

2024年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	東京電機大学 工学部 電気電子工学科
職 位 または 役 職	教授
氏 名	杉元 紘也

1. 研究題目

回転角度検出不要な革新的統合巻線形ベアリングレスモータの理論構築および実証

2. 研究目的

本研究の目的は、高効率化と高出力密度化を両立するポテンシャルを持つベアリングレスモータを広く応用展開するため、経験の浅い技術者でも設計容易な新しいベアリングレスモータを提案し、その理論構築と有効性の実証を行うことである。

図1に超高効率・高出力密度ベアリングレスモータの将来展望を示す。ベアリングレスモータ技術により、モータシステム効率とモータシステムの出力密度を向上することで、自動車用主機モータやドローン用モータなどのモビリティに留まらず、コンプレッサ、風力発電機、大型ポンプ、小型ポンプ、月面基地用ヒートポンプ、冷却ファン、産業用モータなどのアプリケーションに展開することが可能である。

モータはブラシ付きモータからブラシレスモータに進化し、接触部を非接触にすることで効率を向上し、さらに寿命とメンテナンス性を向上してきた歴史がある。現在多くのモータがブラシレスモータに置き換わっているが、機械的ベアリングと回転子のシャフトは未だ接触しており、ベアリングとシャフトはモータ設計に欠かせない部品である。ベアリングレスモータは、ベアリングとシャフトが不要であり、また、回転子は完全非接触で磁気支持されるため、効率向上と出力密度向上を両立することが可能である。一方、従来のベアリングレスモータは理論が煩雑であるため設計難易度が高く、技術移転が思うように進まないことが明らかになってきた。本研究では、モータ構造と理論がシンプルで、且つ設計が容易な新しいベアリングレスモータを提案し、その理論構築と実機試験による有効性の実証を行う。

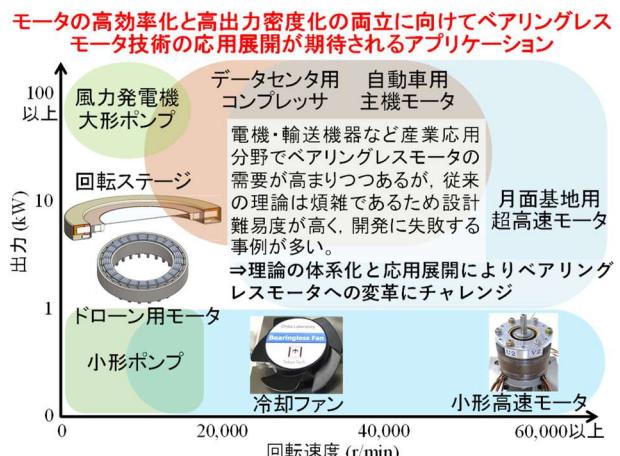


図1 超高効率・高出力密度ベアリングレスモータの将来展望

3. 研究内容及び成果

図 2 に提案構造のマルチモノポール形ベアリングレスモータを示す。リング形回転子鉄心の表面に半径方向外向きに着磁された磁石が一定の間隔で配置されている。固定子側から回転子を見ると、N 極の磁石しかなく、S 極は見られない。複数の単極が並んでいるように見えるため、マルチモノポール形回転子と名付けた。このマルチモノポール形のギャップ磁束密度には、回転子極数成分に加えて直流成分が含まれている。これは、ギャップ磁束密度の波形が、永久磁石の部分では N 極となり、磁石間空気部は 0 となる正弦波状になるためである。

固定子に集中巻で施された統合巻線は、電動機巻線と磁気支持巻線を一体化した巻線であり、2 台の 3 相インバータを用いて電流を制御することで、28 極の電動機磁束と 2 極の磁気支持磁束を同時に発生することができる。ギャップ磁束密度の回転子極数はトルクを発生し、直流成分と 2 極の磁気支持磁束の重畠により半径方向の磁気支持力を発生させることができる。

図 3 に製作したマルチモノポール形ベアリングレスモータの試作機を示す。固定子スロット数は 24 で、各歯には 3 並列の統合巻線が集中巻で施されている。回転子にはシャフトが取付けられており、そのシャフトは $xy\theta$ ステージに取付けられ、回転子の位置が調整できるようになっている。シャフトの先端にはアームが取付けられ、そのアームに 3 次元の磁束密度を測定することが可能なテスラメータのプローブが取付けられている。プローブ先端の計測部はギャップに挿入されている。

