電気学会研究会資料

The Papers of Joint Technical Meeting on Semiconductor Power Converter and Linear Drives, IEE Japan

半導体電力変換 リニアドライブ合同研究会

SPC-09-166~190 LD-09-056~080

2009年12月17·18日



The Institute of Electrical Engineers of Japan 東京都千代田区五番町 6-2

永久磁石の回転による磁路制御形磁気浮上機構の浮上性能の評価

岡 宏一* 孫 鳳(高知工科大学)

Performance of Magnetic Suspension System with Variable Flux Path Control Mechanism Using Rotary Actuator Koichi Oka*, Feng Sun, (Kochi University of Technology)

This paper describes a magnetic suspension system using a rotary motor with reduction gear and a disk magnet. In this suspension system, the suspension force is provided by a disk-type permanent magnet and is controlled by a magnetic flux path control mechanism, which rotates the disk magnet to change the flux passing through the suspended object. This suspension system can make the attractive force zero, change the polarity of the stator poles, and realize high gain suspension force generator. In this paper, suspension principle and the experimental prototype of this proposed system are introduced, the basic examinations using the prototype are examined, the modeling and simulation are carried out, and finally some suspension experiments for verifying the suspension performance are executed..

キーワード:磁気浮上,永久磁石,機械制御,回転形モータ,減速機構,可変磁路制御,浮上性能 (Magnetic Suspension, Permanent Magnet, Mechanical Control, Rotary Motor, Reduction Mechanism, Variable Flux Path Control, Suspension Performance)

1. はじめに

磁気浮上機構は,浮上体を非接触で支持でき,機械的な 接触がないため摩擦や塵埃の問題を発生しない.これらの 利点によって,高速回転のための軸受,磁気浮上列車,ク リーンルーム中の搬送装置などに利用されている.磁気浮 上機構には,様々な形式があるが,永久磁石を用いた磁気 浮上機構はコイルがなく,発熱の問題が無視できる.この 形式の磁気浮上機構は,浮上力として永久磁石の吸引力を 用いており,浮上力の調整方法には二つのものが考えられ る⁽¹⁾.それらは,(1)永久磁石と浮上体との間の空隙の長さ を制御する方法と,(2)磁気回路内にリラクタンス(磁気抵 抗)調整機構を設ける方法である.

方法(1)を利用した磁気浮上システムの例として、リニア アクチュエータを用いて永久磁石と強磁性体との間に働く 吸引力を制御する方式を用いた懸垂型磁気浮上機構⁽²⁾⁻⁽⁴⁾ や、永久磁石の反発力を用いた磁気軸受⁽⁶⁾がを提案されて いる.これらの磁気浮上システムは、永久磁石の発生力を 調整できない、装置の磁極を変えられない、浮上体が一度 吸着してしまうと制御できないなどの欠点がある.

方法(2)を応用した磁気浮上システムの例として,磁歪素 子と圧電材料を用いて磁路を制御する磁気浮上装置⁽⁶⁾⁽⁷⁾, 磁路中に挿入した強磁性体の位置を変化させることによっ て永久磁石から浮上体に到達する磁束の大きさ,方向を変 化させることにより,浮上力を調整する磁気浮上装置⁽⁸⁾⁽⁹⁾ などが提案されている.しかし,これらの磁気浮上装置 は,磁極を変えることができない.

本研究は、円板磁石と回転モータを用いて浮上システム を構成することを提案する.この浮上システムは、回転モ ータに取り付けられた円板磁石の回転角度を制御すること により、円板磁石が発生した磁束の経路を変更し、浮上力 を制御するものである.円板磁石の回転角度を変えること により、磁束の大きさだけでなく、向きも変化させること が可能である.さらに、回転モータには減速機構が取り付 けられているため、モータ電流に比較して大きな浮上力を 得ることができる.

本論文では、まず円板磁石を用いた浮上原理を説明す る.次に、試作装置を紹介し、浮上システムの特性を考察 するため、試作装置を用いて発生する磁束密度と吸引力を 計測し、それらの結果を示す.次に、試作装置のモデル化 と浮上のための数値シミュレーションを行う.最後に、本 機構の浮上性能を示すための浮上実験の結果を示す.

