セルフベアリングモータのセルフセンシング化の研究*

松田 健一^{*1}, 黒須 利幸^{*2}, 岡田 養二^{*1}

Self-Sensing Control Technique of Self-Bearing Motor

Ken-ichi MATSUDA^{*3}, Toshiyuki KUROSU and Yohji OKADA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Ibaraki University,
4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 316-8511 Japan

This paper introduces a self-sensing technique of self-bearing motor by using the differential transformer principle. This self-sensing technique has wide linear range than the other technique due to the use of the carrier frequency component. Therefore it is expected to have robust displacement information for the temperature fluctuation. This technique uses the structure of the motor and levitation coils which are similar to the differential transformer. In this paper, the fundamental principle is introduced how the self-sensing is achieved by the differential transformer principle. Then the differential output characteristics is examined experimentally. Finally levitated rotating test is carried out by self-sensing control.

Key Words: Rotary Machinery, Magnetic Bearing, Digital Control, AC Motor, Self-Sensing Technique

は じ め に

近年, モータを非接触で支持でき, 高速回転可能でメンテナンスフリーなセルフベアリングモータが開発され, 研究が進められている⁽¹⁾. 通常のセルフベアリングモータは, フィードバックによる位置制御を行うために変位センサを必要とする. 従って, 変位センサのコストや設置スペースが問題となる. これらの問題を解決するため, アクチュエータを変位センサとして併用するセルフセンシング技術が提案されている. これまでに提案されたセルフセンシングの方式としては, 大きく分けてオブザーバ方式⁽²⁾と搬送波方式⁽³⁾の二つの方式がある. オブザーバ方式は, 制御電圧と電流の関係からプラントのオブザーバを構成し, 変位を推定する方式で, 特別なハードウェアを必要としない利点はあるが, 精度の高いオブザーバを構成する必要がある. 一方搬送波方式は, 制御電流の搬送波成分から変位を推定するため, フィルタ回路や復調回路などのハードウェアを必要とするが, 直接変位信号が得られるという利点がある. しかし搬送波を用いる方式の場合でも, 単に電磁石のインダクタンスの変化から変位を推定すると, 得られる信号の線形範囲は広いと

は言えず, 発熱などによりその特性が変化する. これらの問題を解決するために, 差動トランス方式によるセルフセンシング技術が提案されている⁽⁴⁾. 差動トランス方式は, アクチュエータの巻線構造に差動トランスと同じ特性を持たせることにより, 通常の搬送波を用いたセルフセンシング技術に比べ, 線形範囲がより広く, 熱変動などの影響を受けにくい出力を得ることができる. 本研究では, 差動トランス方式により, セルフベアリングモータのセルフセンシング化をはかり, より実用性の高いモータを開発することを目的とする.

1. 浮上回転理論

本研究では, モータ効率が良くロータでの発熱が少ないPM同期型モータを用い, ± 2 極理論を用いたセルフベアリングモータの浮上理論⁽¹⁾を適用する. 従って, 本モータはステータ極数=ロータ極数 ± 2 のとき, 回転角に関係なく一定した浮上力を得ることができる. このとき, x, y 方向の浮上力はそれぞれ式(1), (2)のようになる.

$$F_x = \frac{\pi B_R r w}{2\mu_0} B_{Fx} \quad (1)$$

$$F_y = \frac{\pi B_R r w}{2\mu_0} B_{Fy} \quad (2)$$

ここで, B_R は界磁磁束の波高値, r, w はそれぞれ半径と厚み, μ_0 は真空の透磁率, B_{Fx}, B_{Fy} はそれぞれ x, y 方向の制御磁束の波高値である. 従って, x, y 方向の

* 原稿受付 2003年4月21日.

^{*1} 正員, 茨城大学工学部(〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1).^{*2} 茨城大学大学院理工学研究科.

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

Fig. 1 Principle of Differential Transformer

制御磁束を変化させることによって、ロータの位置を xy 平面上で制御することができる。

また、回転トルクは、BIL 則 (フレミングの左手の法則) から式 (3) のように計算することができる。

$$T = B_R I_M L \pi \cos \psi \quad (3)$$

ここで I_M は回転電流の波高値、 ψ は回転電流の位相差、 L は巻線の有効長さ (通常 $L = w$) である。従って、位相差 ψ を変化させることによって、回転トルクを制御することができる。

2. セルフセンシングの原理・理論

図 1 に差動トランスの原理図を示す。差動トランスは 1 次側コイル、2 次側コイル及び鉄心から構成され、1 次側コイルに一定周波数の電圧を加え励磁することで、2 次側コイルには鉄心の動きに応じた差動電圧が誘起される。この出力を位相検波することで変位に比例した出力が得られる。

