

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03203

研究課題名(和文) 磁気浮上ベアリングレスモータの革新的インテグレーション化・高速化技術の確立

研究課題名(英文) Innovative Techniques for Integration and High Speed Drive of Magnetically Levitated Bearingless Motors

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) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：従来、磁気浮上巻線と電動機巻線が別々に固定子コアに施されていたベアリングレスモータにおいて、モータ構造の簡素化とトルク増加を図るため、巻線を1種類に統合する設計手法を確立し、さらにモータ駆動周波数5kHzでの高速駆動を、本研究目的とした、成果として、零相電流制御を基にした「3コイルのみを用いた2自由度制御形ベアリングレスモータ」および「四相統合巻線形ベアリングレスモータ」、さらには「三相埋込磁石形モータへの磁気支持力発生機能の統合・制御手法の提案」、および永久磁石を固定子側に配置し、直流・交流磁束を統合した「6極ベアリングレスモータの10万rpmでの駆動」を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、モータの小形化・高速化が加速しているが、高速化に伴い軸受損失が増加し、効率が低下する恐れがある。ベアリングレスモータは、軸受機能をモータに磁気的に統合することで、回転軸を磁気浮上させ、非接触で支持することができる。本提案手法を確立し、装置の大形化を回避しつつ、簡易にモータを非接触支持できれば、既存のモータへの適用範囲の大幅な拡張が予想され、環境負荷軽減と産業発展に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：Conventional bearingless motors have independent suspension and rotation windings in the stator core. For simplification of structure and an increase in torque and power of the motor, this research focuses on integration of the winding and the high speed drive at a driving frequency of 5 kHz. In this research, based on the previously proposed zero-sequence technique, a 2-DOF controlled bearingless motor with three-coils and a four-phase bearingless motor with integrated winding configuration, have been developed. In addition, integration of magnetic suspension function into a conventional interior permanent magnet motor has been proposed, and a six-pole bearingless motor that has combined DC and AC magnetic fluxes is driven at a rotational speed of 100,000 rpm (electrical frequency of 5 kHz).

研究分野：精密パワーメカトロニクス

キーワード：ベアリングレスモータ 永久磁石モータ 磁気浮上 パワーエレクトロニクス 高速モータ 磁気軸受
巻線統合 零相電流

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁気浮上モータは「磁気軸受+モータ」と「ベアリングレスモータ」に大別される。後者は、1ユニットでトルクと浮上力を発生可能で、1990年以降、東工大千葉らが固定子に回転用・磁気浮上用の2種類の巻線を施す方式を理論化し、様々なベアリングレスモータ構造が提案されてきた。同時期に、スイス連邦工科大学も研究を始め、2001年に同方式で半導体製造用ポンプを実用化している。近年、フィンランドのラッペンランタ大、ドイツのダルムシュタット大、北海道大等では、同方式ユニットを軸方向に縦列配置し、数十kW級の大形圧縮機の実用化研究を進めている。一方で、この2種類巻線方式は、浮上巻線の占有分だけ体積が増大するため、単位体積あたりの機械出力であるモータの出力密度の改善が課題として残る。

オーストリアのヨハネスケプラー大学、諏訪東京理科大等では、出力密度向上のため固定子に1種類の巻線のみを施し、複数のインバータを用いて回転用・磁気浮上用の電流を重畳する方式を提案している。この1種類巻線方式では、モータ出力密度は改善されるが、1ユニットあたりに多数のインバータを使用して2種類の電流を流すため、ドライブ回路が大形で高コストとなる恐れがある。

2. 研究の目的

研究代表者の過去の研究では、三相インバータ1台のみを用いた1種類巻線方式を考案していた。この方式では、一般的なモータ駆動に適用される $d-q$ 軸電流のベクトル制御手法における、 d 軸電流を磁気浮上力発生に利用している。インバータ1台、能動制御自由度が1のため、シングルドライブベアリングレスモータと称した。さらに、図1に示す回路構成のように、三相永久磁石モータのスター結線の中性点と電源中間点の間に、1自由度の電磁アクチュエータの固定子巻線を結線し、ここを流れる電流（零相電流）を制御することで、追加のインバータ無しで、1自由度の能動運動制御を追加することを提案した。しかしながら、パワードライブ回路を含めたシステム全体の簡素化・低コスト化は達成したものの、さらなるモータの高出力密度化・高効率化に課題が残っている状況にあった。

