

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14138

研究課題名(和文) 三相四線駆動式1kW出力ベアリングレスモータの開発

研究課題名(英文) Development of a bearingless motor with 1kW by three-phase four-wire drive

研究代表者

藤井 勇介 (Fujii, Yusuke)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：70882356

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)： 1kW出力を有する1軸制御形ベアリングレスモータの開発を行った。提案システムは(a)零相電流をスラスト支持に応用することで三相インバータ1台で浮上回転が可能、(b)スラスト支持用の永久磁石バイアス磁束が、モータ固定子を通過しない、(c)モータ巻線を通過する零相電流でもスラスト力が発生、という特徴を有する。有限要素解析により提案モータの以下の特性を明らかにした、(1)モータ電流密度8A/mm<sup>2</sup>においてトルク2.87Nmを発生し3300rpmで1kW出力を達成、(2)半径方向受動支持剛性も60N/mmと高剛性。最後に、実機の開発を完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気浮上モータの低コスト駆動方式として、能動制御軸数を最小とした1軸制御形ベアリングレスモータが国内外で開発されてきた。簡素化は達成されたが、最高出力は200W以下に留まっており、応用先も小型ファンに限定されていた。本提案方式の1軸制御形ベアリングレスモータは、零相電流を用いることで三相インバータ1台のみで浮上回転を可能とし(低コスト・小形化)、さらに、モータベクトル制御を可能とする構造である(1kW出力)。したがって、応用先を従来の小容量に限らず、中容量(1～3kW)出力の高速プロア、コンプレッサ等への拡張を促進し、環境負荷低減に大きく貢献する。また、学術的インパクトも大きい。

研究成果の概要(英文)： A one-degree-of-freedom (DOF) actively controlled bearingless motor with 1 kW output was developed. The proposed system has the following properties: (a) the levitation and rotation is possible with only a three-phase inverter by applying the zero-sequence current to the thrust magnetic suspension, (b) the bias flux of the permanent magnets for the thrust suspension is not flowing into the motor stator core, (c) the thrust force is generated even with the zero-sequence current passing through the motor windings. The following characteristics of the proposed motor were clarified by finite element analysis: (1) a torque of 2.87 Nm was generated at a motor current density of 8 A/mm<sup>2</sup>, and 1 kW output was achieved at 3300 rpm, (2) the passive stiffness in the radial direction was 60 N/mm and high stable. Finally, the proposed machine was fabricated.

研究分野：ベアリングレスモータ

キーワード：ベアリングレスモータ 永久磁石形モータ 磁気支持 磁気浮上 磁気軸受 受動支持 零相電流 三相四線式インバータ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ベアリングレスモータは、回転子を非接触で磁気支持しながら回転トルクを発生するモータであり、無摩擦・無発塵・長寿命などの利点を有する。しかし、回転子の回転方向以外の5自由度を安定化させるためには、多くのインバータ・電磁石・センサを必要とする。これに対し、システムの小形化・低消費電力化を目的に、能動制御自由度数を最小にした1軸制御形の磁気軸受とベアリングレスモータが開発された。

富山大学のグループでは、1軸制御形磁気軸受+モータシステムを開発したが、モータ駆動用の三相インバータ1台に加えて、スラスト支持用に少なくとも1台以上の単相インバータまたはパワーアンプが必要である。

オーストリアのヨハネスケプラー大学では、1軸制御形単相ベアリングレスモータを開発した。単相モータを採用することでシステムは簡素化されたが、合計3台のフルブリッジ(2台の三相インバータ)を必要とする。また、静岡大学では、三相インバータ1台で浮上・回転を可能とするシングルドライブベアリングレスモータを開発した。このシステムでは、d軸電流でスラスト力を発生し、q軸電流で回転トルクを発生する。三相インバータ1台で浮上・回転するという利点を有するが、d軸電流をスラスト支持に利用するため、一般的な弱め界磁制御を用いたモータ駆動をすることができない。

上記の背景より、1軸制御形を採用することでベアリングレスシステムの簡素化は達成されたが、モータ出力は小さく、応用先は小形ファンに留まっている。つまり、ベアリングレスモータの「小形化・低消費電力化」と「高出力化」はトレードオフの関係であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、過去に例のない「1kW出力を有する1軸制御形ベアリングレスモータの開発」を目的とする。本研究は、零相負荷を有する三相四線式インバータ1台で駆動する点で独創的である。上記トレードオフ関係の打破は、世界に先駆けて学術研究を推進し、長寿命・高効率ベアリングレスシステムの産業界への飛躍的普及と、環境負荷低減に大きく貢献する。