2. 回転モータを用いた可変磁路制御形浮上機構

提案する可変磁路制御形磁気浮上機構の原理を図1に示 す.この磁気浮上機構は、円板磁石と二つの**F**字型の強磁 性体コアと直方体の浮上体から構成されている。円板磁石 は、ある 90 度の部分が N 極、反対側の 90 度が S 極である と仮定する。

まず,図 1(a)のように円板磁石の N 極が真上に、S 極が 真下にあるとき(この状態の円板磁石の角度を0°とする), 上部の N 極から出発した磁束の半分は右側のコアに、半分 は左側のコアに流れ込むと考えられる.これらの磁束は各 コアと S 極が面した部分から S 極に入る.よって、円板磁 石からの磁束は浮上体を通過することはない.従って、コ アと浮上体間では吸引力は発生しない.

次に、図 1(a)の状態から、円板磁石が右に回転したとき の様子を図 1(b)に示す. この時,上部の N 極と面するコア の面積は,左側のコアより右側のコアの方が大きいので, N 極から流出する磁束は左側のコアより右側のコアの方が 多い.しかし,下部の S 極と面する左右のコアの面積関係 は,N 極側とは逆になっている.従って,左側のコアから 流出する磁束は全て左側のコアと面する S 極に入るが,右 側のコアで流出する磁束は二つの部分に分かれる.一部の 磁束は右側のコアと面する S 極に流れ,他の磁束は浮上体 を通って,左側のコアと面する S 極に流れる.コアと浮上 体間に磁束が流れるため、吸引力が発生する.

上記より,図1(a)の状態から90度までの間では、円板磁 石の回転角度が大きくなるに従って、浮上体を通過する磁 束が大きくなり、吸引力も大きくなる.このことから、円 板磁石の回転角度を制御することによって浮上力を調整す ることが可能であると考えられる.また、逆方向に円板磁 石を回転させることにより、磁束を逆に流すことが可能で あり、コアの磁極の極性を変化させることができる.

3. 試作装置と諸特性

〈3・1〉 試作装置 今回提案する磁路調整形磁気浮上 機構の概図を図2に,試作装置の正面から見た写真を図3 に示す.この浮上機構は,円板磁石,回転モータ,パーマ ロイのコア,直方体の浮上体,二つの渦電流センサで構成 される.装置の中央の円形のものは磁石であり,直径が30 mm,厚さが10 mm,直径方向上に磁極が磁化されてい る.この円板磁石はネオジウム磁石であり,垂直固定板の 裏側に取り付けてある回転モータによって回転駆動され る.回転モータは,ハーモニックドライブ機構を用いた DCモータであり,ハーモニックドライブ機構を用いた DCモータであり,ハーモニックドライブの減速比は50で ある.角度の検出用にエンコーダを用いており,その分解 能は360 p/r である.

円板磁石の両側にある二つの**F**字型のコアは、厚さが10 mm のパーマロイである.**F**字型のコアの下にある直方体 はパーマロイの浮上体である.パーマロイは、透磁率が非 常に高く、また保磁力が極めて低く残留磁気の影響が少な い.磁石の回転により、浮上力を調整する本提案機構で は、残留磁気の影響が少ないことは、浮上力をゼロに設定 するために重要な要素である.

回転モータにより, 円板磁石の回転角度を制御し, 磁路



図1 回転形磁石を用いた可変磁路制御形磁気浮上機構の 浮上力調整の原理

Fig. 1. Principle of changing suspension force of variable flux path control system using rotary magnet



Fig. 2. An illustration of the prototype suspension system using variable flux path control mechanism



図3 試作装置の写真 Fig. 3. Principle of changing suspension force of variable flux path co

を制御する. それにより,浮上体とコアとの間の吸引力を 調整する. 浮上体下の二つの渦電流センサは,精度が 10 µm のものであり,浮上体の位置を測定する.

(3・2) 制御システム 磁気浮上システム全体の構成 を図4に示す.コントローラは二つの PD コントローラか ら構成されている. AD 変換器によってデジタル化した二 つの渦電流センサの信号と回転モータのエンコーダからの 回転角度信号はコントローラに入力される. その信号に基 づいて DSP は演算を行い適切な回転モータの電流を計算す る. その結果は, D/A 変換器を通して回転モータへの電流 信号として出力される.

