

## 2024 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、希土類磁石の供給は不安定であり、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、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。助成者は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、非対称コンシクエントポール型モータを研究対象とした。本モータは、磁石を有する極（磁石極）と、磁石を有さずガウスの法則に基づく疑似的な極（疑似極）から構成される。疑似極の導入により磁石使用量の削減が可能となる。また、極構造を非対称化することで、一回転方向に対する特性の向上を図ることができる。これらの特性最大化には、回転子の磁気構造が極めて重要である。しかし、非対称コンシクエントポール型モータは設計自由度が高いため、磁気構造の合理的設計は困難である。そこで、2023年度永守財団研究助成において、広い設計領域に適用可能な領域分割型交互トポロジー最適化法を提案し、同モータのトポロジー最適化を実現した。本手法をテストモデルに適用した結果、従来手法と比較して収束性および解析時間を大幅に改善することに成功した。

2024年度永守財団研究助成では、提案手法により得られた最適構造を基に試作機を作製し、構造上の課題および手法上の課題の抽出を行った。本検証では、図1に示す実機試作が可能な固定子形状にモデルを変更し、平均トルク最大化およびトルクリップル最小化を目的とした最適化問題を再度設定した。制約条件として、図1に示すリファレンスモデルの磁石体積の80%以上を確保するものとした。

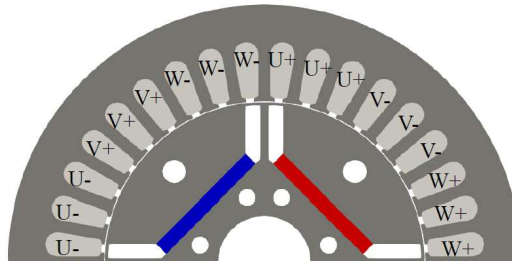


図1 試作対象固定子形状（リファレンスモデル）

提案手法による最適化の結果、従来最適化手法で得られた解と比較して、特性が81.3%向上しており、本手法の有効性が確認された。さらに、最適化に要したFEMによる解析回数も46.9%削減されており、計算効率の面でも優位性が示された。

得られた最適形状に対して形状感度解析を実施し、必要最小限の空気領域のみを抽出した上で、図2に示す試作機を作製した。測定系を図3に示す。本測定系を用いて電流-トルク特性試験および電流位相-トルク特性試験を実施した結果、解析結果と良好な一致を示した。ただし、実測値においては10%程度の特性低下が見られた。これは、軸方向漏れ磁束の影響や磁石近傍の構造モデリングの差異に起因すると考えられ、今後さらなる検証が必要である。また、コギングトルクや損失に関しては本研究では最適化を行っておらず、今後の課題として残された。



図2 試作モータ

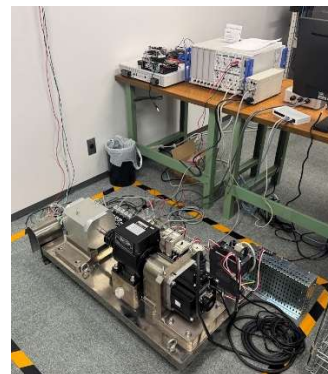


図3 測定系

#### 4. 今後の研究の見通し

---

本研究で開発した最適化手法は単一目的関数への適用に留まっており、多目的最適化には対応していない。設計においては、各目的に対するパレート集合を求め、それらを比較検討することが極めて重要である。また、平均トルクやトルク脈動以外の特性を考慮した最適化についても未検討である。さらに、極数などの構造的パラメータも特性に大きく影響を及ぼす要因である。そこで、本研究では開発手法を拡張し、非対称コンシクエントモータの多目的最適化を実現する。得られたパレート解により、非対称構造が各特性に与える感度を明らかにする。また、コンシクエント構造における特性最大化には極数の選定が重要であることから、極数の異なるモータに対しても最適化を実施する。これらの目的を達成するため、以下の方針で研究を進める。

##### ・多目的最適化アルゴリズムの構築

本研究で提案している領域交互トポロジー最適化手法を、多目的最適化に拡張する。開発した領域交互最適化手法の基盤である共分散行列適応進化戦略(CMA-ES)は多目的最適化への直接的な適用が困難であるため、遺伝的アルゴリズムを基盤とした多目的化手法の検討を行う予定である。その際、計算コストの増大が予想されるため、深層代理モデルを併用した高速化手法についても検討する。

##### ・多目的最適化の実行・最適解の考察

平均トルク、トルク脈動、効率を目的とする多目的最適化を実施する。構築した多目的最適化手法を非対称コンシクエントモータに適用し、パレート解を取得する。得られたパレート解に対し、構造的特徴が各目的に与える寄与を詳細に考察し、非対称化の有効性および特性間のトレードオフ関係を整理する。

##### ・最適極数に関する検討

複数の極数パターンに対して多目的最適化を実行し、特性の比較検討を行う。現在対象としている4極構造に加えて、他の極数構造にも最適化を適用し、コンシクエント構造における最適極数の探索を行う。これにより、非対称コンシクエントモータにおける極数選定指針の確立を目指す。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

---

##### ◆学術論文(査読付)

[1] Y. Kobayashi, H. Yamaguchi, K. Iwata and H. Sasaki, "Optimized Design of a High-Torque Density Permanent Magnet Synchronous Motor with Asymmetric Consequent Poles," IEEE Transactions on Industry Applications, to be submitted.

##### ◆国際会議(査読付)

[1] Y. Kobayashi, K. Iwata and H. Sasaki, "Optimized Design of a High-Torque Density Permanent Magnet Synchronous Motor with Asymmetric Consequent Poles," 2025 IEEE Energy Conversion Conference and Expo (ECCE2025), P11, #1917, October 21, Philadelphia, USA, 2025.

##### ◆国内会議

[1] 山口颯士, 小林由佳, 岩田和久, 佐々木秀徳:「非対称コンシクエントポールモータのトポロジー最適化と実機検証」令和8年電気学会全国大会, 発表予定.