図 4(a)-(c)にテスラメータで測定した半径方向、周方向および軸方向のギャップ磁束密度を示す。プロットは測定結果を示し、実線は 3D-FEM 磁界解析結果を示している。図 4(a)の半径方向のギャップ磁束密度は回転子極数成分の交番磁界に加えて、直流成分を含んでいる。回転子極数成分の測定値と解析値は、それぞれ 0.29 T および 0.31 T であった。また、直流成分は、それぞれ 0.13 T および 0.12 T であった。測定結果と解析結果は概ね一致しており、提案構造マルチモノポール形ベアリングレスモータを成功裏に試作することができた。また、図 4(b)および(c)に示すように、半径方向成分のみならず周方向および軸方向のギャップ磁束密度分布を測定することができており、今後、測定値の磁束密度を用いて磁気支持力およびトルク式を実証する予定である。

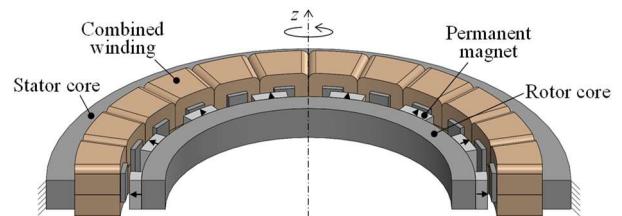


図 2 提案構造のマルチモノポール形ベアリングレスモータ

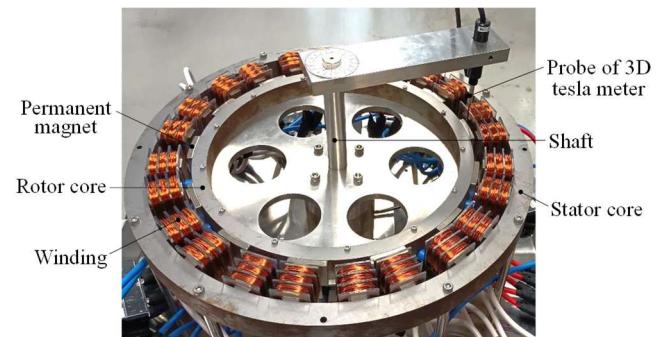
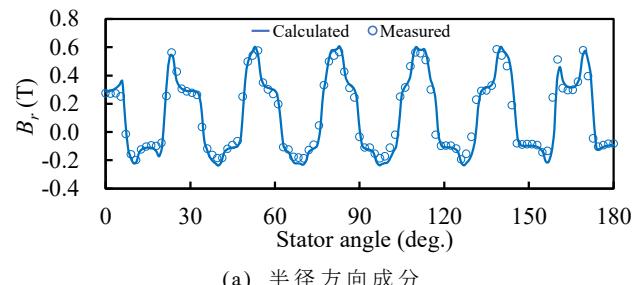
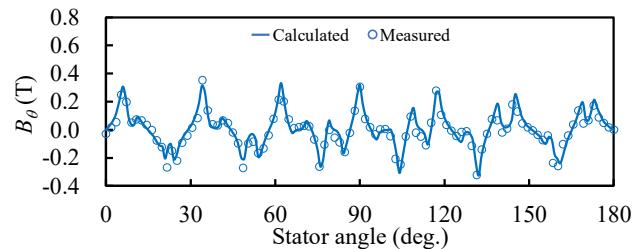


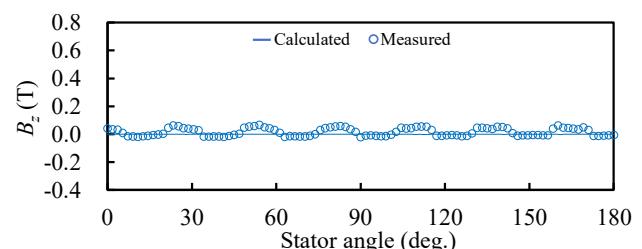
図 3 マルチモノポール形ベアリングレスモータの試作機



(a) 半径方向成分



(b) 周方向成分



(c) 軸方向成分

図 4 ギャップ磁束密度の測定結果および解析結果

4. 今後の研究の見通し

図 5 に上下コアを取り付けた 5 軸制御形マルチモノポール形ベアリングレスモータの提案構造を示す。半導体製造装置用回転ステージ等は、回転子の半径方向変位だけでなく、軸方向および傾き方向の振動を小さく抑える必要がある。薄型扁平の 2 軸制御形ベアリングレスモータの上下に C 型コアを取り付け、そこに三相巻線を設置し、それらの電流を制御することで、回転子の軸方向および傾き方向の位置を制御することが可能になる。

