711 回転損失の無い磁気軸受の開発

Development of Rotating Loss-less Magnetic Bearing

○学 栗田 伸幸 (茨大院), 正 岡田 養二 (茨大工), 正 松田 健一 (茨大工)

Nobuyuki KURITA, Ibaraki Univ., 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi 316-8511

Yohji OKADA, Ibaraki Univ., 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi 316-8511

Ken-ichi MATSUDA, Ibaraki Univ., 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi 316-8511

For a high speed and long term rotor such as an energy storage flywheel, eddy current in the laminated steel sheet causes rotating loss. In this paper a new type of magnetic bearing which uses Lorentz force is proposed. The rotating loss is expected to be negligible due to the constant flux in the air gap. To confirm the proposed theory a simple experiment was fabricated and tested. The results indicated the fundamental characteristics of this type magnetic bearing. The rotor could run up to 7200[rpm] without any serious problem.

Key Words : Magnetic Bearing, Super high-speed rotor, Energy storage flywheel, Digital Control

1 はじめに

近年、電力需要の昼夜間の格差に伴って、電力の日夜負荷平準化が求められている。この時有効な方法の一つとしてエネルギー貯蔵フライホイールがあげられる。これは、夜間の余剰電力を利用してフライホイールを高速回転させ、電気エネルギーを運動エネルギーに変換して貯蔵し、昼間の電力需要ピーク時には逆に運動エネルギーを電気エネルギーに変換して使用するという方法である⁽¹⁾。従って高速回転での待機時間が長いために、軸受には回転に伴う振動を制御するとともに、回転による損失を極力小さくする事が求められる。上の要求から軸受には磁気軸受を用い、完全非接触状態でフライホイールを支持し回転させる研究が行われている⁽²⁾。しかし貯蔵効率の向上には、磁気軸受の渦電流による回転損失の低減が必要となる。そこで本稿では軸受力としてローレンツ力を用いて回転体内部での磁界の変化がなく、渦電流が発生しないので回転損失の無い磁気軸受を提案し、軸受としての特性を検証する。

Fig. 1 Schematic of the Flywheel and Coil

Fig. 2 Principle of Proposed Magnetic Bearing

2 動作原理と軸受力の測定

2.1 軸受力の発生原理 ローレンツ力を利用した磁気軸受の概要を図1に示す。この場合、外側に出ている部分を固定するコイルがステータであり、永久磁石を持ったフライホイールがロータになる。次に軸受力の発生原理を図2により説明する。フライホイールの中には図のように円筒形の永久磁石が組み込まれており、フライホイールのギャップにはこの永久磁石により常に一定の磁束が発生している。この磁束の中に配置されたコイルに電流を流すと、コイルにはフレミングの法則によってローレンツ力が発生する。この時コイルは固定されているので、軸にはローレンツ力の反力が働き、この力を軸受力として制御を行う。

2.2 軸受力の測定 発生する軸受力の大きさを測定するために、軸受力測定用の実験装置を用いて実際にコイルに電流を流した場合のローレンツ力を測定し、結果を図3

Table 1 Specification of the Winding

Item	Value
Coil Diameter	$\phi 1$ [mm]
Turns	17 [Turn] $\times$ 2 [Layer]
Effective Length	40[mm]/[Turn]

に示した。この時磁束密度は $220[mT]$ であり、コイルの有効長さは表1に示した。これらの値を式 $F = BIL$ に代入して $F = 0.3 \times I$ の理論値を得た。測定は初めにひずみゲージのキャリブレーションを行い、その後コイルに $1[A]$ から $5[A]$ の電流を流した時のローレンツ力を測定しグラフにプロットした。ほぼ理論通りの結果を得た。

3 実験

3.1 実験装置の概略 磁気軸受の動作原理を確認し、軸受としての基本特性を検証するために実験装置を用いて

Fig. 3 Bearing Force

Fig. 4 Schematic of the Experimental Setup and the Coordinate System

浮上回転実験を行う。この実験装置の概略図を図4に示す。実験装置はシャフト上部を玉軸受によって単純支持し、フライホイールには回転方向と x, y のラジアル方向に自由度を持たせる構造とした。またフライホイールの回転用に、駆動用のディスクモータを玉軸受の下に取り付けた。

3.2 制御系の構成 軸受制御はデジタルPIDコントローラを用い、変位センサにより検出したフライホイールの変位をフィードバックする事により行った。また回転用に用いたモータにはコンピュータ内で作られた3相の回転指令電流によって駆動した。

3.3 実験結果 実験装置の基本的な特性を調べるために、制御系に外乱を与え周波数応答を測定した。まず、外乱信号としてセンサー入力に0.05[V]の正弦波を10[Hz]から500[Hz]まで周波数を増加させながら加えた時のセンサーの周波数特性を測定した。実験結果を図5に示す。共振が18[Hz]と85[Hz]に存在している事が分かる。1次のピークが玉軸受支持による剛体モードによるもので、2次のピークがシャフトの曲げモードによるものであると考えられる。次にアンバランス応答の結果を図6に示す。これはモータの回転数を200[rpm]ずつ上げてゆき、定常回転になった時にフライホイールの振動振幅を測定したものである。 x, y 方向の剛体モードの共振が起こる約1300[rpm]でアンバランスが最大になった。その後シャフトの曲げモードの共振の起こる約4800[rpm]まではアン

Fig. 5 Frequency Response

Fig. 6 Unbalance Response

バランスはかなり抑えられている事が分かる。その後曲げモードの共振による影響でアンバランスは増加するが7200[rpm]まで回転させる事ができた。

4 結論

本稿では、永久磁石によってギャップ磁界を一定とする事で、渦電流を発生せず回転損失の無い磁気軸受を提案した。またこの磁気軸受の軸受力発生原理を示し、軸受力の測定を行った。この結果理論値に非常に近い値が得られ、軸受力発生原理が確認された。さらに回転実験装置を作製し、周波数応答、アンバランス応答の測定を行った。それにより駆動用ディスクモータの限界回転数である7200[rpm]までの範囲で安定した軸受制御が行える事を確認した。しかしこの方式では軸受力としてローレンツ力を用いるので発生させられる力が弱いために、一般の磁気軸受への適用は困難であると思われる。今後、回転損失が少なくかつ広い応用の可能な磁気軸受を開発する。

参考文献

- (1) 斎藤 他：10kWh級電力貯蔵フライホイール，電磁力関連のダイナミックスシンポジウム 2000.6.29～7.1 沖縄
- (2) Y. Miyagawa, et al: A trial manufacturing of flywheel energy storage system using a high-Tc superconducting magnetic bearing, Preprint of Applied Superconductivity Conference, 1998