

このような浮上と回転を同時に実現できるシステムについては、大石らによって、浮上用の磁極数がロータの永久磁石極数 ± 2 極の時に一定の浮上力を得られる浮上回転理論が提唱され、実験により検証された⁽²⁾⁽⁵⁾。しかし、この ± 2 極理論は無負荷状態で、モータ電流の影響を無視した場

合の浮上力発生理論であり、実際においては、負荷トルクおよびモータ電流によって浮上制御が影響を受けるなどという問題が生じてくる。

本研究ではこれらの問題を解決するため、磁気軸受を永久磁石を用いたハイブリッド型とし、このハイブリッド型磁気軸受と交流モータを組み合わせたハイブリッド型磁気浮上回転モータを提案する。これは、永久磁石によってロータ内部から放射状に広がる一定の磁束を作ることにより、浮上制御を通常のハイブリッド型磁気軸受と同様に2極の直流磁場で行うことができ、浮上磁界と回転磁界が干渉しなければ、容易に浮上回転制御が可能となる。このように半径方向の一定の磁束(バイアス磁束)を利用する磁気浮上モータとしては、東京工業大学の豊島氏らにより、ホモポーラ型ベアリングレスモータとして発表されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本論文で提案するモータは、ハイブリッド型磁気軸受と永久磁石型モータを組み合わせた構造としている。これにより、豊島氏らのモータよりも極数が少なくすみ、浮上回転制御の簡略化を図ることができる⁽⁸⁾。

本論文では、モータ磁界と浮上磁界が干渉しない最低の極数を磁界解析により明らかにし、実際にモータを製作し実験を行った結果を報告する。

* 原稿受付 1999年7月15日。

^{*1} 学生員, 茨城大学大学院 [現: 石川島播磨重工業(株)]。^{*2} 正員, 神鋼電機(株) (☎ 516-8550 伊勢市竹ヶ島100)。^{*3} 正員, 茨城大学大学院 (☎ 316-8511 日立市中成沢町4-12-1)。^{*4} 正員, 茨城大学工学部。

E-mail: okada@mech.ibaraki.ac.jp

Fig. 1 Schematic of hybrid type combined motor-bearing

Fig. 2 Coordinate system

2. 浮上回転理論

提案する浮上モータの基本的な構造を、図1に示す。

2.1 ハイブリッド型磁気浮上モータの提案 ハイブリッド型磁気軸受は、2つの磁気軸受の間に永久磁石を挟むことによって、バイアス磁束を永久磁石で与える。そのとき、片側（図1の側面図では左側）の磁気軸受ロータの表面に永久磁石を貼り付け、ロータに極性を持たせ、ステータに回転磁界用巻線を設けると、提案するハイブリッド型ラジアル磁気浮上モータとなる。

モータ側のステータは正面図に示すように、ロータの極数に応じた回転磁界と2極の浮上磁界を作り出せる2つの巻線を持つ。モータ側および磁気軸受側のロータにはバイアス永久磁石により放射状の磁束が与えられるために、これと2極の直流磁場との相互作用で浮上制御が可能となる。回転制御はステータからの回転磁界と、ロータ表面に張り付けた永久磁石によって、PMモータと同じように行うことができる。

2.2 浮上力の計算 浮上モータの座標系を、図2に示すように定める。

ロータ表面の永久磁石と、バイアス永久磁石による一定

Fig. 3 Flux density distributions

な磁束密度を加えた磁束密度 B_r は、図3のように矩形波状になるが、ここでは計算を簡単にするため、次式のように正弦波状に近似する。

$$B_r = B_0 + B_1 \cos(M\theta - \omega t) \quad (1)$$

電動機巻線によりエアギャップに作られる磁束密度 B_{sm} は、次式のように表されたとする。

$$B_{sm} = B_2 \cos(M\theta - \omega t - \psi) \quad (2)$$

また、位置制御巻線による磁束密度を B_{sb} とすると、次式のように近似される。

$$B_{sb} = B_3 \cos(\theta - \phi) \quad (3)$$

従って、エアギャップに作られる磁束密度 B_g は、これらの磁束密度の総和となるので、次式で与えられる。

$$B_g = B_r + B_{sm} + B_{sb} \quad (4)$$

ここで、各変数を以下のように定義する。

- B_0 : バイアス磁石によるギャップ磁束密度
- B_1 : ロータの永久磁石による磁束密度の波高値
- B_2 : 電動機巻線による磁束密度の波高値
- B_3 : 位置制御巻線による磁束密度の波高値
- θ : ステータ上に固定した回転座標
- ψ : 電動機巻線による磁束とロータの位相差
- ϕ : 位置制御巻線による磁束の位相角
- ω : ロータの角速度
- t : 時間
- M : 極対数 ($= 1, 2, 3, \dots$)
- i : 自然数

