

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870189

研究課題名(和文) 制御軸数の少ないベアリングレスモータの受動安定方向の振動低減に関する研究

研究課題名(英文) Vibration Suppression in Passively Stabilized Directions in Bearingless Motors with Reduced Active Positioning Axes

研究代表者

杉元 紘也 (Sugimoto, Hiroya)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：60613552

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：半径方向 x 、 y または軸方向 z のみを能動的に磁気支持制御し、その他の自由度を永久磁石の吸引力あるいは反発力のみで受動安定させる制御軸数の少ないベアリングレスモータは、制御システムが簡単で低コストである反面、受動安定方向の危険速度での共振が問題となる。本研究は、2軸及び1軸のみ能動的に磁気支持制御するベアリングレスモータについて、受動安定方向の振動を低減する新しいモータ構造及び制御手法を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In two-axis actively positioned bearingless motors, radial axes x and y are actively positioned. Axial and tilting directions are passively stabilized. In one-axis actively positioned bearingless motors, only axial z is actively positioned, and the other axes are passively stabilized. These bearingless motors with reduced active positioning axes have simple control system and low cost. However, a resonant vibration is serious problem. Therefore, in this research, a novel vibration suppression method and a regulation system are proposed and verified in the experiments.

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 磁気軸受 永久磁石同期電動機 振動低減

1. 研究開始当初の背景

ベアリングレスモータは機械的な軸受を持たず、磁気浮上によって回転軸を支持するため、非接触で回転可能なモータである。これまでの研究により、能動的な制御軸数を低減した2軸制御および1軸制御ベアリングレスモータは、受動安定方向の固有周波数で回転させると、共振により振動が大きくなりタッチダウンする恐れがあることが明らかになっている。

2軸制御ベアリングレスモータは、重力や外乱により、回転子が軸方向あるいは傾き方向に変位した場合、回転子に取付けられている永久磁石の磁気吸引力により復元力が発生する。復元力はバネ力であり、危険速度でバネマス系の共振が発生し、安定な浮上が困難となる。1軸制御ベアリングレスモータは半径方向と傾き方向が受動安定方向であり、受動安定原理は2軸制御と同様である。つまり、2軸制御、1軸制御共に共振時の振動を如何に低減するかが課題である。

2. 研究の目的

半径方向 x , y または軸方向 z のみを能動的に磁気支持制御し、その他の自由度を永久磁石の吸引力あるいは反発力のみで受動安定させる制御軸数の少ないベアリングレスモータは、制御システムが簡単で低コストである反面、受動安定方向の危険速度での共振が問題となる。本研究は、2軸あるいは1軸のみ能動的に磁気支持制御するベアリングレスモータについて、受動安定方向の振動を低減する新しいモータ構造や制御手法を明らかにする。

3. 研究の方法

2軸制御ベアリングレスモータの受動安定方向は、軸方向及び傾き方向である。研究代表者は、既に傾き方向の振動低減手法を明らかにしているため、本研究では、軸方向の振動を低減するため、まず軸方向の変位推定方法を確立する。変位センサを追加することなく、軸方向変位を推定する新しいシステムを提案する。

1軸制御ベアリングレスモータの受動安定方向は、半径方向及び傾き方向である。本研究では、回転角度検出誤差の低減及び回転子の軸方向シフトによって、半径方向振動の低減が可能であることを明らかにする。また、零相電流を用いた傾き方向振動抑制回路を提案する。

4. 研究成果

図1(a)(b)に2軸制御ベアリングレスモータの軸方向の振動抑制方法の原理を示す。電動機巻線の界磁電流を制御することで、 z 軸方向にダンピング力を発生させることができる。