### 3. 研究の方法

#### (1)三相四線式インバータドライブ

図1に、提案回路の構成を示す。モータ巻線の結線方法を三相四線式(汎用インバータは三相三線式)とし、新たに増えた零相にスラスト磁気軸受の支持巻線を配置する。提案方式は、結線方法を変えるのみで、追加部品は不要である。単相インバータ1台を不要とするこの技術は、磁気浮上分野において新しい試みであり、学術的独自性・新規性は高い。

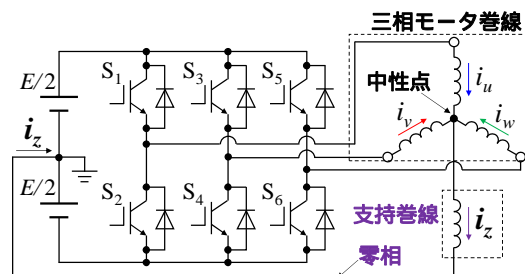


図1 零相負荷を有する三相四線式インバータ

#### (2)高性能永久磁石モータドライブとモータ設計自由度の拡張

支持巻線に流れる零相電流  $i_z$  は、モータドライブで利用される dq 軸電流とは独立に制御可能である。そのため、高性能永久磁石モータドライブが可能である。また、従来の d 軸電流でスラスト力を発生する場合、モータ構造に制限があった。本方式は、モータ設計自由度を拡張する点でも先駆的である。

### 4. 研究成果

#### 設計したベアリングレスモータ

図2に、設計した1軸制御形ベアリングレスモータの構造および断面を示す。このシステムは、反発受動磁気軸受、スラスト磁気支持ユニット、モータユニットから構成される。反発受動磁気軸受は上下端に配置され、半径および傾き方向(x, y, x, y)の運動は、受動的に安定化される。回転子側反発PMの内径と外径はそれぞれ37mmと53mmであり、高さは7.5mmである。固定子反発PMの内径と外径はそれぞれ59mmと74mmであり、高さは7.5mmである。

スラスト磁気支持ユニットは、ヨーク、スラストコア、スラスト支持巻線、バイアスPMで構成される。

中央に配置されたモータユニットは、8極12スロット集中巻線を有する積層固定子コア、回転子コア、モータPMで構成される。固定子内径は60mm、外径は110mmである。回転子の上下バイアスPMとモータPMの外径は53mmである。回転子の半径および傾き方向のタッチダウンを避けるために、半径方向のエアギャップを反発受動磁気軸受では3.0mm、モータユニットでは3.5mmとした。永久磁石のグレードは、反発磁石にN52、回転子PM(上下バイアス、モータ)にN48を選定した。

図3に、回転子PMの着磁方向を示す。上下バイアスPMはそれぞれ単極方向に着磁され、スラスト磁気支持のバイアス磁束を発生する。このバイアス磁束は、モータ固定子コアに流入しないため、モータ性能に影響を及ぼさない構造となっている。