次にロータの半径を r 、ロータとステータのエアギャップを g 、ロータの軸方向長さを l 、微小角度を $d\theta$ とすると、エアギャップの微小体積 ΔV は

$$\Delta V = r l g d\theta \quad (5)$$

となり、この微小体積に貯えられる磁気エネルギー ΔW は次式となる。

$$\Delta W = \frac{B_g^2}{2\mu_0} \Delta V = \frac{B_g^2}{2\mu_0} r l g d\theta \quad \dots\dots\dots (6)$$

これより半径方向に沿った放射状の力 dF は、微小ギャップ体積中に貯えられる磁気エネルギーの仮想変位により次式のように計算される。

$$dF = \frac{\partial \Delta W}{\partial g} = \frac{B_g^2}{2\mu_0} r l d\theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 x, y 方向に発生する力 F_x, F_y は、 dF の x 方向成分および y 方向成分を θ についてギャップ全周にわたって積分することにより求められる。

$$F_x = \int_V dF \cos \theta = \int_0^{2\pi} \frac{B_g^2}{2\mu_0} r l \cos \theta d\theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$F_y = \int_V dF \sin \theta = \int_0^{2\pi} \frac{B_g^2}{2\mu_0} r l \sin \theta d\theta \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(8)、式(9)の計算結果から、 $M \geq 3$ とすると

$$F_x = \frac{B_0 B_3 l r \pi}{\mu_0} \cos(\phi) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$F_y = \frac{B_0 B_3 l r \pi}{\mu_0} \sin(\phi) \quad \dots\dots\dots (11)$$

となり、ロータの回転角に関係なく一定の浮上力が得られる。また x 方向、 y 方向の浮上力とも、ロータの永久磁石の磁束密度及び電動機巻線による磁束密度の項が現れておらず、浮上力はモータリング磁界の影響を受けないことが分かる。

2.3 回転トルクの計算 回転トルク T は以下のように求められる。

$$T = \int_0^{2\pi} \frac{\partial \Delta W}{\partial \psi} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式(12)の計算結果から、 $M \geq 2$ とすると

$$T = -\frac{r l g B_1 B_2 \pi}{\mu_0} \sin \psi \quad \dots\dots\dots (13)$$

となり、バイアス磁石によるエアギャップ磁束密度、及び位置制御巻線による磁束密度の項が現れていないため、バイアス磁界および浮上磁界の影響を受けないで、回転制御が出来る。

以上の計算結果から、モータ磁界の極対数を3以上とすることで、提案するモータの浮上回転制御が可能で、浮上と回転が連成しないことが示された。

3. 実験装置と制御系

3.1 実験装置 実験装置の概略図を図4に示す。図中の左側に磁気浮上モータ、中央に磁気軸受を配した構造となっている。これらの間に永久磁石(バイアス磁石)があり、各ロータと各ステータ間のエアギャップに一定のバイアス磁束を発生させる。

ステータは積層銅板で作られ、モータ用は12突極、磁気軸受用は8突極のものを用いた。各突極には集中巻コイル

Fig. 4 Schematic of experimental setup

Fig. 5 Schematic of the rotor

が、モータ用には150巻、磁気軸受用には200巻まかれている。これをリニアアンプ(モータはAppex PA12、磁気軸受はAppex PA01)で駆動する。

モータに非接触で負荷を与えることができる負荷装置は、図の右側に配置されている。これは、ロータの軸に取り付けられたアルミニウム製の円盤と、その円盤を両側から挟み込む向きに配置した電磁石からなっており、渦電流によって負荷トルクを与える⁽⁵⁾。

変位センサーは、モータ側と磁気軸受側のそれぞれのタッチダウンプレートの外側に、水平方向(x 方向)と垂直方向(y 方向)の2方向、計4個設置し、各ロータの変位を検出する。

