

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289064

研究課題名(和文) 単一パワーモジュール駆動式磁気浮上モータシステムの基盤構築

研究課題名(英文) Development of Magnetically Levitated Motor System Using One Three-phase Power Module

研究代表者

朝間 淳一 (Asama, Junichi)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：70447522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)： 磁気浮上モータシステムの小型化，低消費電力化，簡素化，低コスト化を目指し，三相インバータ1台のみで駆動するシステムの基盤構築を目的とし，異なる3種類の基本的な概念を提案した．1つ目は，d軸電流で支持力を発生させる1自由度制御形ベアリングレスモータ，2つ目は，三相Y結線の midpoint と電源 midpoint に接続された負荷(零相)を磁気浮上に利用するシステム，3つ目は，零相電流を単相モータ駆動に利用し，三相で磁気浮上を行う2自由度制御形ベアリングレスモータである．いずれの構成においても，理論計算および有限要素法による設計，テスト機の製作，および性能評価試験を行い，提案構造・制御システムの有用性を実証した．

研究成果の概要(英文)： For further downsizing, energy saving, simplification, and cost reduction, three types of new structures and topologies for a magnetically levitated motor system have been developed. Type 1: a single-drive bearingless motor which employs only one three-phase inverter and one set of three-phase winding, where a d-axis current produces suspension force. Type 2: a magnetic bearing motor system using a zero-phase current for 1-DOF controlled magnetic suspension. The zero-phase is connected between the neutral point of the star connected three-phase winding and the middle point of the power source. Type 3: a 2-DOF controlled bearingless motor using zero-phase current for single-phase motor drive. The three-phase winding is used for 2-DOF magnetic suspension. In all types, experimental apparatus and machines were built and tested. The test results have demonstrated the usefulness and effectiveness of the proposed novel three concepts of the magnetically levitated motor system.

研究分野：知能機械学・機械システム

キーワード：ベアリングレスモータ 磁気軸受 磁気浮上 永久磁石モータ 零相電流 電気機器 パワーエレクトロニクス 精密メカトロニクス

1. 研究開始当初の背景

過去の磁気浮上モータでは、回転・浮上用に複数のパワーモジュールが必須であった。これに対し、応募者はこれまでに、システム全体の小形化・低消費電力化・低コスト化を目指し、パワーモジュール1台のみで駆動する磁気浮上モータを世界で初めて実現した。図1に、三相パワーモジュール1台のみで駆動するベアリングレス磁気浮上モータの構造を示す。回転子は円筒形状で、両端に永久磁石が貼り付けられている。固定子は、回転子の両側に配置される。一方は鉄のみで、他方に三相コイルが施されている。軸方向の1自由度のみ能動的に制御し、回転以外のその他の自由度は、固定子-回転子間に作用する磁気力により受動的に支持される。1自由度制御で、三相インバータ1台から三相巻線1組のみを使用することから、「シングルドライブベアリングレスモータ (SDBeIM)」と名付けた。図2に、SDBeIMの巻線構成を示す。一般的な三相モータと同じである。異なる点は、界磁調整用のd軸電流で軸方向支持力を制御する点である。トルクは、一般的な得旧磁石モータと同用、q軸電流で制御する。しかし、この円筒形回転子の場合、(1)負荷を取り出す方法が困難で、産業応用用途には、不向きな構造であり、(2)さらなる汎用性の拡大、および(3)制御自由度の拡張、が問題点、課題として残っている。

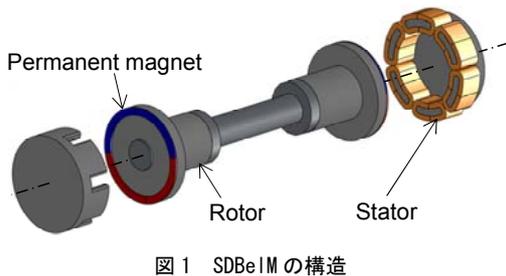


図1 SDBeIMの構造

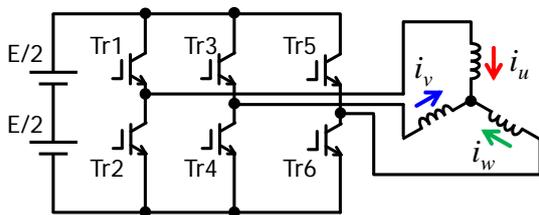


図2 SDBeIMの結線 (通常のもータと同じ)