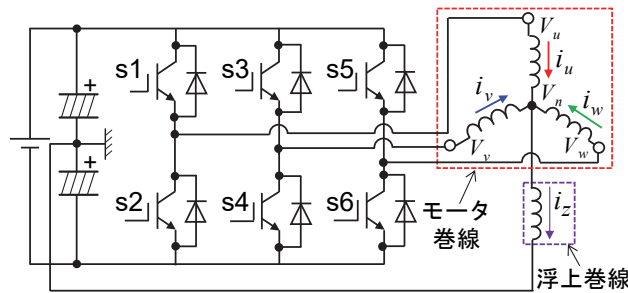


図1 零相電流を利用したモータ駆動システム回路構成

そこで、本研究では、これまでに研究代表者が提案したベアリングレスモータの小形化・簡素化・低コスト化技術を踏襲しつつ、モータシステムに巧みに統合することで、高出力密度化と高速化、および高効率化を図る。簡易で小形・高効率の非接触電磁機械システムの実現により、その適用範囲を拡張し、環境負荷軽減と産業の飛躍的な発展に貢献する。

3. 研究の方法

(1) 8スロット2極ベクトル制御形

図2に、パワー素子8個で半径方向磁気浮上制御と回転が可能な、8スロット2極のベアリングレスモータの回路構成とモータ構造を示す。モータ巻線（A相、B相）1種類のみで追加の浮上巻線は無い。各相の巻線中性点を電源中性点に接続し、浮上電流をモータ巻線に重畳する。例えば、 s_1 と s_4 をオンすると、モータ電流 i_{ma} が流れ、 s_1 と s_3 をオンすると、支持電流 i_{sa} が流れる。両電流を重畳し、制御することにより磁気浮上回転を実現する。

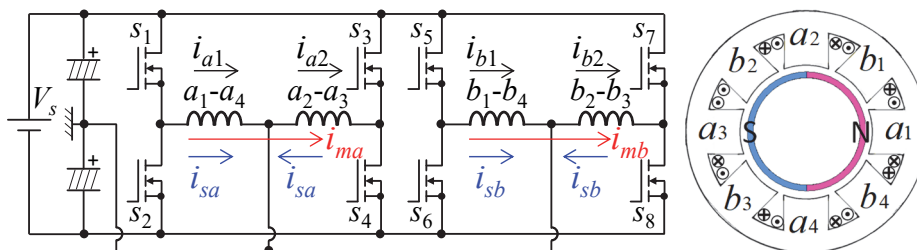


図2 パワー素子8個で半径方向磁気浮上制御と回転が可能なベアリングレスモータ

(2) 3 コイル 2 自由度制御形

図 3 に、3 コイルのみでラジアル方向の 2 自由度の能動位置決め制御と、回転が可能なベアリングレスモータの結線と構造を示す。支持用電流と電動機用電流を重畳し、3 コイルから構成される 1 種類の三相巻線のみを施した統合巻線構造である。これまでの、研究では、零相に電動機巻線を、三相に支持巻線を適用したため、電動機電流は支持巻線を通して、余分な銅損が発生していたが、本方式による統合巻線構造では巻線が 1 種類のみであるので不要な銅損は発生しない。

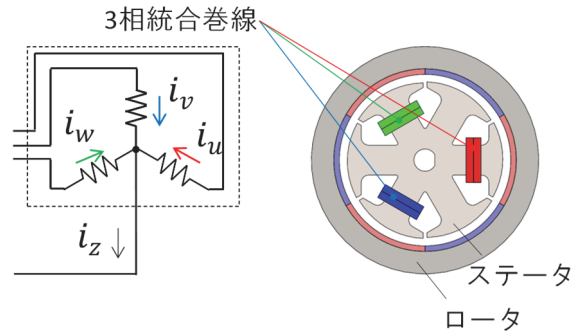


図 3 3 コイルのみでラジアル方向 2 自由度の能動位置決めと回転が可能なベアリングレスモータ

(3) 四相巻線統合形

図 4 に、12 スロット 10 極四相統合巻線形ベアリングレスモータの提案構造を示す。一般的な三相ブラシレス DC モータに利用されている構造の一つである 12 スロット 10 極のモータの巻線を分解して、図 4 右側の様に四相結線することで、図 2 の回路構成が適用可能で、さらに、モータのベクトル制御とラジアル方向の 2 自由度位置決め制御も同時に可能である。