3.2 ロータの構造 ロータは、電気抵抗の比較的高い電磁ステンレスを削りだして、外径37.5φ長さ36のものを製作した。

永久磁石には、エアギャップの距離をできるだけ小さくできる様に、薄いネオジウム系磁石(厚さ0.8[mm])を用いた。ギャップの磁束分布が、図3の B_r に示すように単極になる必要がある。そこで図5に示すように、バイアス磁石の向きと同じ方向に、ロータの表面にN極のみ3枚張り付けた。さらに磁束分布が正弦波状に近づくように、永久磁石を台形に加工したものを張り付けた。

3.3 制御システム モータ側の制御システムの構成を図6に示す。ステータコイルは、各相を独立したアンプにより駆動する。磁気軸受側も、水平方向と垂直方向の2つのアンプにより駆動する。制御には、モータ側・磁気軸受側ともにDSPを使用したデジタル制御を用いた。センサ

Fig. 6 Control system

Fig. 7 Schematic arrangement of the rotor and sensors

からの信号は、A/Dコンバータを通してDSP内に取り込まれる。そしてDSP内で各コイルに流す電流を計算し、D/Aコンバータを通してアンプに出力する。浮上制御のコントローラには、モータ側・磁気軸受側ともにデジタルPIDコントローラを用いた。

3.4 制御方法 この実験装置では、センサー部分から各ステータ中心までの距離が長く、浮上モータや磁気軸受の中心とセンサーの位置との距離によって生じるノコロケット問題が生じてくる。そこで、実際に制御したい各ロータ中心の変位を、両側のセンサーとロータ間の距離の比率によって求め、その値(コロケット変位信号)をフィードバックした。

図7に、本実験装置で用いるロータとセンサーの概略図を示す。ここでは、モータ側の中心の変位を検出する方法について述べる。モータ側センサーからモータロータの中心までの距離を l_1 、モータロータの中心から磁気軸受側センサーまでの距離を l_2 とする。また、モータ側センサーの変位信号を d_1 、磁気軸受側センサーの変位信号を d_2 とし、センサー間の距離を l_3 とすると、モータロータの中心変位 d_m は、

$$d_m = \frac{d_1 l_2 + d_2 l_1}{l_3} \dots\dots\dots (14)$$

と求めることができる。この方法をモータ側の x, y 方向、お

Fig. 8 Impulse responses

よび磁気軸受側の x, y 方向について計算し、それぞれの値をフィードバックする。

4. 実験結果

第2章で展開した浮上回転理論を確かめるために、実験を行った。実験方法は、モータ側のエアギャップを永久磁石を含めて2.0[mm]、磁気軸受側のエアギャップを1.0[mm]とし、モータ電流を0.5[A]、1.0[A]とした場合についてそれぞれ実験を行った。

4.1 浮上回転実験 最初は、負荷装置を取り除いた状態で浮上回転実験を行った。実験にはリニアアンプを用い、モータ側は ± 36 [V]の電源、磁気軸受側は ± 24 [V]の電源でそれぞれ駆動した。どちらのアンプも、最大電流は4[A]に設定した。モータ側および磁気軸受側のコントローラのゲインは実験的に求め、表1に示す値を使用した。

まず、ロータの回転数が0[rpm]のときに、インパクトハンマを用いてセンサーターゲットの部分にインパルスを与え、ロータを加振した時のインパルス応答を求めた。結果を図8に示す。これらはそれぞれ、測定する方向にインパルスを与えたときの軸の変位応答である。これらの応答から、ロータの安定した浮上制御が行えている事が示される。

次に、回転試験を行った。モータ電流を0.5[A]と1.0[A]について実験を行った。各巻き線に流せる最大電流は4[A]なので、これからモータ電流を差し引いた電流が浮上電流

Table 1 Control parameters

Combined Motor-Bearing	Magnetic Bearing
$K_p = 19$ [A/mm]	$K_p = 18.5$ [A/mm]
$K_d = 1.8$ [A·sec/mm]	$K_d = 2.1$ [A·sec/mm]
$K_i = 0.2$ [A/sec]	$K_i = 0.07$ [A/sec]
$\tau = 1 \times 10^{-4}$ [sec]	$\tau = 1 \times 10^{-4}$ [sec]
$T_d = 2 \times 10^{-2}$ [sec]	$T_d = 1 \times 10^{-2}$ [sec]