2. 研究の目的

本研究では上記の問題点、課題の解決と「単一パワーモジュール駆動式磁気浮上モータシステムの新コンセプトの提案・実証およびその基盤構築」を目的とする。本研究は三相パワーモジュール1台で磁気浮上回転を試みる点で先駆的・独創的であり、応募者が世界をリードしてその基盤を構築する。また、得られた研究成果を世界に向けて発信する。

3. 研究の方法

先述した問題点(1)の解決案として、図3に示す新しいSDBeIMの構造を提案した。アキシシャルギャップ形コアレスモータと、反発形永久磁石対から構成される。三相のd軸電流で軸方向支持力を制御し、位置決め制御を行う。一方、反発形永久磁石で、並進と傾きの4自由度を受動的に支持する。回転子の外周に、例えば羽根を取り付けることで、三相インバータ1台のみで駆動可能なベアリングレスファン・ブローが実現できる。

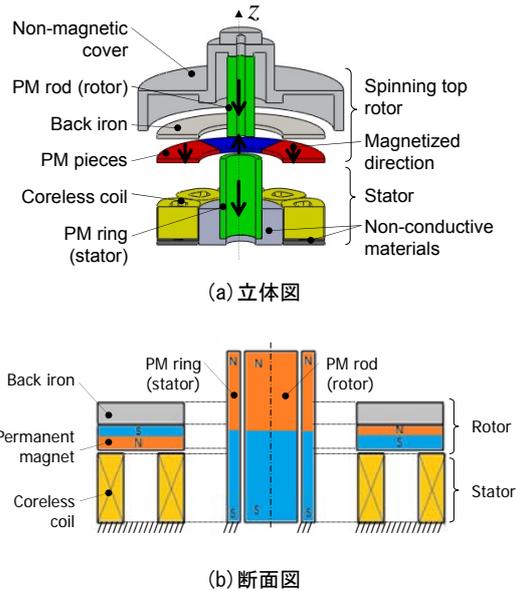


図3 新しいSDBeIMの構造

次いで、先述の(2)と(3)の解決案として、図4に示す、新しいモータ結線方法を提案する。一般モータの駆動に用いられる三相巻線の中性点と、パワー回路の電源中点を結線する。この部分を流れる電流を零相電流と呼び、この零相電流を磁気浮上モータシステムに応用する。(2)の汎用性の拡大の方法として、零相電流を磁気浮上制御力用の電流に利用する磁気浮上モータシステムを提案する。(3)のさらなる制御自由度の拡張として、零相電流を単相モータ用電流に利用することで、回転子の半径方向2自由度の能動位置決め制御と駆動が可能なベアリングレスモータを提案する。

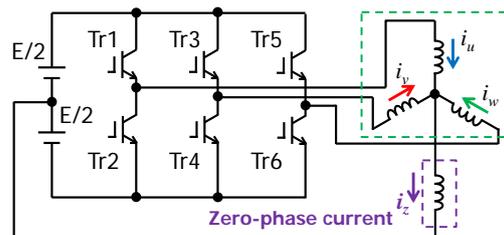


図4 零相電流を利用した新しい回路構成

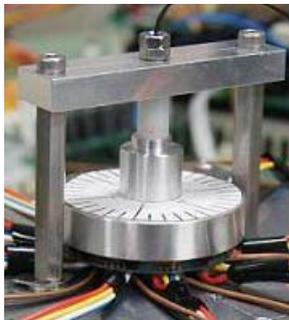
4. 研究成果

(1)新しい SDBelM

図5に、試作した SDBelM を示す。9 スロット 6 極構造で、回転子の直径は約 50mm である。回転子および反発形永久磁石対に使用している磁石は全てネオジム磁石である。コアレスコイルの下側に、角度検出用のホール素子を配置した。また、回転子の軸方向変位の検出として、渦電流式の非接触変位計を、回転子上側に配置した。図6に、5000rpm 時の回転子の軸方向の振動波形を示す。回転子振動は $20\mu\text{m}$ 以下であった。さらなるトルクリプルおよび支持力リプルを低減するために、まず、理論的にトルクと支持力を導出した。その結果、磁石が発生する磁束密度分布の第5次、第7次高調波がトルクと支持力の脈動に起因することを明らかにした。その結果を基に、新たに高調波を低減するための磁石構造を提案した。磁石間に隙間を設けることで、磁石磁束の第5次、第7次成分を低減する。この試作機を用いて駆動実験を行い、最大 10000rpm までの磁気浮上回転を確認した。