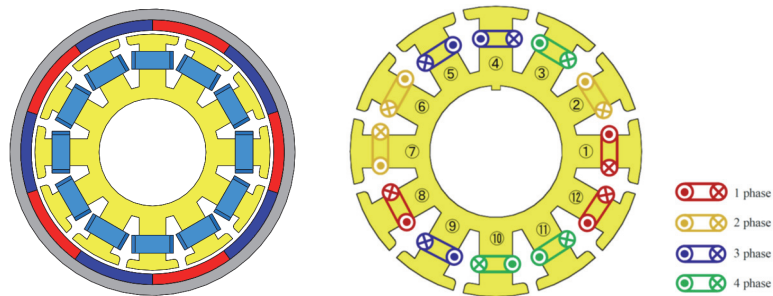


図 4 12 スロット 10 極四相統合巻線形ベアリングレスモータ

(4) 三相埋込磁石形

ハイブリッド自動車、電気自動車には、一般的に三相埋込磁石形永久磁石モータが使用されている。この埋込磁石形永久磁石モータに対して、ラジアル方向に支持力を発生させる機能を統合することで、ベアリング負荷低減によるシステムの小型化や振動低減が期待される。しかしながら、埋込磁石形ベアリングレスモータでは、モータ動作条件により磁気支持パラメータが変動し、高負荷時の磁気支持制御の報告例は見当たらない。そこで、一般的な埋込磁石形モータへの磁気支持力機能の統合手法の確立を目的とし、まずは、図 5 に示す、電気学会産業応用部門回転機技術委員会の調査専門委員会が設定したベンチマーク D1 モデルに対して、検討を行う。具体的には、三相巻線を疑似的に分割し、さらに上記(1)を参考に、高調波や磁気飽和考慮した数学モデルを構築する。

(5) 9 スロット 6 極ベアリングレスモータの超高速駆動

図 5 のような埋込磁石形の場合、永久磁石の漏れ磁束を低減するため、回転子鉄心の先端のブリッジをなるべく狭くする必要はあるが、高速回転時に応力が集中し、破損する恐れがある。そこで、図 6 に示すように、永久磁石を固定子に配置し、回転子が電磁鋼板のみで構成させる。永久磁石バイアス型のホモポーラベアリングレスモータを提案する。永久磁石の直流磁束と、モータ電流による交流磁束の重畳により、構造の簡素化を図った。このホモポーラ形ベアリングレスモータの 100,000rpm、すなわち電氣的な駆動周波数 5kHz での駆動を実現する。

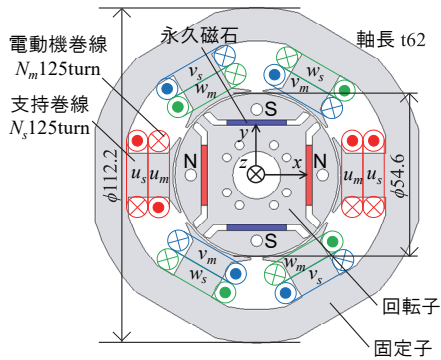


図5 電気学会の6スロット4極三相埋込磁石がモータ (D1モデル) への磁気支持力の統合

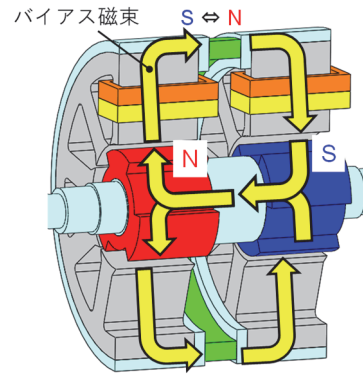


図6 直流磁束と交流磁束を磁気的に統合したホモポーラ形ベアリングレスモータ

4. 研究成果

(1) 8スロット2極ベクトル制御形

図7の左側に、試作したベアリングレスモータ (回転子直径 58mm) を示す。回転子に取り付けた磁石の磁束密度のアンバランスのため、1500rpm以上での回転が不可能であった。図7の右側に、1450rpm時の回転子変位波形を示す。今後は、振動低減と、さらなる高速化を図る。

