

2023年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	法政大学 理工学部 電気電子工学科
職位または役職	専任講師
氏名	佐々木 秀徳

1. 研究題目

磁極の非対称構造を活用した省磁石高効率同期モータの開発

2. 研究目的

本研究では永久磁石使用量を削減した高性能なモータを実現するため、磁極の非対称性を取り入れた革新的な磁気構造の開発を目的とする。

近年、高効率化、小型化のため永久磁石同期モータ(PMSM)の開発が盛んである。特に電気自動車の駆動用モータ等には高い保磁力を有する希土類磁石が用いられる。一方、希土類磁石の供給が不安定であり、永久磁石の相場が乱高下する状況が発生している。そこで、永久磁石使用量を低減しつつ、モータの特性を最大限に引き出す設計が行われている。シンクロナスリラクタンスモータ(SynRM)等、永久磁石を用いない設計も考えられるが、トルク脈動の問題や効率の観点から、永久磁石を効果的に用いることで、特性の最大化を実現可能と考えられる。

従来のPMSMの設計は両回転方向へ同等の特性を得るため、図1(a)のように磁極における磁石の配置やコア形状は磁極中心に対して対称な設計を行っている。また、対となる磁極の構造も同一な構造を採用する場合が多い。報告者は図1(b)のように、これらの制約を外すことで、PMSMのさらなる性能向上が期待できると考えた。ただし、非対称な磁気構造により、回転方向によりその特性が変わる可能性がある。しかし、電気自動車の駆動用モータなど一回転方向が重視される場合も多く、非対称構造は実用的な構造であると言える。

そこで、本研究では磁極が非対称な構造を有するPMSMに注目する。本研究ではあえて非対称な磁極の設計を取り入れることにより、今までにない、斬新かつ優れた性能を有するPMSMの磁気構造を得る。また、対となる磁極の非対称化により、永久磁石の配置や大きさを極ごとに調整することができるため、永久磁石使用量を削減できる可能性を秘めている。

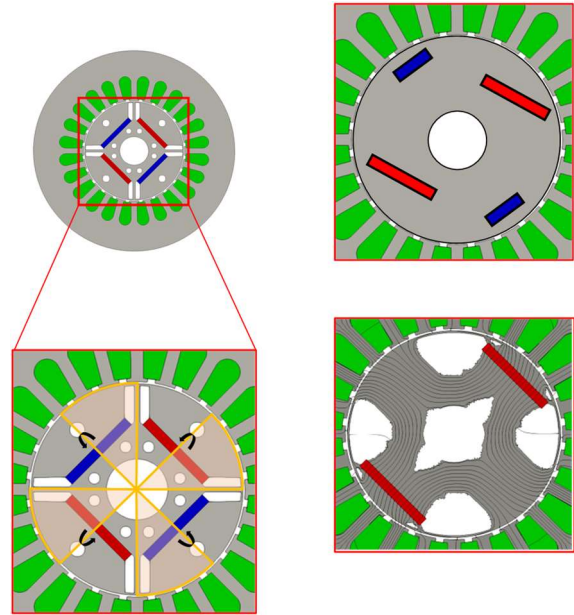
3. 研究内容及び成果

本研究では非対称構造モータの中でも、1極対に磁石を有する磁石極と磁石を有さない疑似極をもつコンシクエントポール型モータを対象とする。本モータの実現により、磁石枚数の削減による工数削減と、磁石使用量の削減を図ることが可能である。

従来手法をそのまま非対称コンシクエントポール型モータに適用すると、探索次元が膨大となり、大域的な最適解を得ることが難しい。そこで、非対称構造のトポロジー最適化を実現するため、領域分割型交互トポロジー最適化手法を開発・提案した(国内会議[1])。提案手法は Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES)をベースとしている。最適化中で最適化対象の領域を数ステップごとに切り替える。本最適化対象では、疑似極部と磁石極部で交互に最適化を行う。1ステップにおける最適化対象領域は限定されていることから、探索次元が半減する。そのため、探索性能を維持しつつ、必要な個体数を大幅に削減することが可能となり、探索時間が減少する。また、探索の難易度が減少することから、より良好な大域的な最適解を得ることが可能となる。提案手法において、探索領域が切り替わるタイミングでは、切り替わり前の構造を保持し、類似形状を維持した状態で最適化を再開する必要がある。そこで、探索領域切り替え時の探索集団生成に用いる、平均集団ベクトル m に切り替え前の最適解 x^{best} を引き継ぐことで実現した(国内会議[2])。

提案手法を非対称コンシクエントポール型モータの平均トルク最大化、トルクリプル最小化問題に適用した。図2に最適化の収束特性を示す。図中の Conventional、Proposed(CMA-ES改良前) および Proposed(CMA-ES改良後)はそれぞれ、全領域同時最適化(従来手法)、交互最適化において切り替え前の m を引き継いだ手法および交互最適化において切り替え前の最適解 x^{best} を引き継いだ手法による評価値の推移を示している。提案手法により、収束性が大きく向上していることが確認できる。図3に提案手法により得られた最適形状を示す。トポロジー最適化の過程で空気領域が生成され、磁石極と疑似極を得た。