(a) 回転子と固定子



(b) 組立てた SDBelM



(c) 改良した回転子

図5 試作した SDBelM

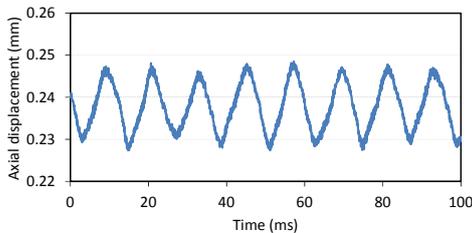


図6 5000rpmにおける回転子の軸方向振動波形

(2) 零相電流を磁気浮上制御力用の電流に利用する磁気浮上モータシステム

図4に示す回路において、零相電流を磁気

浮上制御力に利用するシステムを提案する。このシステムでは、一般的な永久磁石モータの駆動に利用される三相インバータ1台のみを用いて、つまり、追加のパワーアンプ（スイッチング素子）無しで、1自由度の磁気浮上制御を追加することができる。本研究では、基礎的な原理検証として、図7に示すように、高効率埋め込み永久磁石（IPM）モータと、鉄球磁気浮上装置（1自由度の磁気軸受を模擬）から構成されるシステムで検討を行う。まず、システムの電圧電流方程式を導出し、零相電流を三相電流とは独立して制御可能な制御システムを構築した。実験装置は、1.2kW 三相永久磁石モータと、鉄球（直径 50mm）磁気浮上装置から構成され、三相パワーモジュール1台のみで、永久磁石モータのベクトル制御と鉄球磁気浮上を実現している。

本システムにおいて、モータ負荷時の磁気浮上位置決め精度が悪化する問題が発生したため、オブザーバを用いた零相の電圧外乱の推定・補償を試みた。磁気浮上用電磁石の電圧から電流までの伝達関数を測定、多項式近似し、外乱オブザーバに組み込むことで、鉄球の位置決め精度を改善した。モータ負荷時の浮上位置決め精度が悪化する原因を詳細に検討した。さらに、詳細な振動解析とさらなる位置決め精度改善を図った。その結果、磁気浮上制御系の振動は 1f および 3f (f: モータ駆動周波数) が顕著であった。3f 振動の原因は、モータの PWM 駆動による零相電圧変動（電圧外乱）が、1f 振動の原因は、三相負荷不平衡（電圧外乱）および電流センサ検出誤差（電流外乱）であることを明らかにした。これに対して、外乱オブザーバを用いて電圧外乱を、電流検出方法を uvw 相検出から uvz 相検出とすることで電流外乱を補償し、最終的には、図8に示すように、モータ負荷時に $10\mu\text{m}$ 以上であった位置決め精度を、無負荷時と同等の数 μm レベルに低減した。



図7 IPM モータと鉄球磁気浮上装置

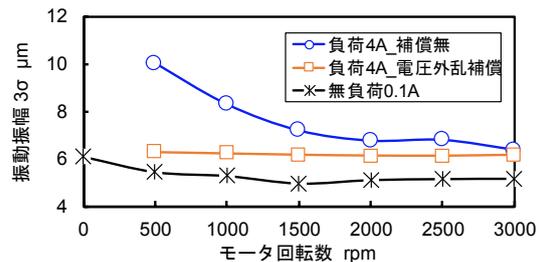


図8 補償の有無による鉄球振動振幅比較

(3) 零相電流を単相モータ用電流に利用する磁気浮上モータシステム

図4に示す回路において、三相巻線で回転子の半径方向2自由度の能動位置決め制御、零相電流で単相モータの制御を行うベアリングレスモータを提案する。まず、単相モータに支持巻線を巻回するシンプルな2自由度能動制御形ベアリングレスモータ構造を提案し、その固定子の歯形状が支持力に及ぼす影響およびコギングトルクと発生トルクに及ぼす影響を、三次元有限要素法により解析し、磁気飽和を解消することで支持力・トルク波形のひずみが解消されることを確認した。