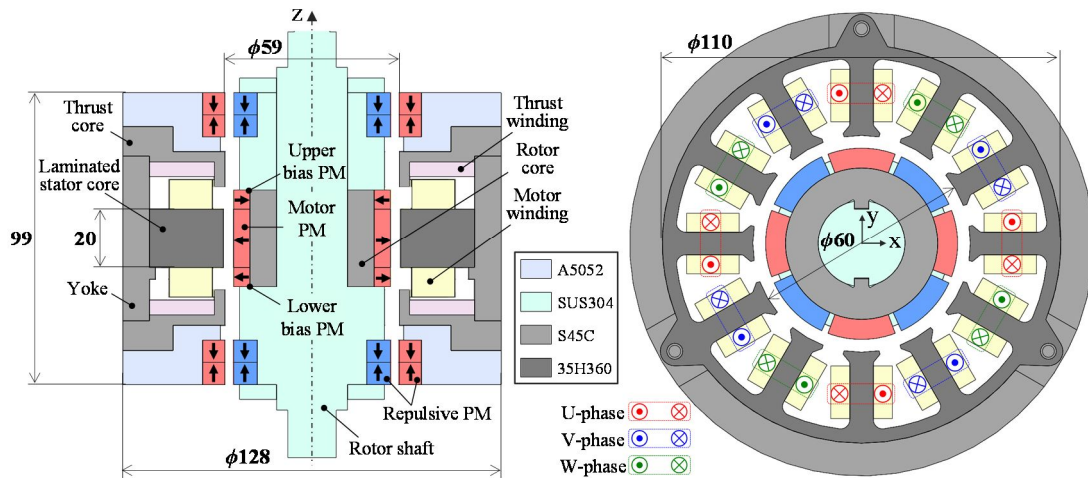


図2 全体の断面図（左）とモータ断面図（右）

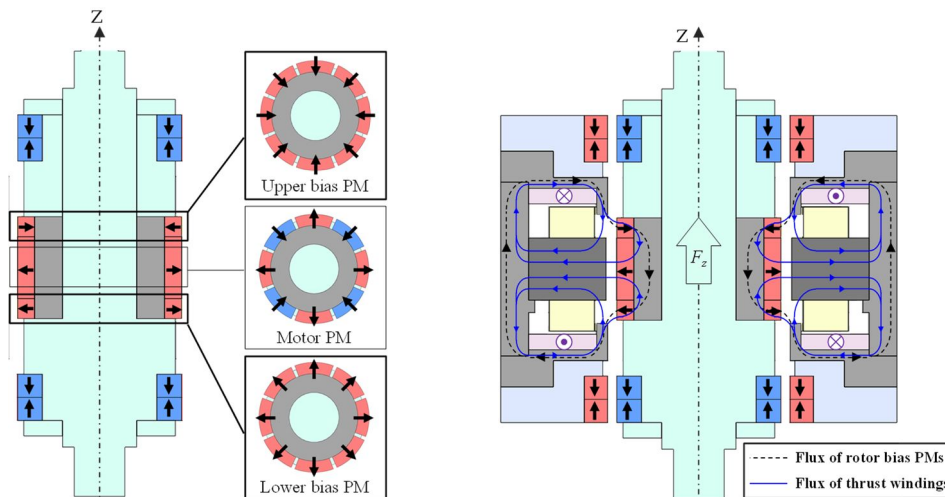


図3 回転子永久磁石の着磁方向

図4 スラスト支持原理

### ベアリングレスモータのスラスト支持原理

図4に、スラスト支持の原理を示す。図は、正の零相電流がスラスト支持巻線に流れた時に対応する。バイアスPMの磁束（点線）は、上部バイアスPM、回転子コア、下部バイアスPM、スラストコア、ヨークを通過する。スラスト支持巻線に零相電流を流すことで発生するスラスト磁束（実線）は、スラストコア、回転子コア、固定子コア、ヨークを通過する。スラストコアと回転子との間のエアギャップにおけるスラスト方向の磁束は、上部で強め合い、下部で弱め合いが生じ、回転子に正のスラスト力  $F_z$  が発生する。同様に、負の零相電流を流すことで、回転子に負のスラスト力が発生する。

零相電流は、スラスト支持巻線に加えてモータ巻線にも流れる。このモータ巻線に流れる零相電流によって、図4のスラスト磁束（点線）と同様の磁束が発生する。すなわち、モータ巻線を通過する零相電流によっても、スラスト力が発生する。

### 解析結果：ベアリングレスモータ性能

設計した1軸制御形ベアリングレスモータの性能を実証するために、三次元有限要素解析を行った。

図5に、モータトルクとモータ電流密度の関係を示す。トルクは、モータ定格電流密度 8 Arms/mm<sup>2</sup>（相電流 20.1 Arms に相当）において 2.87 Nm に達した。したがって、3328 rpm 時に 1 kW 出力を達成しうる。図6に、モータ電流密度 8 Arms/mm<sup>2</sup> において零相電流を流した時のトルク波形を示す。J<sub>z</sub> はスラスト支持巻線の電流密度を表す。J<sub>z</sub> = 0 A/mm<sup>2</sup> でのトルク波形は、J<sub>z</sub> = 4 A/mm<sup>2</sup> でのトルク波形と一致した。この結果は、零相電流がトルクに影響を及ぼさないことを意味する。

図7に、回転子が x 軸方向に静的に偏心した時の回転子に作用する復元力 F<sub>x</sub> を示す。反発受動磁気軸受により復元力が発生し、回転子が受動支持される。x 軸方向の剛性は、x = 1.0 mm において 60 N/mm であり、高剛性な受動支持を実現する。図8に、回転子が z 軸方向に変位した時