Fig. 9 Unbalance responses

として使うことが出来る。モータ電流を $0.5[\text{A}]$ としたときは $5,600[\text{rpm}]$ まで、モータ電流を $1.0[\text{A}]$ としたときは $5,300[\text{rpm}]$ まで、浮上しながら回転制御が可能ながことが確かめられた。アンバランス応答(回転数ごとの振動振幅)を図9に示す。これらは、モータ電流を $0.5[\text{A}]$ としたときのモータ側および磁気軸受側の応答をそれぞれ示してあり、回転数を $100[\text{rpm}]$ 刻みで上昇させてゆき、各回転数で安定状態の最大と最小のセンサー変位(コロケート変位信号)を記録し、その差をとったものである。

モータ側において、 $2,000[\text{rpm}]$ を超えたあたりで振動振幅が大きくなっている。これは、ロータの回転特性による1次共振と考えられる。また、図に示した最高回転数を超えた付近から振動振幅が大きくなり、タッチダウンプレートにシャフトが接触し始め、脱調してしまった。

次に、最高回転数に近い $5,000[\text{rpm}]$ の同期速度でロータが回転しているときの、コイルに流れる電流とコイルに加わる電圧を測定した結果を図10および図11に示す。これらの図は、モータ電流を $0.5[\text{A}]$ としたときの波形である。図10は、ステータの最上側に位置する垂直方向を制御するコイル(最上側コイル)と、水平方向を制御するコイル(水平方向コイル)に対する電圧波形を、図11は、最上側コイルと水平方向コイルに対する電流波形をそれぞれ示している。電圧波形には強いノイズ成分が含まれるが、これはコイル電流をデジタル制御しているため、階段状の電流指令波形をLに入力するため、負荷で微分されることで発生する。そのほかのひずみ成分は、正弦波状のモータ電流に変動する浮上成分が重複するためと思われる。

Fig. 10 Coil driving voltage

Fig. 11 Coil driving current

図10から、コイルに加わる電圧が飽和を起こしていることがわかる。これはモータの回転による逆起電力が主成分であり、このことが駆動電圧不足の主な原因となり、ロータの脱調現象が起きたと考えられる。

4.2 トルクの測定 図4の右側に示す負荷装置を用いることにより、非接触でトルク負荷をロータに与えることができる。負荷装置の両側に配置された電磁石は、対面、ならびに隣り合う電磁石を異極となるように直列に結合した。負荷トルクは渦電流で発生し、電磁石に流す電流の大きさによって変化させ、ブレーキ係数を変化できる。その電流を $1.0[\text{A}]$ 、 $1.5[\text{A}]$ 、 $2.0[\text{A}]$ について実験を行った。

結果を図12に示す。これらの図から、モータ電流を $0.5[\text{A}]$ としたときの最大トルクは $0.055[\text{Nm}]$ 、モータ電流を $1.0[\text{A}]$ としたときの最大トルクは $0.1[\text{Nm}]$ 発生することがわかる。この負荷特性は、トルクがモータ電流に比例しており、また簡単な実験装置の割には大きなトルクを記録した。負荷のあるときのアンバランス応答は、図9とほぼ同じレベル

Fig. 12 Measured Torque

であったため、ここでは省略した。

5. 結 論

本論文では、ハイブリッド型磁気軸受と永久磁石型モータを組み合わせた、ハイブリッド型ラジアル磁気浮上モータを提案し、磁界解析によりモータ磁界と浮上磁界が干渉しない最低の極数を導いた。

この浮上回転理論を確認するために、実際に実験装置を製作し実験を行った。その結果、モータ磁界の極対数が少なくとも3の場合は、ロータの浮上回転制御が可能であることが実験的にも確認できた。また、浮上はきわめて安定しており、モータのトルク負荷特性も良好であることが判

明し、実用化可能な浮上モータが開発できた。

文 献

- (1) 日本機械学会編:「磁気軸受の基礎と応用」, 養賢堂 (1995)
- (2) 大石・ほか2名, 電気学会論文誌D, 115-3 (1995), 342-347
- (3) Chiba, A., ほか3名, IEEE Trans. on Energy Conversion, 9-1 (1994), 61-67
- (4) Schöb, R., and Barletta, N., Proc. of 5th Symp. on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, August (1996), pp. 313-318
- (5) 宮本・ほか4名, 日本 AEM 学会誌, 5-1 (1997), 19-25
- (6) 富島・ほか4名, 平成9年電気D部門全国大会, Vol. 5, No. 1220, (1997), pp. 214-215
- (7) 富島・ほか4名, 平成8年電気学会D部門全国大会, Vol. 3, No. 207, (1996), pp. 107-108
- (8) 篠原・ほか3名, 第10回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, No. 98-251, (1998-6), pp. 325-330