

2024年度 永守財団 研究助成 研究報告書

| | |
|-------------|------------------|
| 所 属 機 関 | 東京科学大学 工学院 電気電子系 |
| 職 位 または 役 職 | 准教授 |
| 氏 名 | 清田 恒平 |

1. 研究題目

1 軸制御型アキシャルギヤップリラクタンスベアリングレスモータの高出力化

2. 研究目的

現在、回転子が磁気的な力により完全非接触で回転可能なモータの内、磁気浮上部がモータと一体のモータであるベアリングレスモータの研究が盛んに行われている。ベアリングレスモータは、機械的な接触がないため潤滑油レス、無摩擦、無摩耗で粉塵が発生せず、省メンテナンスであるという利点がある。そのため、超純水用ポンプ、コンプレッサ等の超高速モータ、長寿命冷却ファン等への応用が期待されている。特に、シングルドライブベアリングレスモータと呼ばれるタイプのベアリングレスモータは、軸方向以外の4自由度($x, y, \theta x, \theta y$)を反発型磁気軸受により受動安定させ、軸方向のみを能動制御するため、コントローラ及び軸方向制御用変位センサがそれぞれ1台ずつで動作可能であるため低コストである。しかし他研究機関にて行われてきた例では最大でも数十Wクラスの出力しか実現できておらず、より高出力が要求されるポンプ・コンプレッサ用には不適合である。また、モータ部及び磁気軸受部双方に永久磁石を用いているため、レアアース問題(価格高騰、調達リスク)を抱えやすい。

助成者はこれまで、トルクと軸方向の力が同時に発生可能であり、かつモータ部に永久磁石が不要な、アキシャルギヤップ型シングルドライブベアリングレスリラクタンスマータ(AxG-SDBelRM)を提案した。このモータは、アキシャルギヤップ型三相スイッチトリラクタンスマータ(以下、AxG-SRM)と反発受動型磁気軸受(以下、RPMB)から構成される。AxG-SRMでは、アキシャルギヤップ構造とすることによりトルクと下向きのスラスト力を発生させる。RPMBでは、4自由度を受動安定にすると同時に上向きのスラスト力を発生させている。RPMBのスラスト力をAxG-SRMにて制御することにより、安定した磁気浮上を実現している。他研究機関と異なり、スイッチトリラクタンスマータ構造を採用しているため、不平衡吸引力と呼ばれる磁気浮上を不安定にさせる電磁力が小さく、このため他の研究例と比較してRPMBを小型化可能である。モータ部でも永久磁石が不要である為、モ

ータ全体で省レアアースが実現可能である。また、モータ部をアキシャルギャップ型とすることにより、モータトルクとスラスト力を同一箇所で発生可能であり、小型化や高出力化にも有利な構造としている。

しかし、従来構造では起磁力を確保するために固定子部の軸長を長くする必要があり、アキシャルギャップ型モータとしては不利となる形状となっている。一方で、従来研究では初期検討として数十Wクラスのモータとして設計したため、本モータをポンプ用に用いられる750W以上の出力を有するモータに再設計する必要があるが、本モータはRPMB部の配置と負荷を含めた重心との関係により安定性が変化するため、負荷に応じてモータ部の形状を含めて最適な形状に従来構造から変化させる必要がある。

本研究課題では、本モータをポンプ用に用いられる750W以上の出力に大出力化することを目標とし、上記問題を同時に解決することが可能なAxG-SRMの形状やその制御法、および設計指針を明らかにする。具体的には、AxG-SRMの形状およびRPMB部の配置を再検討することによりAxG-SRM部の扁平化を実現させ、まずは同体積あたりの出力を向上させる。同時に高速回転化による高出力化を目指した、回転子支持位置制御を含めたAxG-SRMの電流制御法を確立する。さらに、ファンやポンプ等負荷の構造によるモータ磁気浮上時の安定性への影響を、RPMB部の形状および配置を変更することによる影響を含めて明らかにし、将来的に様々な負荷に対応可能なAxG-SDBelRMの設計指針を明らかにする。

3. 研究内容及び成果

本研究では目標を達成するために3つの事項(1.RPMB部の形状によるモータ体積および磁気浮上性能への影響評価、2.負荷部を考慮しない場合のRPMB部最適形状の検討、3.負荷部を考慮する場合のRPMB部最適形状の検討)を検討する必要がある。

今年度は最終年度であるため、これまでの検討を通して提案AxG-SDBelRMの立ち位置の検証を行った。この結果、本モータの特徴として他の1軸制御型ベアリングレスモータと比較し、小さい永久磁石量で磁気浮上が可能であることを再確認した。すなわち、出力に対する永久磁石量が本研究では重要となる。一方で、本研究の本来の目標は、従来モータから高トルク化であり、このときモータ部が出力するスラスト力も増加する。すなわち、RPMB部に要求されるスラスト力が増加する。したがって、オフセット量の増加が予想され、これにより半径方向剛性と傾き剛性が減少し、これを補うために必要となる永久磁石量が増加する。

