

2022 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東京工業大学 工学院 電気電子系
職位または役職	准教授
氏名	清田 恭平

1. 研究題目

1 軸制御型アキシヤルギャ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 , θ_x , θ_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。

報告者はこれまで、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、アキシヤルギャップ型シングルドライブベアリングレスリラクタンスモータ(AxG-SDBelRM)を提案した。このモータは、アキシヤルギャップ型三相スイッチトリラクタンスモータ(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、アキシヤルギャ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。報告者が提案している AxG-SDBelRM は他研究機関とは異なり、スイッチトリラクタンスモ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、モータ全体でレアアースレスが実現可能である。また、モータ部をアキシヤ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が発生可能であり、小型化や高トルク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、アキシヤ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、RPMBとAxG-SRMとで寸法変更による電磁力の感度が異なるため、最適な形状が従来構造から変化する。

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指し、上記2つの問題を同時に解決することが可能なAxG-SRMの形状を明らかにする。具体的には、AxG-SRMの極数(特に固定子側)を再検討することによりAxG-SRM部の扁平化を実現させ、同体積あたりの出力を向上させる。

3. 研究内容及び成果

本研究では目標を達成するために4つの事項(1.固定子・回転子極数を変更した場合のトルク・電磁力解析, 2.制御による回転数高速化の検討, 3.固定子極数のみを変更した場合の試作機の設計製作, 4.上記試作機の実機試験)を検討する必要があった。

今年度はそのうち1.と2.について主に検討した。

1.については、固定子極数を12極から6極に減らすことにより、固定子歯部において歯部長さあたりの巻線数を増加可能とする構造を提案した。これにより1極あたりの巻線起磁力を大きくすることが可能となり、軸長の短縮によるトルク密度の向上を目指した。解析上では、軸長を変数として出力トルク密度の変化を確認した。解析の結果、軸長15mm以上で先行モデルよりトルク密度が大きくなる一方、25mm以上ではトルク密度は向上しなかった。このときのトルク密度は0.545Nm/lとなり、先行モデルの0.3Nm/lと比較して約1.8倍となった。一方、平均スラスト力では、軸長が10mm以上で先行モデルよりも大きくなり、軸長を29mmとすると先行モデルの約5.2倍になる。平均スラスト力とトルク密度を比較すると、平均スラスト力のほうが増加してしまう結果となった。

2.については、複数の制御法を検討した。はじめに高速回転時の制御電圧の飽和を緩和するために、回転子支持位置の変更を制御に組み込むことによるモータ部ギャップ長の拡大を検討した。インバータによる電流制御にて出力電圧生成用のDuty比が一定以上となった期間に応じて回転子支持位置を初期浮上位置から上昇させることにより、16,000r/minまで高速化が可能であることが明らかになった。次にスラストカリップがギャップ長の変動にフィードバックされることに着目し、モデル規範型適応システム(MRAS)をSRMの騒音低減手法の一種である高調波電流重畳に適用し、そのパラメータを適応的に調整するシステムを提案した。提案手法により、3次成分は6次成分やスイッチングに起因する成分に対して無視できるほど小さくなり、従来手法と比較すると3次成分の低減量は99.761%と、3次成分を大きく低減できた。

さらに、ベクトル制御をSRM部の電流制御に適用することにより、電流指令値制御に要する計算時間の短縮を検討した。従来正弦波と直流値の足し合わせによりトルク制御と磁気浮上制御を行っていた。このため時々刻々指令値が変化する電流を直接制御する必要があり、さらにトルクや磁気浮上制御を行う際に二度平方根の計算が必要となっていた。これをSRMにおけるベクトル座標系に変換することにより、電流ベクトル長により磁気浮上制御を、零相電流とq軸電流との位相差によりトルク制御をそれぞれ独立に制御可能であることが明らかになった。

なお、1.の構造検討の過程において、従来試作機における磁気飽和による磁気浮上特性への影響を評価する必要が発生した。このため、3.と4.の実施を行う前に従来試作機の実機試験を実施するための準備を行った。この際に反発型磁気軸受を構成する永久磁石部にトラブルが発生したため、そのトラブル解消に大幅に時間を要した。

4. 今後の研究の見通し

当初予定通りに構造面と制御面の検討が進捗できた。しかし、構造面の検討の際に、モータ部の磁気飽和をどこまで許容できるかで、モータ設計が大幅に変更になることが明らかになった。通常のモータであれば効率面とトルクの精密な制御以外に磁気飽和の影響は小さいが、研究対象のモータでは磁気浮上制御に大幅な影響を与える可能性がある。このため、モータ部の磁気飽和が磁気浮上制御に与える影響をまず明らかにする必要があるが発生した。従って、今後はまず磁気飽和によりどのくらい磁気浮上性能に影響をあたえるのか、解析および従来型の実機試験を通して確認する必要がある。

また、検討に際して固定子ヨーク部の設計が重要であることが明らかになった。この構造をさらに3次元化することによりモータ軸長がさらに短縮できる可能性があるが、従来の電磁鋼板を使用した構造では3次元構造に対応することは困難である。このため3次元構造に対応可能な圧粉磁心の使用を検討する必要がある。ただし、一般的に圧粉磁心を使用する際に鉄心部における磁気抵抗が上昇し、リラクタンストルクが減少する可能性が指摘されている。従って、圧粉磁心の採用により出力トルクや磁気浮上特性にどのような影響が発生するのかを確認する必要がある。

一方で、制御面では目覚ましい進捗があった。今後は本研究で検討を行ったベクトル制御をベースに、磁気浮上位置の変更による更なる高速回転化や上記の磁気飽和に対応可能な制御法について検討する必要がある。

最終的には、本モータはファンを想定用途としている。このため実際にファンを取り付けた際に発生する外乱に対する評価を、解析および実機試験により明らかにする必要がある。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国際会議(査読付)

A. Shiratsuki, K. Kiyota, "A Novel Torque and Thrust Force Controller for an Axial Gap Type Single-Drive Bearingless Reluctance Motor Using Indirect Vector Control", The 14th IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), May 15 – 18, 2023.

国内会議

成岡・白築・清田, 「1 軸制御アキシヤルギャップ型ベアリングレスモータにおける反発型磁気軸受の配置の検討」, マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ 合同研究会, MAG-22-096, 2022 年 11 月 21 日

白築・清田, 「回転子支持位置の変更によるアキシヤルギャ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回転数化」, マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ 合同研究会, MAG-22-110, 2022 年 11 月 22 日

佐藤・清田, 「アキシヤルギャップ型ベアリングレスリラクタンスマータの極数変更による高トルク密度化」, 電気学会 全国大会, 5-010, 2023 年 3 月 17 日

白築・清田, 「高調波重畳電流の適応的な調整によるアキシヤルギャ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スラストカリップの低減」, 電気学会 全国大会, 5-012, 2023 年 3 月 17 日

成岡・清田, 「1 軸制御アキシヤルギャップ型ベアリングレスモータの傾き不安定性の低減」, 電気学会 全国大会, 5-013, 2023 年 3 月 17 日

受賞

佐藤圭祐, 電気学会リニアドライブ技術委員会奨励賞(2023 年電気学会全国大会)

白築明大, 電気学会リニアドライブ技術委員会奨励賞(2023 年電気学会全国大会)