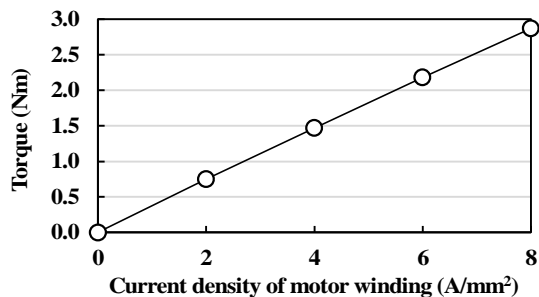


図5 モータ電流とトルク

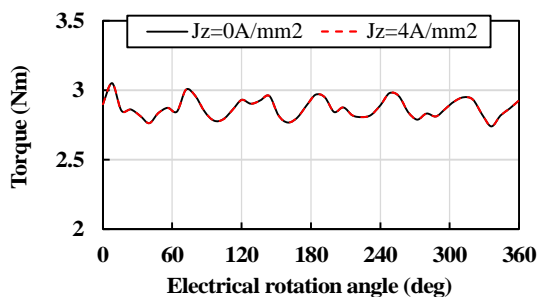


図6 零相電流通電時のトルク波形

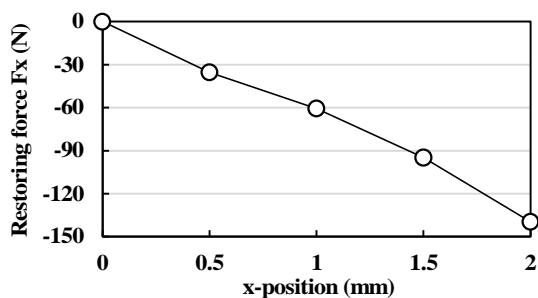


図7 x軸方向の復元力

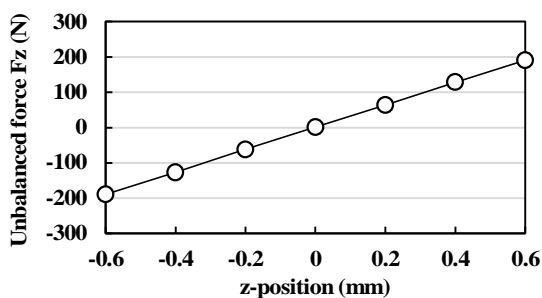


図8 z軸方向の反発力

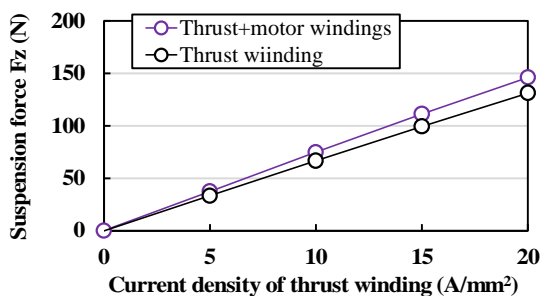


図9 零相電流とスラスト力

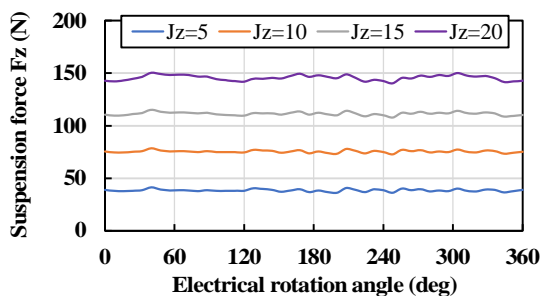


図10 零相電流通電時のスラスト力波形

の反発力  $F_z$  を示す。反発形 PM により  $z$  軸方向に斥力が発生する。スラスト磁気支持の始動時（スタートアップ）における  $z = 0.4 \text{ mm}$  において  $128 \text{ N}$  の反発力が発生する。したがって、安定なスラスト支持を実現するには、零相電流によって発生する能動スラスト支持力は、少なくとも  $128 \text{ N}$  必要である。

図9に、スラスト力とスラスト電流密度  $J_z$  の関係を示す。零相電流がスラスト支持巻線に加えてモータ巻線にも流れることで、スラスト力が増加した。 $J_z = 20 \text{ A/mm}^2$  においてスラスト力は、浮上開始位置 ( $z = 0.4 \text{ mm}$ ) での  $z$  軸方向反発力  $146 \text{ N}$  を超えた。

図10に、スラスト力波形を示す。回転角に対するスラスト力リップルは小さい。

#### 開発した1軸制御形ベアリングレスモータ

図11に、開発したベアリングレスモータを示す。過去に例の無い「大形の反発形磁石」の製作に開発期間を要した。以上より、本研究の目的である  $1 \text{ kW}$  を有する1軸制御形ベアリングレスモータを設計し、解析により浮上・回転性能が十分であることを示した。さらに、実機を開発した。

今後は、実機の浮上・回転試験を行い、本提案モータの特性を明らかにする。

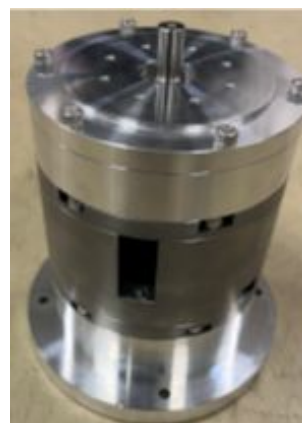


図11 開発したベアリングレスモータ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 藤井勇介
2. 発表標題 Proposal of a One-DOF Actively Controlled Bearingless Motor Using Zero-Sequence Current
3. 学会等名 The 18th International Symposium on Magnetic Bearings (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------