提案構造・制御方法を実証するために、6スロット6極の2自由度制御形単相ベアリングレスモータを設計、試作した。図9に試作したベアリングレスモータを示す。回転子は直径58mm、高さ5mmのアウターロータ形で、固定子には、三相4極の磁気浮上巻線と、単相6極のモータ巻線が施されている。実験により、本試作機は、三相パワーモジュール1台のみを用いて、磁気浮上回転が可能であることを示した。図10に、8000rpmにおける回転子の半径方向の振動波形を示す。振動振幅は、 3σ で50 μ m以下であった。次いで、試作機を用いて性能評価を行った。まず、回転角度による支持力変動を補償し、振動低減を図った。次いで、アンバランス補償を行い、10000rpmまで低消費電力で回転が可能であることを示した。最後に、非接触式の渦電流ブレーキを製作して負荷試験を行い、浮上電力を含めて75%のモータ効率であることを示した。

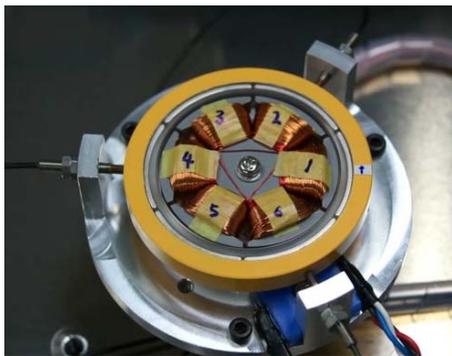


図9 三相インバータ1台で駆動可能な2自由度制御形ベアリングレスモータ

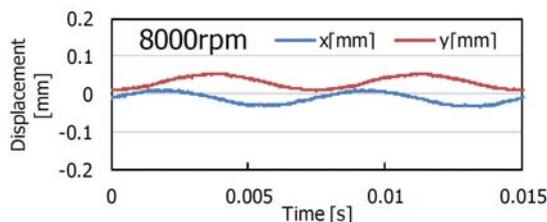


図10 8000rpmにおける回転子の半径方向振動波形

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① J. Asama, H. Suzuki, and T. Oiwa, “Development of a Magnetically Suspended Double-Layered Cylinder with 1-DOF Active Positioning Control”, *Mechanical Engineering Journal*, 査読有, Vol. 3, No. 1, paper No. 15-00544, 2016.
- ② J. Asama, Y. Fujii, T. Oiwa, and A. Chiba, “Novel Control Method for Magnetic Suspension and Motor Drive with One Three-Phase Voltage Source Inverter Using Zero-Phase Current”, *Mechanical Engineering Journal*, 査読有, Vol. 2, No. 4, paper No. 15-00116, 2015.
- ③ H. Sugimoto, S. Tanaka, A. Chiba, and J. Asama, “Principle of a Novel Single-Drive Bearingless Motor With Cylindrical Radial Gap”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 査読有, Vol. 51, No. 5, pp. 3696-3706, 2015.

[学会発表] (計17件)

- ① J. Asama, T. Oi, T. Oiwa, and A. Chiba, “Investigation of Integrated Winding Configuration for a Two-DOF Controlled Bearingless PM Motor Using One Three-Phase Inverter”, the IEEE International Electric Machines and Drives Conference, May 21-24, Hilton Hotel, Miami, FL, USA, 2017.
- ② Y. Fujii, J. Asama, T. Oiwa, and A. Chiba, “Positioning Accuracy Improvement of Active Magnetic Suspension Using Zero-Phase Current”, the 16th International Conference on Precision Engineering (ICPE), November 14-16, Act City, Hamamatsu, Japan, 2016.
- ③ J. Asama, T. Oiwa, and A. Chiba, “Radial Force Investigation of a Bearingless PM Motor Considering Spatial Harmonics of Magnetic Flux Distribution”, the 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), November 13-16, Apa Hotel & Resort Tokyo Bay Makuhari, Chiba, Japan, 2016.
- ④ J. Asama, K. Takahashi, T. Oiwa, and A. Chiba, “Reduction in Torque and Suspension Force Ripples of an Axial-Gap Single-Drive Bearingless Motor”, the IEEE Energy Conversion Congress and Expo (ECCE) 2016, September 18-22, Milwaukee Convention Center, Milwaukee, WI, USA, 2016.
- ⑤ J. Asama, T. Oi, T. Oiwa, and A. Chiba,