本モータの巻線構成を図 2 に示す。本モータは、浮上制御と回転用の 2 系統の巻線を必要とする。その中で、回転用巻線は対向する相が同相に、浮上用巻線は対向する相が逆相に結線されている。従って、回転用巻線を差動トランスの 1 次側とみなすと、浮上用巻線を差動トランスの 2 次側とみなすことができ、差動トランスの原理によりロータの変位推定を行うことが可能となる。

本研究では、回転用巻線の U 相を 10[kHz] の搬送波周波数でパルス幅変調駆動し、U 相に直交する浮上用巻線の α', β' 相に誘導される電圧によって図 3 の浮上用アンプの検出抵抗を流れる電流を検出し、セルフセンシングを行う。これは、浮上制御指令による電圧変動が大きく、変位情報を含む誘導電圧を検出することが困難だったためである。また、 α', β' と同じ位置に制御巻線とは別系統の検出巻線 D_x, D_y を巻き、同様に U 相を PWM 駆動したときに、 D_x, D_y に誘導される電圧を検出し、この二つの方式のセルフセンシング特性を比較する。検出巻線を用いた場合、変位推定の感度

Fig. 2 Arrangement of Coils

Fig. 3 Levitation Amplifier

は高くなるので、検出巻線の巻数は少なく (3~10 巻) でよく、設置スペースの増加はほとんどない。本実験装置において、浮上用巻線、回転用巻線の巻数はそれぞれ 91 巻、検出巻線の巻数は 9 巻とした。

次に相互インダクタンスの理論解析を行い、本モータが差動トランス方式により、セルフセンシング可能であることを示す。まず、 $F_U(\theta)$ は U 相の単位電流による起磁力分布で、正弦波状に分布すると仮定すると、以下のようにおける。

$$F_U(\theta) = F_0 \cos 2\theta \quad (4)$$

また、ロータが図 4 に示すように、 x, y に変位したときのエアギャップ $l(\theta)$ を

$$l(\theta) \approx l_0 + x \sin \theta - y \cos \theta \quad (5)$$

とすると、 θ におけるロータとステータ間の微小部分のパーミアンス dP_{eq} は、半径 r 、厚さ w のロータであ

Fig. 4 Relation between Rotor Motion and Airgap

れば磁氣的等価回路より以下のように近似できる。

$$dP_{eq} = \frac{\mu_0 r w (l_0 - x \sin \theta + y \cos \theta)}{l_0^2} d\theta \quad (6)$$

さらに、 α, β 相巻線の単位電流による起磁力 $F_\alpha(\theta)$, $F_\beta(\theta)$ が正弦波状に分布する場合、

$$F_\alpha(\theta) = F_1 \cos 3\theta \quad (7)$$

$$F_\beta(\theta) = F_1 \sin 3\theta \quad (8)$$

と表わせるから、 α, β 相巻線に鎖交する微小磁束は、

$$d\psi_{U\alpha} = F_U(\theta) F_\alpha(\theta) dP_{eq} \quad (9)$$

$$d\psi_{U\beta} = F_U(\theta) F_\beta(\theta) dP_{eq} \quad (10)$$

となる。これは、U 相巻線と α, β 相巻線間の単位電流当たりの微小鎖交磁束であり、相互インダクタンス $M_{U\alpha}, M_{U\beta}$ は、

$$M_{U\alpha} = \int_0^{2\pi} F_U(\theta) F_\alpha(\theta) dP_{eq} = \frac{F_0 F_1 \mu_0 r w \pi}{2 l_0^2} y \quad (11)$$

$$M_{U\beta} = \int_0^{2\pi} F_U(\theta) F_\beta(\theta) dP_{eq} = -\frac{F_0 F_1 \mu_0 r w \pi}{2 l_0^2} x \quad (12)$$

で与えられる。この結果、 $M_{U\alpha}$ は y 方向、 $M_{U\beta}$ は x 方向のみに依存する特性を持ち、 α, β 相巻線の誘導電圧からそれぞれ y, x の変位の推定が可能である。

また、x, y 方向の直接的な差動出力である U 相上にある α, β 相巻線 (α', β') のみを用いる場合は、この巻線の単位電流による起磁力 $F_{\alpha'}(\theta), F_{\beta'}(\theta)$ を Dirac のデルタ関数を用いて、

$$F_{\alpha'}(\theta) = F_1 [\delta(\theta) + \delta(\theta - \pi)] \quad (13)$$

$$F_{\beta'}(\theta) = F_1 [\delta(\theta - \frac{\pi}{2}) + \delta(\theta + \frac{\pi}{2})] \quad (14)$$