コントローラは, PD コントローラを用いた. 永久磁石 の回転は, 浮上体の位置信号に基づいた PD フィードバッ クと永久磁石の回転角度の信号に基づいた PD フィードバ ックの2つのループにより制御される.

〈3・3〉磁東密度の測定 提案した磁気浮上システムにおける浮上力の変化を確認するため、浮上体とコアとの空隙距離や円板磁石の角度を変化させたときの磁東密度と吸引力の測定を行った。測定のためにガウスメータと力センサを用いた。測定方法は、円板磁石と両コアの距離を2mm に調整し、コアと浮上体の間隔を1mmごとに変化させ、円板磁石の回転角度を10°ごとに回転させ計測した。空隙距離は、磁東密度の測定では3 mm から8 mm までを測定した。

磁束密度の測定結果を図5と図6に示す.図5は磁束密 度と円板磁石の回転角度の関係である.図からわかるよう に、磁束密度は、円板磁石の回転によりほぼ正弦波状に変 化している.また、左右コアの磁束密度は正負が逆となっ ており、浮上体を通る磁束の方向が逆になっていることが わかる.この結果、提案した磁気浮上機構によりコアの磁 極の極性を変化させられることが確認できた.しかし、磁 束密度がゼロになる点の円板磁石の角度は左右のコアで少 し違いが見られた.

図 6 は浮上体とコアの空隙と磁束密度の関係を示してい る. 図からわかるように、磁束密度は、円板磁石の回転角 度と空隙によって変化することがわかる. 距離が小さくな ると、磁束密度は大きくなる. その関係より、磁束密度 は、ほぼ浮上体とコアの距離に反比例することがわかっ た.

〈3・4〉 吸引力の測定 吸引力の測定結果を図7に示す.浮上体とコアとの空隙をパラメータとして,磁石の角度が変化したときの吸引力を示している.図からわかるように、円板磁石の回転角度が0°または180°であるとき、つまりN極とS極が上下方向にあるとき、吸引力はほぼ0になっていることがわかる.また、角度が90°と270°のとき、吸引力が最大値になっている.

しかし,図 7 を詳細に観察すると吸引力が最小値になる 点で 0 となっていないことがわかる.このことは,磁束密 度を計測した図 5 の結果の左右の磁束密度が 0 になる地点 がずれていることとも合致する.円盤磁石とコアの距離を 2mm から 8mm に変化させて吸引力を計測した結果を図 8 に示す.円盤磁石とコアの距離を大きくすることにより吸 引力の最小値が大きくなっていることがわかる.このこと により吸引力が 0 にならない理由は,磁束の漏れが影響し ているのではないかと推測される.



図4 浮上システムの構成

Fig. 4. Configuration of suspension system











このことを確認するために、(株)エルフのエルフマジッ

クを用いて、磁石角度が 0 であるときの磁束の分布を解析 した.結果を図 9 に示す.図はわかりやすいように計算結 果を拡大し、コアの下部と浮上体を通過する磁束だけを示 してある.図からわかるように磁石のNSが上下方向であ っても、コアが解放している点から磁束が漏れており、そ の磁束が浮上体を通過していることが確認できる.

以上の結果,浮上体に働く吸引力を完全に 0 にすること はできないが,円板磁石の回転角度により,浮上体の支持 力を調整することは可能であることがわかった.

4. モデル化と数値シミュレーション

(4・1) 浮上力のモデル化 試作装置を用いた磁束と吸引力の測定結果に基づいて磁気浮上システムのモデル化を行った.モデル化のために磁束の漏れはないと仮定した.このとき図6の結果に基づいて浮上体中を通る磁束 Qは、モータ回転角度 θ と浮上体とコアの空隙 d により次式のように表すことができる.