- “Simple Driving Method for a Two-DOF Controlled Bearingless Motor Using One Three-Phase Inverter”, the International Conference on Electrical Machines (ICEM) 2016, September 4-7, SwissTech Convention Center, Lausanne, Switzerland, 2016.
- ⑥佐々木健多, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, “パワースイッチング素子数を低減した 2 自由度制御形ベアリングレスモータの提案”, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 群馬大学荒牧キャンパス, 群馬県・前橋市, 8 月 30 日-9 月 1 日, 2016.
- ⑦柴田智考, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, “10 極 12 スロット表面磁石形ベアリングレスモータの性能改善”, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 群馬大学荒牧キャンパス, 群馬県・前橋市, 8 月 30 日-9 月 1 日, 2016.
- ⑧高橋一将, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, “1 自由度制御形アキシアルギャップベアリングレスモータの支持力・トルク脈動低減”, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 群馬大学荒牧キャンパス, 群馬県・前橋市, 8 月 30 日-9 月 1 日, 2016.
- ⑨J. Asama, K. Sasaki, T. Oiwa, and A. Chiba, “Simplified Configuration of a Two-DOF Actively Controlled Bearingless Motor Using Two H-Bridges”, Proceedings of the 15th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB15), August 4-6, Mojiko Hotel, Kitakyushu, Japan, 2016.
- ⑩藤井勇介, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, “零相電流を用いた磁気浮上モータにおけるモータ駆動が浮上系に及ぼす影響”, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 慶応大学日吉キャンパス, 神奈川県・横浜市, 5 月 18-20 日, 2016.
- ⑪藤井勇介, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, “零相負荷を考慮した磁気浮上形 PM モータの電圧方程式の導出”, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, 大分大学, 大分県・大分市, 9 月 2-4 日, 2015.
- ⑫大井匠, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, “三相インバータ 1 台による 2 軸制御形ベアリングレスモータ駆動の提案”, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, 大分大学, 大分県・大分市, 9 月 2-4 日, 2015.
- ⑬J. Asama, T. Suzuki, and T. Oiwa, “Development of magnetically suspended double-layered cylinder with 1-DOF active positioning control”, the 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micro-mechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2015), Jun 15-17, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, 2015.
- ⑭J. Asama, A. Mouri, T. Oiwa, and A. Chiba, “Suspension Force Investigation for Consequent-Pole and Surface-Mounted Permanent Magnet Bearingless Motors with Concentrated Winding”, the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC) 2015, May 10-13, Coeur d’Alene Resort, Coeur d’Alene, ID, USA, 2015.
- ⑮藤井勇介, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, “零相電流を用いた三相インバータ 1 台によるモータ駆動と磁気支持の実現”, 東京電機大学, 東京都・足立区, 8 月 26-28 日, 2014.
- ⑯J. Asama, Y. Fujii, M. Fukuyo, T. Oiwa, and A. Chiba, “Realization of Magnetic Suspension and Motor Operation with One Three-phase Voltage Source Inverter Using a Zero-Phase Current”, the 14th International Symposium on Magnetic Bearings, Aug 11-14, Johannes Kepler University, Linz, Austria, 2014.
- ⑰J. Asama, D. Watanabe, T. Oiwa, and A. Chiba, “Development of a One-Axis Actively Regulated Bearingless Motor with a Repulsive Type Passive Magnetic Bearing”, the 2014 International Power Electronics Conference, IPEC-Hiroshima 2014 -ECCE Asia-, May 18-22, International Conference Center Hiroshima, Hiroshima, Japan, 2014.

ホームページ等

静岡大学工学部機械工学科朝間研究室 :

<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~tjasama/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

朝間 淳一 (ASAMA, Junichi)
静岡大学・工学部・准教授
研究者番号 : 70447522

(3) 連携研究者

大岩 孝彰 (OIWA, Takaaki)
静岡大学・工学部・教授
研究者番号 : 00223727

千葉 明 (CHIBA, Akira)
東京工業大学・工学院・教授
研究者番号 : 30207287