とすると、相互インダクタンス $M_{U\alpha'}, M_{U\beta'}$ は、突極部分の面積を S として、

$$M_{U\alpha'} = \frac{2 F_0 F_1 \mu_0 S}{l_0^2} y \quad (15)$$

Fig. 5 Schematic of Experimental Setup

Fig. 6 Schematic of Rotor

$$M_{U\beta'} = \frac{2 F_0 F_1 \mu_0 S}{l_0^2} x \quad (16)$$

となり、 α', β' 相巻線の誘導電圧から y, x の変位推定が可能である。従って、検出巻線を用いた場合も同様に、 D_x, D_y 巻線の誘導電圧から x, y の変位推定が可能となる。

3. 実験装置の構成

図 5 に実験装置の概略図を、図 6 にロータの構造を示す。本モータはインナーロータ型で、ロータ軸の上部を玉軸受で単純支持し、ラジアル x, y 方向のみに自由度を持つ。ロータは、直径 38.6mm、厚さ 0.35mm の珪素鋼板 (材質: 35A300) を 103 枚積層したもので、その表面には厚さ 0.7[mm] のネオジウム系永久磁石 (NEOMAX-38H, リコイル比透磁率 1.05) が N, S 交互に 4 枚張付けられている。ロータとステータ間のエアギャップは約 1.0[mm] で、直接接触するのを防ぐために約 0.4[mm] のタッチダウンを設け、ラジアル 2 方向の変位は渦電流式変位センサにより検出している。

制御系の構成を図 7 に示す。回転用巻線の U 相を PWM インバータを用いて PWM 駆動し、浮上制御巻

Fig. 7 Control System

Fig. 8 Configuration of Detection Circuit

線の α' , β' もしくは検出巻線の D_x , D_y に誘導された差動信号を検出することによって変位推定を行う。本モータの制御には DSP(dSPACE DS1104) を利用したデジタル制御を用いる。浮上制御は、変位センサもしくはセルフセンシング出力を A/D コンバータを通して DSP ボードに取り込み、ロータ変位に応じて計算した制御電流を D/A コンバータからパワーアンプを介して各巻線に出力することによって行う。浮上制御には PID コントローラを用いた。また、回転制御はロータの界磁磁束に同期した回転磁界を作り出す同期モータ制御を行った。

セルフセンシングに用いる検出回路の構成を図 8 に示す。まず、検出巻線に誘導された差動信号の搬送波成分をバンドパスフィルタを用いて抽出する。また、U 相を PWM 駆動している基準信号の搬送波成分を同様に抽出する。この基準信号と差動信号の位相関係を位相補償回路により調整し、掛算器を用いて変位の符号に応じて差動出力波形を全波整流する。この出力をカットオフ周波数 1.5[kHz] のローパスフィルタに送

Fig. 9 Characteristics of Estimated Displacement using Levitation Coils (x-axis, $\omega t = 0$ (Left), $\omega t = \frac{\pi}{4}$ (Right)) Fig. 10 Characteristics of Estimated Displacement using Detecting Coils (x-axis, $\omega t = 0$ (Left), $\omega t = \frac{\pi}{4}$ (Right))

り、搬送波成分を除去することによって、ロータの推定変位を得る。

4. 実験結果

4-1 変位推定実験 はじめに浮上制御巻線を検出巻線として、変位推定実験を行った。実験は、ロータを $-0.3[\text{mm}]$ から $+0.3[\text{mm}]$ まで変位させることによって行い、制御電流による影響を調べるために検出方向の浮上制御巻線に $-2[\text{A}]$ から $+2[\text{A}]$ までの直流電流を入力した。また、ロータが回転したときの影響を調べるため、永久磁石の N 極と検出スロットが対向する位置をロータの角位置 $\omega t = 0$ 、永久磁石の N 極と S 極の間に検出スロットがある場合を $\omega t = \frac{\pi}{4}$ とし、それぞれの位置で実験を行った。測定結果を図 9 に示す。測定結果から、変位に対して線形な出力が得られていることが確認されるが、変位推定は入力電流及び永久磁石の位置によって変動してしまった。このため、電流変動の少ない安定した状態では、セルフセンシングによる浮上制御に成功したが、制御電流により差動出力に変動が生じ、セルフセンシング制御によりロータを浮上回転させることはできなかった。これは、誘導電圧によって検出抵抗を流れる微小な電流を検出していたので、永久磁石、制御アンプ等の影響を含め、

Fig. 11 Frequency Response by Sensor Control (x-axis, $\omega t = 0$)

Fig. 13 Frequency Response by Selfsensing Control (x-axis, $\omega t = 0$)

Fig. 12 Frequency Response by Sensor Control (x-axis, $\omega t = \frac{\pi}{4}$)

Fig. 14 Frequency Response by Selfsensing Control (x-axis, $\omega t = \frac{\pi}{4}$)