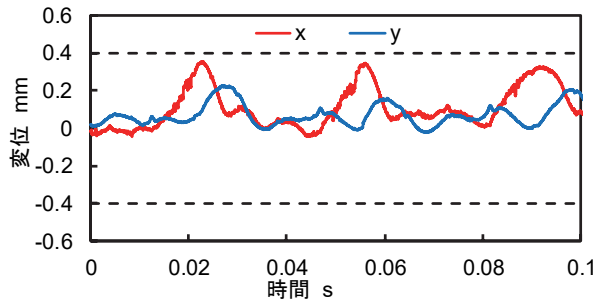
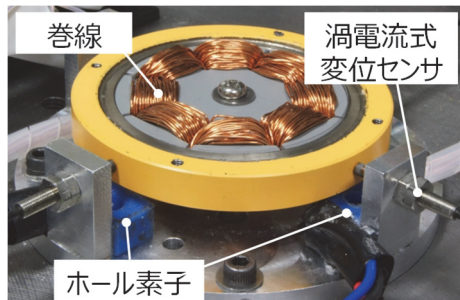


図7 8スロット2極統合巻線形ベアリングレスモータの試作機と1450rpmでの半径方向振動波形

(2) 3コイル2自由度制御形

図8に、3コイルのみで駆動可能な2自由度制御形ベアリングレスモータの試作機と、7000rpmまでの振動振幅を示す。6スロットの固定子の内、3歯に集中巻コイルを施し、支持電流と電動機電流を重畳している。モータ駆動は、固定子の歯を非対称とし、コギングトルクを積極的に利用する単相モータ駆動である。3コイルのみ、三相インバータ1台のみで、2自由度の位置決め制御と回転が可能な簡素な構造を実現した。

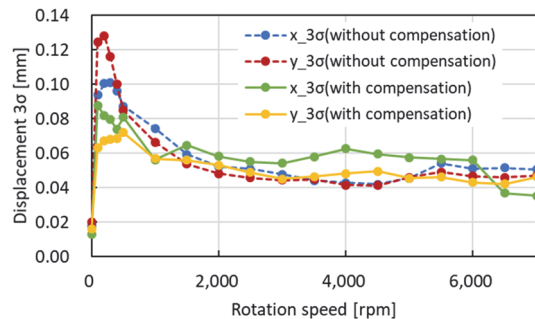
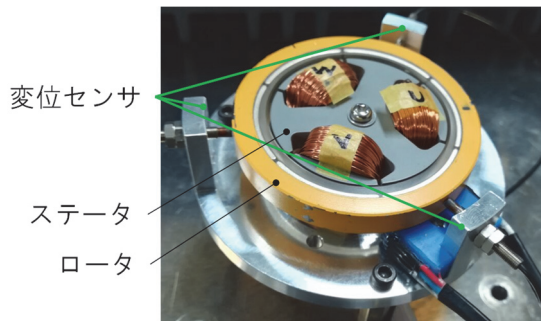


図8 3コイルのみで駆動可能なベアリングレスモータの試作機と振動振幅

(3) 四相巻線統合形

図9に、12スロット10極四相統合巻線形ベアリングレスモータの試作機と、5000rpmでの回転子の半径方向変位を示す。試作機は、原理検証のため、シャフトの片側を自動調心軸受にて指示、他端を磁気支持とし、回転子がピボット動作する構造とした。したがって、傾き方向の運動

モデルを構築し、慣性中心での回転を試みた結果、5000rpmまで回転が可能であったが、それ以降は電流の追従性が悪化し、回転ができなかった。このため、今後は、さらなる高速化を行う。