図2に電動機巻線の鎖交磁束の変化及び推定した軸方向変位波形を示す。回転子が軸方

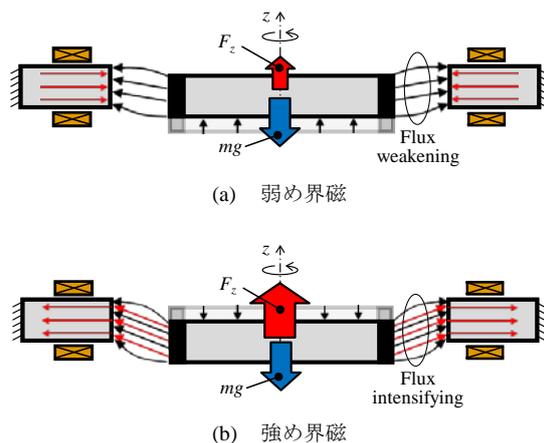


図1 d軸電流による軸方向のダンピング力発生原理。(a)弱め界磁により z 軸負方向に電磁力を発生。(b)強め界磁により z 軸正方向に電磁力を発生。

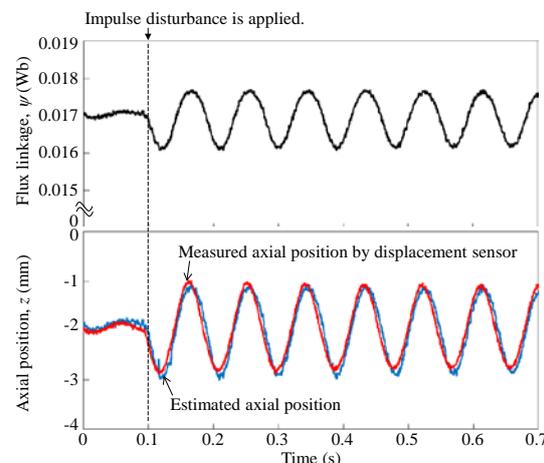


図2 回転子が 670 r/min で回転している時の電動機巻線の鎖交磁束及び推定した z 軸方向変位と変位センサで検出した軸 z 方向変位の比較

向に変位した時、回転子と固定子の間の対向面積が変化するため、電動機巻線の鎖交磁束が変化することを利用し、回転子の軸方向変位を推定することに成功した。

図3に1軸制御ベアリングレスモータの回転角度誤差による軸方向力発生メカニズムを示す。 q 軸電流のみ流している場合であっても、角度誤差がある場合、 d 軸電流が流れ、意図しない軸方向力が発生する。軸方向力により回転子が軸方向に変位すると、半径方向の剛性が変化するため、結果的に半径方向の振動が発生する。したがって、半径方向の振動を低減するためには、角度誤差を低減し、軸方向の振動を低減する必要がある。

図4に回転角度に対する角度誤差を示す。改善前は、角度誤差に2次成分が多く含まれている。一方、改善後は2次成分が低減され、角度誤差は低減されている。

図5に角度誤差の改善前及び改善後の半径方向振動を示す。角度誤差の低減により、半径方向振動の2次成分及び4次成分が大きく低減された。さらに、回転子の軸方向シフトにより2次成分が低減され、結果的に改善前と比較して59%の低減を実現した。