図 6 に軸方向の磁気支持力発生原理を示す。xz 断面の x 軸正方向側を示している。この提案構造は、トルクを発生させるために取付けられている回転子の永久磁石が、ラジアルギャップとアキシャルギャップの両方のバイアス磁束を形成する新しい磁気回路構造である。永久磁石の磁束はラジアルギャップを通り、固定子鉄心に入り、上下の C 型コアを経由して、アキシャルギャップを通り、回転子鉄心に戻る。上下の C 型コアには巻線が設置されており、図 6 の $\bigcirc \times$ の向きに電流を流すことによって、赤色破線で示す磁束が発生し、上側および下側のアキシャルギャップの磁束密度がそれぞれ増加および減少するため、結果的に z 軸正方向に磁気支持力が発生する。上下コアは 120° 間隔で 3 箇所に配置されており、三相巻線の電流を制御することで、軸方向および傾き方向の磁気支持力を発生させることができる。

図 7 に軸一傾き制御用統合巻線と三相インバータの結線と回路構成を示す。3 箇所の上下コアに施された三相巻線が Y 結線で三相インバータに接続されている。さらに、三相巻線の中性点は直流リンクの中点に接続されている。零相電流で z 軸方向の磁気支持力を発生し、三相電流で傾き方向の磁気支持トルクを発生する。提案構造は三相インバータ 1 台で軸方向と傾き方向の磁気支持力を同時に発生させる新しい統合巻線磁気軸受システムである。

今後、この新しい 5 軸制御形ベアリングレスモータの試作機を製作し、提案構造の原理と有効性を実証する予定である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国際会議

Shoma Kono, Masahisa Sakai, Riku Wakida, and Hiroya Sugimoto, "Novel Five-Axis Actively Positioned Multi-Monopole Bearingless Motor with Two Three-Phase Combined Windings," in Proc., 2025 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp.1-7, 2025.

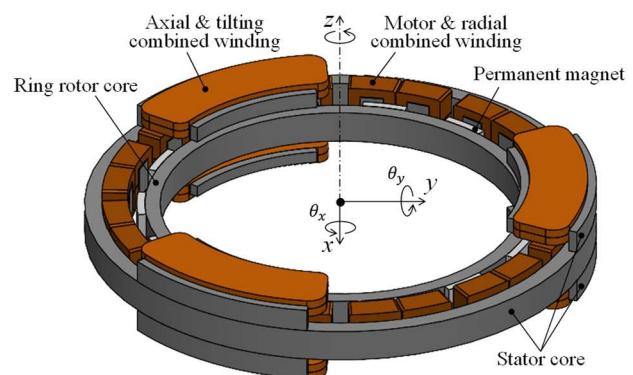


図 5 上下コアを取り付けた 5 軸制御形マルチモノポール形ベアリングレスモータ

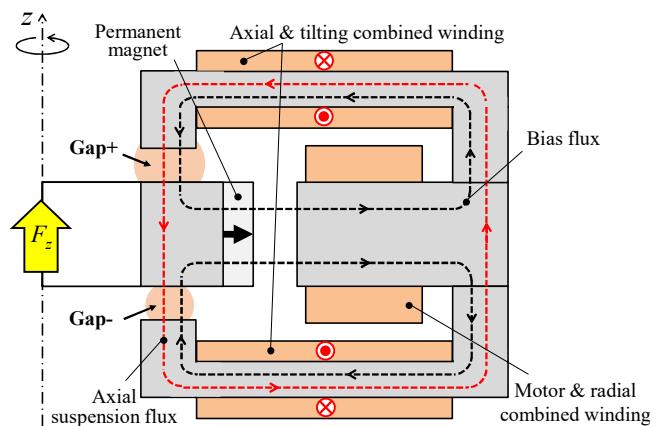


図 6 軸方向の磁気支持力発生原理

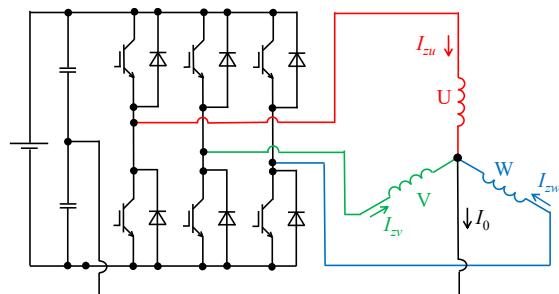


図 7 軸一傾き制御用統合巻線の回路構成