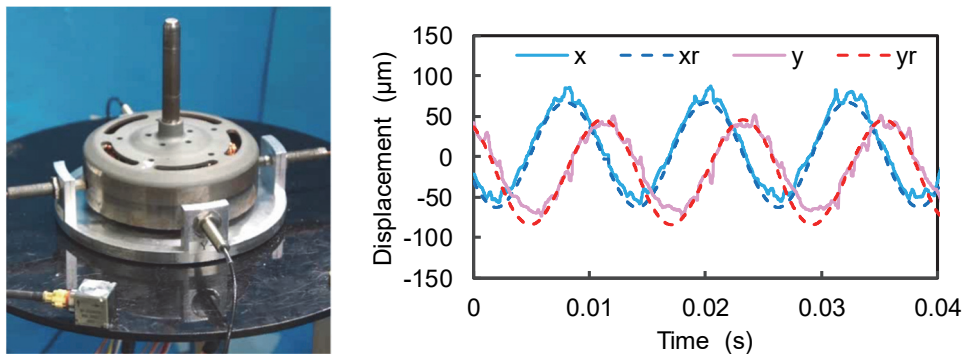


図9 12スロット10極四相統合巻線形ベアリングレスモータの試作機と5000rpmでの振動波形

(4) 三相埋込磁石形

電気学会D1モデルの三相埋込磁石形モータにおいて、磁気支持力発生機能を統合するために、起磁力と永久磁石磁束の空間高調波、および磁気飽和考慮した数学モデルを、理論計算と有限要素電磁界解析を基に構築した。図10に、 d 軸電流に-1.2A、 q 軸電流に4.6Aを供給し、 x 軸方向支持力指令値を14Nとしたときの、磁気支持力の電磁界解析による計算結果を示す。高負荷時でも安定した支持力発生を確認した。今後は、テスト機の製作、および実験を行う。

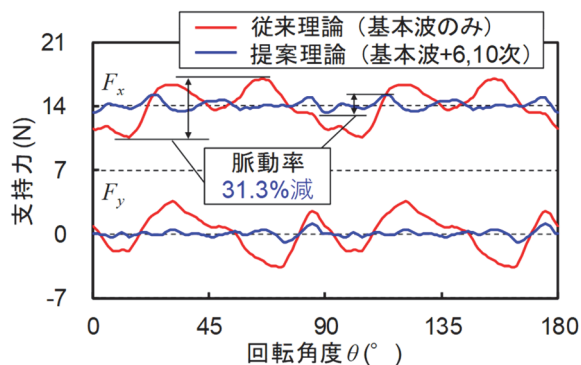


図10 三相埋込磁石ベアリングレスモータのトルク発生時 ($i_d=1.2A$, $i_q=4.6A$) の磁気支持力の計算結果

(5) 9スロット6極ベアリングレスモータの超高速駆動

図11に試作したホモポーラ形ベアリングレスモータのテスト機を示す。回転子の電磁鋼板は3突極で、直径は20mm、モータフレーム外径は74mmである。磁気支持制御には回転角度検出が不要で、磁気軸受のように位置のみフィードバックすることで、安定な磁気浮上制御が可能である。また、2ユニットを軸方向に縦列配置することで、片方をモータ、他方を発電機として動作させ、10万rpm (駆動周波数5kHz) までの負荷試験を行った。振動振幅は10rpmまで50μm以下と、安定な磁気浮上回転に成功した。