図6に1軸制御シングルドライブベアリン

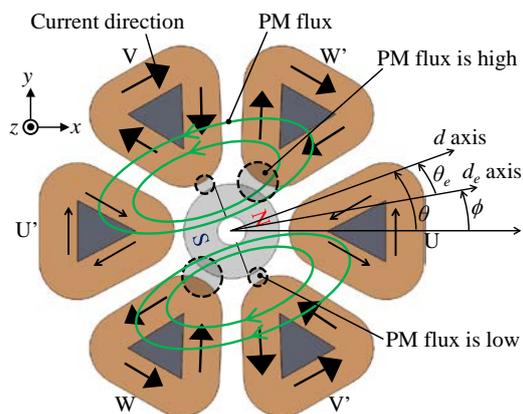


図3 1軸制御シングルドライブベアリングレスモータにおける角度誤差による軸方向力発生メカニズム

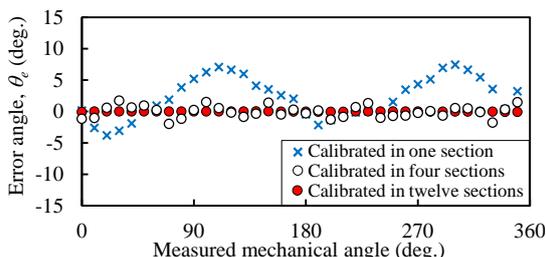


図4 回転角度に対する角度誤差の低減

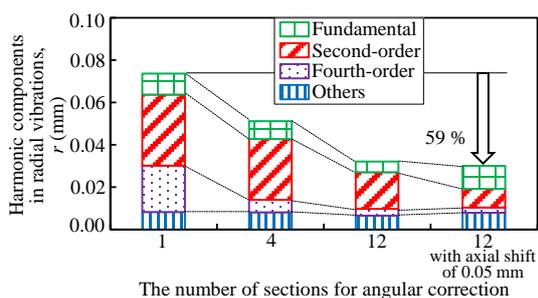


図5 角度誤差低減及び軸方向シフトによる半径方向振動の低減

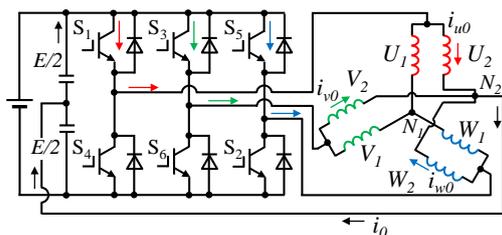


図6 零相電流を用いた傾き方向の振動抑制回路

グレスモータの傾き方向の振動抑制回路を示す。零相電流を利用し、各相2並列に接続された巻線の片側だけに電流を流すことで、ギャップ磁束密度に不平衡を発生させ、傾きトルクを発生させることができる。したがって、零相電流による傾きトルクにより、回転子の傾き方向の振動を抑制可能な新しいシステムを提案した。

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1件)

- ① Hiroya Sugimoto, Seiyu Tanaka, and Akira Chiba, "A Vibration Reduction Method of One-Axis Actively Position Regulated Single-Drive Bearingless Motor with Repulsive Passive Magnetic Bearings", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.52, no.1, pp.181-188, 2016, 査読有

[学会発表] (計9件)

- ① 三好 将仁, 杉元 紘也, 千葉 明, 「永久磁石型ベアリングレスモータの新しい軸方向変位推定法の提案」, 電気学会研究会資料, pp.39-44, 2014, 電気学会会議室, 東京, 査読無
- ② 杉元 紘也, 志村 樹, 千葉 明, 朝間淳一 「1軸制御シングルドライブベアリングレスモータにおける零相電流を用いた傾き振動抑制に関する基礎検討」, 平成26年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 3-71, 2014, 東京電機大学, 東京, 査読無
- ③ 杉元 紘也, 志村 樹, 千葉 明, 「シンプルな1軸制御シングルドライブベアリングレスモータ」, 平成27年電気学会全国大会講演論文集, Vol.5, pp.179-180, 2015, 東京都市大学, 東京, 査読無
- ④ Hiroya Sugimoto, Itsuki Shimura, and Akira Chiba, "Force and Torque Improvements of One-Axis Actively Position Regulated Single-Drive Bearingless Motor with Short Axial Length", presented in a panel session in *IEEE Power & Energy Society general Meeting (PESGM2015)*, 2015, Denver, CO, 査読無
- ⑤ 志村 樹, 杉元 紘也, 千葉 明, 「圧粉磁心を用いた1軸制御シングルドライブベアリングレスモータ」, 電気学会研究会資料, pp.63-68, 2015, 大阪工業大学, 大阪, 査読無
- ⑥ Hiroya Sugimoto, Masahito Miyoshi, and Akira Chiba, "Low Speed Test in Two-Axis Actively Positioned Bearingless Machine with Non-Collocated Structure for Wind Power Application", in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE2015)*, pp.799-804, 2015, Montreal, QC, 査読無
- ⑦ Hiroya Sugimoto, Itsuki Shimura, and Akira Chiba, "A Novel Stator Design in One-Axis Actively Position Regulated Single-Drive Bearingless Motor with Soft Magnetic

Composite”, in Proc. IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE2015), pp.2821-2827, 2015, Montreal, QC, 査読無

- ⑧ 杉元 紘也, 志村 樹, 千葉 明, 「シンプルな 1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータの 3D-FEM 解析による性能比較」, 平成 28 年電気学会全国大会講演論文集, Vol.5, pp.212-213, 2016, 東北大学, 仙台, 査読無
- ⑨ 志村 樹, 杉元 紘也, 千葉 明, 「1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータの磁気支持銅損の測定」, 平成 28 年電気学会全国大会講演論文集, Vol.5, pp.214-215, 2016, 東北大学, 仙台, 査読無

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称：電動機システム

発明者：杉元 紘也, 千葉 明

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2014-116231

出願年月日：2014 年 8 月 18 日

国内外の別：国内

名称：電動機及び電動機システム

発明者：杉元 紘也, 千葉 明

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2015-043002

出願年月日：2015 年 3 月 4 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉元 紘也 (Sugimoto Hiroya)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：60613552