ただし、k1は比例定数である.吸引力は空隙を通過する磁 束の自乗に比例すると考えられるため、(1)式の結果より、 吸引力 f は, k2, km を比例定数として次式で表される.が できる.

$$f = k_2 Q^2 = k_m \frac{\sin^2 \theta}{d^2}$$
(2)

この結果は、図7の結果と比べることによって妥当であると考えることができる.また km の値は、図7の結果から 18.4x10-6 (Nm²) と確認された.

〈4・2〉 モータと浮上体の運動方程式 今回のモデル 化ではモータの回転は、永久磁石の角度の影響を受けない と仮定して、次式のように電流から磁石角度への方程式を 求めた.

 $J\ddot{\theta} = c\dot{\theta} \Box k_t i \qquad (3)$

ただし、*J*は永久磁石部などを考えた等価慣性モーメント、*c*はモータの軸などに発生する減衰件数、*k*_tは減速比を考えた等価トルク定数である.また、浮上体の運動方程式は吸引力を*f*として以下のように表すことができる.

 $m \ddot{z} = f - mg \qquad (4)$

〈4・3〉 数値シミュレーション 上記のモデルを用い て、浮上システムの数値シミュレーションを行った.シミ ュレーションは、0.2秒のときに1mmのステップ入力を加 えたときの応答を1 秒後まで記録した.シミュレーション の結果を図10に示す.図は上から回転モータの電流、磁石 の回転角度及び浮上体の位置を示す.図から分かるよう に、ステップ応答の前後で安定浮上が実現されている.こ れより、提案した磁気浮上システムの安定浮上が示された といえる.







cores and permanent magnet is expanded





5. 試作装置における浮上実験

〈5・1〉 リニアレールを用いた浮上実験 試作した磁 気浮上機構を用いて直方体の浮上体を完全な非接触状態で 浮上させる実験を行った.しかし,試作装置では,左右コ



図 10 浮上時のステップ応答のシミュレーション結果 Fig. 10. Step response during suspension state

アの発生力が等しくないために、安定浮上できなかった. その対策として、直方体の浮上体をリニアレールに取り 付け、浮上体を上下の自由度だけに制限して浮上実験を行 い、これに成功した.この浮上体の重量は232gである.

リニアレールを用いた浮上写真を図 11 に示す.また,浮 上の安定性を評価するためにステップ応答の実験を行っ た.実験は,浮上体に下方向への 0.2 mm のステップ入力 を加え,2秒までの応答を記録した.結果を図 12 に示す. 上から回転モータへの入力電流,円板磁石の回転角度,及 び浮上体の変位を示している.ステップ入力の前後で,安 定浮上が実現されている.磁石の回転角度は,まず,安定 状態から小さくなり,浮上力を小さくし,浮上体を下方向 に移動させる.その後,回転角度を大きくし,安定状態に なっている.最後の角度は,ステップ入力前より大きくな った.変位後の浮上体とコアとの空隙が大きくなったため である.さらに,ステップ入力前後の定常状態では,回転 モータの入力電流がほぼゼロになっている.

〈5・2〉 浮上体の質量を変化させたときの浮上実験 つぎに提案した浮上システムの性能評価のために、浮上体 の質量を変化させたときのモータ電流の変化を調べた.永 久磁石の参照位置を 40°とし、浮上体の質量を変化させて モータに流れる電流を測定した.なお、計測は浮上が安定 した点で行い、またのときの永久磁石の角度が 40°となる ように浮上体位置を調整した.

結果を図13に示す. 図に示すように浮上体の質量が重く なるにつれてモータの電流が増えていることがわかる. こ のことは浮上体の重量がモータのトルクに影響を与えてい ることを示している. つまり, 浮上機構の磁場のポテンシ ャル力がモータに影響している.

また,浮上体の重量が0のとき(浮上体をコアの下から 取り去った場合)でもモータには電流が流れている.この



図 11 リニアレールを取り付けた浮上装置 Fig. 11. Suspension mechanism with linear rail



Fig. 12. IEM analysis when magnet angle is 0



Fig. 13. Relationship between mass of suspended object and motor current

場合も磁場のポテンシャルが永久磁石を回転させるトルク を与えているためである.このことを確認するために、浮 上体がないときに永久磁石を回転させたときに、どの程度 の電流が流れるかを調べた結果、永久磁石の回転によりモ ータの保持トルクのための電流が変化することがわかった.これは磁場が変化しポテンシャルによるトルクが変化 するためであると考えられる.