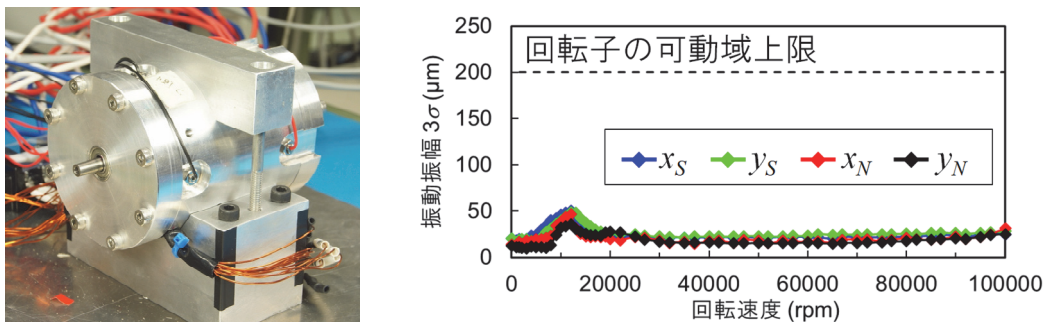


図11 ホモポーラ形ベアリングレスモータの試作機と10万rpmまでの回転子の振動振幅

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 MORI Kotaro, ASAMA Junichi, OIWA Takaaki, TORII Takao	4. 巻 85
2. 論文標題 Resonance avoidance for a 2-DOF controlled maglev motor using d -axis current	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 1818-00417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Asama Junichi, Oi Takumi, Oiwa Takaaki, Chiba Akira	4. 巻 54
2. 論文標題 Simple Driving Method for a 2-DOF Controlled Bearingless Motor Using One Three-Phase Inverter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 4365 ~ 4376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2018.2845405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Asama Junichi, Oiwa Takaaki, Shinshi Tadahiko, Chiba Akira	4. 巻 33
2. 論文標題 Experimental Evaluation for Core Loss Reduction of a Consequent-Pole Bearingless Disk Motor Using Soft Magnetic Composites	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Energy Conversion	6. 最初と最後の頁 324 ~ 332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TEC.2017.2738674	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujii Yusuke, Asama Junichi, Oiwa Takaaki, Chiba Akira	4. 巻 139
2. 論文標題 Positioning Accuracy Improvement for a Magnetically Levitated System Using Zero-Sequence Current of a Permanent Magnet Motor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 322 ~ 329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.139.322	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Junichi Asama, Tomotaka Shibata, and Akira Chiba
2. 発表標題 Asymmetrical Combined Winding for a Four-Phase Bearingless Motor
3. 学会等名 IEEE Energy Conversion Congress and Expo 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junichi Asama, Dai Suzuki, Takaaki Oiwa, and Akira Chiba
2. 発表標題 Development of a Homo-Polar Bearingless Motor with Concentrated Winding for High Speed Applications
3. 学会等名 2018 International Power Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kotaro Mori and Junichi Asama
2. 発表標題 Rotor Vibration Reduction of a Bearingless Slice Motor for a Centrifugal Blood Pump
3. 学会等名 3rd International Symposium on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木大, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明
2. 発表標題 ホモポーラ形ベアリングレスモータの高速駆動時における磁気支持特性
3. 学会等名 平成30年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 朝間淳一
2. 発表標題 ベアリングレスプロアマータの巻線統合化
3. 学会等名 電気学会モータドライブ・回転機・自動車合同研究会資料
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井勇介, 朝間淳一, 大岩孝彰
2. 発表標題 零相電流を用いた磁気浮上モータシステムにおける分圧コンデンサ電位の電圧センサレス制御
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺萌, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明
2. 発表標題 三相インバータ1台で駆動可能な2自由度御形ベアリングレスモータの巻線統合化の検討
3. 学会等名 平成29年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森洸太郎, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明
2. 発表標題 2自由度制御形ベアリングレスモータにおける共振回避法の提案
3. 学会等名 平成29年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Junichi Asama, Tomotaka Shibata, Takaaki Oiwa, Tadahiko Shinshi, and Akira Chiba
2. 発表標題 Performance Improvement of a Bearingless Motor by Rotation about an Estimated Center of Inertia
3. 学会等名 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Junichi Asama, Takumi Oi, Takaaki Oiwa, and Akira Chiba
2. 発表標題 Investigation of Integrated Winding Configuration for a Two-DOF Controlled Bearingless PM Motor Using One Three-Phase Inverter
3. 学会等名 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Swandahru Suryo Kumoro, Junichi Asama
2. 発表標題 Simple Combined Winding Structure of a Bearingless Motor for a Centrifugal Pump Application
3. 学会等名 第4回生体医歯工学共同研究拠点国際シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 竹真, 朝間 淳一, 椎木 健次
2. 発表標題 永久磁石埋込形ベアリングレスモータにおける空間高調波を考慮した支持パラメータの数式モデルの検討
3. 学会等名 2019年 電気学会 産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井 勇介, 朝間 淳一, 千葉 明, 藤田 英明
2. 発表標題 零相電流を用いた磁気浮上モータシステムにおけるダイオード整流回路による浮上直流バイアス電流 制御
3. 学会等名 第31回「電磁力関連のダイナミクス」 シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 竹真, 朝間 淳一, 椎木 健次
2. 発表標題 埋込磁石形ベアリングレスモータの空間高調波を考慮した支持力制御方法の検討
3. 学会等名 第31回「電磁力関連のダイナミクス」 シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井勇介, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉 明
2. 発表標題 零相電流を用いた磁気浮上モータシステムにおける直流リンクのコンデンサ容量低減
3. 学会等名 平成31年度電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本竜輝, 朝間淳一
2. 発表標題 スロットレスシングルドライブベアリングレスモータの軸支持力とトルクの制御
3. 学会等名 第16回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC2019)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡大学 朝間研究室ホームページ
<https://wpp.shizuoka.ac.jp/asama/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----