上記整理に基づいて、今年度はまず、単純に永久磁石量を増加させたモデルにて検討を行い、その後永久磁石量を維持したまま各種剛性を向上可能な構造の検討を行う。

はじめに、従来モデルで使用してきたモデル1と段数を増加したモデル2とを比較し、配置を検討する。段数の増加により、オフセット量の低減と半径方向剛性、傾き剛性の強化を図る。解析の結果、スラスト力の傾きはモデル1では96N/mm、モデル2では195N/mmである。すなわち、モデル2のスラスト力剛性はモデル1の2倍である。よって、モデル1ではオフセット量が1.0mm必要であるのに対し、モデル2のオフセット量は0.5mmに低減できる。ところで、AxG-SRMにおける半径方向剛性と傾き剛性はそれぞれ0.97N/mm、-2.53N·m/degである。AxG-SDBelRMが安定的に浮上するためには、これらとRPMB部における剛性の和が少なくとも正である必要がある。すなわち、RPMB部の傾き剛性は2.53N·m/deg以上である必要がある。モデル1の半径方向剛性は64.3N/mmであるのに対し、モデル2の半径方向剛性は105N/mmである。モデル2はモデル1より1.6倍大きく、半径方向に安定である。これらの結果から、安定的に浮上可能であると想定されるRPMB間距離を求めた。モデル1のRPMBを使用した場合、RPMB間距離がモータ高さ28.5mmに対して大きく、AxG-SDBelRMの体積がAxG-SRM部のみの体積の約5.6倍になり、トルク密度が減少する。一方で、モデル2はその比が2.8倍であるため、トルク密度の減少を抑えられると考えられる。また、永久磁石の増加量はモデル1に比べ1.5倍である一方、RPMB間距離は1/2倍である。すなわち、永久磁石量の増加に対して得られる効果が大きいことが明らかになった。

次にRPMBの永久磁石使用量を従来モデルから増加させずに構成段数を増加させることで剛

性の強化を図った。すなわち、各 RPMB 部の永久磁石の高さを 6 mm としたまま、段数を 2 段から 3 段または 4 段に増加させる。検討の結果、3 段モデルにおいてオフセット量は 0.7 mm に低減できることを明らかにした。また、2 段のとき RPMB 間距離は従来 160 mm 以上必要であったが、3 段では 130 mm に低減することが可能であることを明らかにした。一方で 4 段モデルは、剛性自体は従来モデルより強化されるものの、目標スラスト力 96 N に達成することができず、RPMB として使用できないことを明らかにした。

さらにトルク密度を増加させる方法として、従来隣り合う永久磁石の磁極を反転させて配置していたものから、磁極を回転させて配置するハルバッハ配列モデルに変更することで剛性の強化を図った。先ほどと同様に体積を一定としたまま、ハルバッハ配列に変更し段数を 3 段、4 段としたモデルの解析を行った。オフセット量は従来モデルと比較すると 3 段モデルでは 0.6 mm、4 段モデルでは 0.5 mm に低減可能であることを明らかにした。また、RPMB 間の距離は 3 段モデルでは 100 mm、4 段モデルでは 80 mm に低減できる。これらにより、4 段ハルバッハ配列モデルは従来モデルに比べトルク密度を 1.87 倍増加することができることを明らかにした。

本研究により、AxG-SDBelRM の高出力化に対する設計指針を明らかにした。すなわち、AxG-SRM 部においては出力トルクに対してスラスト力のより小さい構造とすることが、RPMB 部においてはスラスト力を出力するためのオフセットがより小さい構造とすることが、それぞれ重要であることを明らかにした。

4. 今後の研究の見通し

上記の通り、AxG-SRM 部においては、出力トルクに対するスラスト力の低減が重要であることが明らかとなつた。これは究極的にはすなわち、通常時はスラスト力が発生せず、軸方向の変位が発生し RPMB 部にてスラスト力が発生したときのみに AxG-SRM 部にてスラスト力が発生する構造が求められる。このため今後は、スラスト力を低減可能な手法、例えば回転子または固定子のダブル化が想定される。ただし、単純なダブル化ではスラスト力が相殺されるため、シングルドライブでこれを実現できる構造を検討する必要がある。

また、実機を用いた磁気浮上原理の検証について、インバータ側のトラブルにより未検証のままである。このため、引き続き磁気浮上の実機検証を進める必要がある。なお、AxG-SRM ではベクトル制御を用いている。SRM におけるベクトル制御では、各種電流に高調波が残留する可能性があり、これにより磁気浮上制御に影響を与える可能性がある。このため、電流制御の精度を向上できる手法を導入する必要がある。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国内会議

小寺・清田、「アキシャルギヤップ型シングルドライブベアリングレスリラクタンスマータの高速回転化に向けた反発型磁気軸受の配置検討」, MAGDA コンファレンス, pp.30-31, 2024 年 11 月 18 日～19 日

小寺・清田、「アキシャルギヤップ型シングルドライブベアリングレスリラクタンスマータの磁気浮上に向けた静特性測定」, 電気学会 マグネティック／モータドライブ／リニアドライブ合同研究会, pp.33-38, 2024 年 12 月 5 日～6 日

澤山・清田、「高トルク化アキシャルギヤップ型ベアリングレスリラクタンスマータにおける RPMB 部の検討」, 電気学会 全国大会, 5-101, pp. 164-165, 2025 年 3 月 16 日

澤山・清田、「アキシャルギヤップ型シングルドライブベアリングレスリラクタンスマータの高トルク密度化に向けた反発受動型磁気軸受の検討」, 電気学会モータードライブ／回転機合同研究会, pp.49-54, 2025 年 11 月 26 日～27 日