以上の結果から、非対称コンシクエントポール型モータを適用対象として、従来手法に比べ良好な収束特性を有する新たなトポロジー最適化手法の実現を達成した。



(a)磁極対称構造 (b)磁極非対称構造
図1 回転子構造例

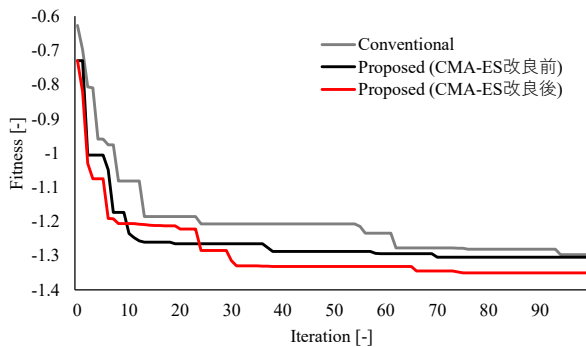


図2 収束特性[2]

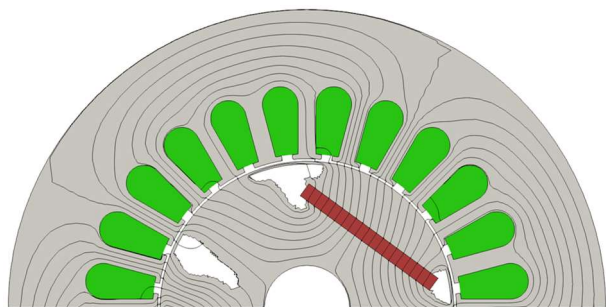


図3 最適形状[2]

4. 今後の研究の見通し

本研究により開発した探索アルゴリズムを用いて得られた最適構造を実際に作成し、評価を行う。永守財団研究助成 2024 では実機製作を行い、非対称コンシクエントポールモータの課題抽出を行う予定である。今後、モータ試験ベンチを構築し、直流電源、汎用インバータ、負荷モータ、負荷モータ用インバータ、トルクメータを用いてモータを駆動、評価する。実機製作においては、制作費用の都合上、図4に示す市販の汎用モータの固定子(4 極 36 スロット)を流用したうえで制作を行う。まず、図4に示すモータ固定子を用いて、回転子構造を本提案手法によって最適化する。得られた結果を基に製造性を確認したうえで試作機を作成し、評価を行う予定である。非対称コンシクエントポールモータにおいて、以下のような課題が考えられる。

- ① 軸方向の漏れ磁束による平均トルクの減少 本最適化では二次元有限要素法を用いて構造の評価を行った。しかし、実際は軸方向の漏れ磁束が懸念される。特にコンシクエントポールモータは疑似極を形成しており、従来のすべて磁石極であるモータに比べ、軸方向の磁束漏れが顕著であると考えられる。そこで、制作前に得られた構造を3次元有限要素法により評価し、3次元形状におけるトルク減少率について考察する。また、実機による評価結果とも照合し、軸方向漏れを抑える構造の探索を実施する。
- ② 非対称化による高調波成分の増加 非対称コンシクエントポールモータは磁氣的に非対称な構造であるため、渦電流損による磁石減磁等が懸念される。そこで、最適化により得られた構造の再解析により明らかにする。また実験により、トルク脈動などが問題となる場合には、トルク波形の高調波成分を除去する最適化を実施する予定である。

提案手法により得られた構造の実機評価結果から、非対称コンシクエントポールモータに関する新たな知見を取得し、さらに実用的かつ高性能なモータ開発を目指す予定である。

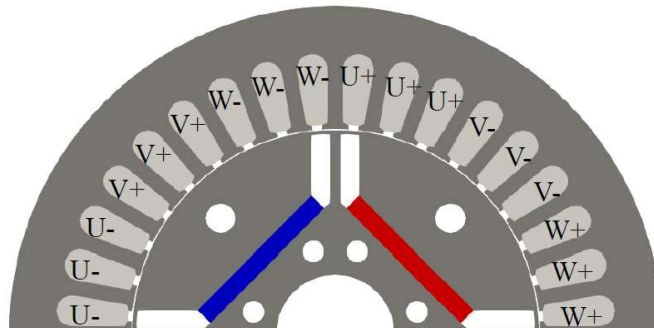


図 4 試作対象固定子

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

◆国内会議(査読無)

[1] 小林由佳, 岩田和久, 佐々木秀徳, 「非対称コンシクエント磁極を有する埋込型永久磁石同期モータのトポロジー最適化」, 令和6年電気学会全国大会, 5-026, 徳島, 2024年3月14日.

[2] 小林由佳, 岩田和久, 佐々木秀徳, 「CMA-ESによる非対称コンシクエント磁極を考慮した埋込型永久磁石同期モータのトポロジー最適化に関する基礎検討」, 電気学会静止器/回転機合同研究会, SA-24-069, RM-24-107, 札幌, 2024年9月11日.