以上のように永久磁石の角度および浮上体の重量は、モ ータのトルクに影響を与えることが確認された.このこと は、現在のモデルは(3)式のようにこれらの項を考慮してお あらず図 10 のシミュレーション結果にも影響を与えている と考えられる.

6. おわりに

本論文では、円板磁石と回転モータを用いた磁気浮上シ ステムを提案した.まず、磁路調整形磁気浮上原理を説明 し、試作の浮上装置を設計・製作した.次に、試作装置の 特性を知るため、コアの吸引力と磁束密度などの基礎実験 を行った.次に、モデル化と数値シミュレーションを行 い、最後に、試作装置により、リニアレールを用いた直方 体の浮上体を浮上させる実験と鉄球を非接触で浮上させる 実験を行った.以上の結果によって、今回提案した浮上シ ステムにおいて得られた知見は下記のようにまとめられ る.

(1)回転モータに取り付けられた円板磁石の回転角度を 制御することにより、円板磁石が発生した磁束の経路を変 更し、浮上力を制御が可能である.

(2) 円板磁石の回転角度の変化により,磁束の大きさだけでなく,向きも変化させることが可能なため,磁極の極性を変化させることが可能である.

(3) 円板磁石を一定の回転角度に回転させると、浮上力 をほぼゼロにすることができたが、漏れ磁束のために完全 にゼロにすることはできなかった.

(4)提案した可変磁路制御形磁気浮上機構を用いて安定 浮上に成功した.

(5)回転モータには減速機構が取り付けられているため、モータ電流に比較して、重量物の浮上体を非接触で支持できることを浮上実験により確認した.

(6) 永久磁石の角度および浮上体の重量はモータのトルクに影響をおよぼすことがわかった.

今後の課題としては、モデルの改良を行うことと、どの 程度の重量の浮上体の支持が可能かについて検証を行うこ とである.

文 献

- (1) Oka K. and Higuchi T., Magnetic Levitation System by Reluctance Control: Levitation by Motion Control of Permanent Magnet, International Journal fo Applied Electromagnetics in Materials, Vol. 4, pp.369:375. (1994)
- (2) Oka, K., Higuchi, T. and Shiraishi, T., Hanging Type Mag-lev System with Permanent Magnet Motion Control, Electrical Engineering in Japan, Vol. 133, No. 3, pp.63[.]70, (2000)
- (3) Sun F. and Oka K., Zero Power Control for Hanging Type Maglev System with Permanent Magnet and VCM, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 75, No.753 pp 1383-1388(2009)

- (4) Fujiwara Y., Cui T.S., Chen L and Oka K., Manipulation by Linear Driving Permanent magnet -Rotation Control of Ironball-, The Japan Society Applied Electomagnetics and Mechanics, Vol. 14, No. 1, pp.126-131. (2006)
- (5) Mizuno T., Sekiguchi H. and Araki K., Repulsive Magnetic Bearing Using Motion Control of Permanent Magnets (Stabilization in the Axial Direction), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 64, No.628, pp. 187-192. (1998)
- (6) Ueno T., Qiu J., Tani J., Magnetic Force Control Based on the Inverse Magnetostrictive Effect, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.40, No.3, pp.1601-1605. (2004)
- (7) Ueno T., Qiu J., Tani J., Magneto-Electric Composite Element of Giant Magnetostrictives and Piezoelectric Matrerials and Its Application of Magnetic Force Control to Magnetic Levitation System, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 67, No.658, pp. 1897-1904, (2001)
- (8) Mizuno T., Hoshino H., Takasaki M. and Ishino Y., Proposal and Basic Experimental Study of Flux Path Control Magnetic Suspension, Transactions of the Japan Society Applied Electromagnetic and Mechanics, Vol. 14, No.3, pp. 346-352. (2006)
- (9) Mizuno T., Hirai Y., Ishino Y. and Takasaki M., Flux Path Control Magnetic Suspension -Development of a System Using Voice Coil Motors- Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 72, No.721, pp. 185-192. (2006)