磁気回路における誘導特性変動の影響を大きく受けてしまったためではないかと考えられる。

そこで、浮上制御巻線とは独立した検出巻線を用いて、誘導電圧を利用した変位推定実験を行った。測定結果を図 10 に示す。測定結果から、制御電流による差動出力の変動を抑えることができ、変位に対して線形な出力を得られているということが確認された。これは、制御巻線とは独立した検出巻線を用いて誘導電圧を利用したセルフセンシングを行うことで SN 比が改善され、磁気回路の変動による影響を受けにくい出力を得ることができたためであると考えられる。これより以降では、独立した検出巻線を用いて、セルフセンシングによる浮上実験を行う。

4.2 浮上実験 次に、本モータの浮上特性を調べるために、周波数応答を測定した。測定方法は、変位センサ制御もしくはセルフセンシング制御によりロータを安定浮上した状態で、制御システムにロータが $\pm 0.01[\text{mm}]$ 振動するような正弦波外乱を入力し、ロータ変位を出力とすることで求められる伝達関数を FFT

アナライザで測定する。変位センサ制御時、セルフセンシング制御時の測定結果を図 11 から図 14 に示す。

図 11 と 12 の測定結果から、変位センサ制御時は減衰が非常によく効いており、共振ピークが完全に抑えられていることが確認できる。また、セルフセンシング出力が変位センサ出力にほぼ追従しているということが確認された。

図 13 と 14 のセルフセンシング制御時の測定結果は、変位センサ制御に比べ、共振における減衰特性が悪化していることが確認された。この原因は、永久磁石の影響によりセルフセンシング出力が微小に変動するため、変位センサ制御に比べ制御が不安定化しやすく、制御特性が悪化したためではないかと考えられる。しかし、変位センサ制御ほどではないが、セルフセンシング制御による浮上回転が可能であると思われる。

4.3 浮上回転実験 次に、本モータの浮上回転実験を行い、アンバランス応答の測定を行った。測定は、ロータの回転数を $100[\text{rpm}]$ ずつ上昇させていき、ロータの回転が安定したときに、回転数に同期した振

Fig. 15 Unbalance Response by Sensor Control

Fig. 16 Unbalance Response by Selfsensing Control

動振幅の最大値と最小値の差を測定した。変位センサ制御時、セルフセンシング制御時のアンバランス応答の測定結果をそれぞれ図 15, 16 に示す。また、ロータの触れ回りを確認するために、ロータの軌跡を測定した。変位センサ制御時、セルフセンシング制御時の測定結果をそれぞれ図 17, 18 に示す。測定結果から変位センサ制御時は、回転数の上昇に伴い、振動振幅が大きく減少していることが確認できる。そして、回転電圧の飽和する 3600[rpm] まで安定した浮上回転に成功した。

セルフセンシング制御時には、最高回転数は変位センサ制御までは至らなかったが、1800[rpm] までの浮上回転に成功した。また、アンバランス応答は非常に安定しているが、実際の振動波形は回転成分以外を含み、ある程度変動していることを図 18 のリサージュ波形が示している。セルフセンシング制御はセンサ制御と異なり、モータが回転することによって検出特性に影響を与え、不安定な変動を生じさせてしまったと考えられる。しかし、このような変動があっても、差動トランス方式の変位推定によって、セルフベアリングモータの浮上回転が実現可能であることを確認した。

今後の課題としては、セルフセンシング制御の安定性を改善し、高速での浮上回転を実現する。また、ロバストな制御手法の導入が必要であると考えられる。

Fig. 17 Orbital Trajectory by Sensor Control

Fig. 18 Orbital Trajectory by Selfsensing Control

まとめ

本論文では、差動トランス方式によるセルフベアリングモータのセルフセンシング化を研究した。まず、理論解析により差動トランス方式により変位推定が可能であることを導いた。そして、製作した実験装置を用いて実験を行った結果、別系統の検出巻線を用いた場合に、セルフセンシング制御により、最高1800[rpm]までの浮上回転に成功した。このことから、本方式によるセルフベアリングモータのセルフセンシング化が可能であるということが示された。

文 献

- (1) Y. Okada, et. al., Analysis and Comparison of PM Synchronous Motor and Induction Motor Type Magnetic Bearing, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31, No.5, September/October, 1995, pp.1047-1053
- (2) D. Vischer and H. Bleuler, A New Approach to Sensorless and Voltage Controlled AMBs Based on Network Theory Concepts, Proc. of 2nd Int. Symp. on Magnetic Bearings, July 12-14, 1990, Tokyo, Japan, pp.301-306
- (3) Y. Okada, K. Matsuda and B. Nagai, Sensorless Magnetic Levitation Control by Measuring the PWM Carrier Frequency Component, Proc. of 3rd Int. Symp. on Magnetic Bearings, 1992, Alexandria, VA.
- (4) K. Matsuda et. al., Self-sensing Magnetic Bearing using the Principle of Differential Transformer, Proc of 5th Int. Symp. on Magnetic Bearings, August, 1996, Kanazawa, Japan, pp.107-112