

## 2023年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	長岡技術科学大学 電気電子情報系
職位または役職	准教授
氏名	日高 勇気

### 1. 研究題目

異なる2つのモータを1つに統合する次世代高性能複数統合型モータの開発

### 2. 研究目的

#### 【研究背景】

電気自動車用モータには、永久磁石モータと巻線界磁モータが広く使われている。両モータは特性が大きく異なり図1に示す関係にある。巻線界磁モータは、ロータ巻線で磁束の量を調整でき、必要最小限の磁束でトルクを生み出せる。無駄な損失を発生しないため、広い動作範囲で高効率に駆動できることから、市街地走行での高い電費性能を有する。一方、高車速域での加速性能に課題がある。対して、永久磁石モータは、巻線界磁モータとは相反する特性を持つ(図1)。日本では市街地での電費が重視されるが、欧州/北米では高い加速性能が要求される。ゆえに、電気自動車用モータ仕様の世界標準化には、2つのモータ特性を1つのモータで実現する必要がある。そこで、本研究の本質を成す問い「異なる構造を持つ2つのモータを、1つに統合することはできないか？」に達する。

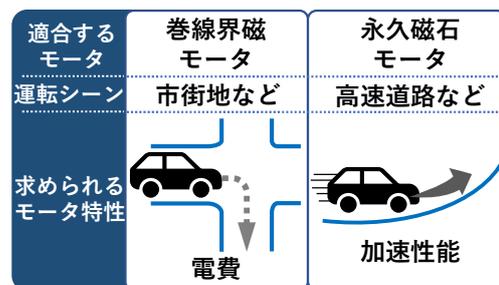


図1 巻線界磁/永久磁石モータの比較

#### 【研究目的】

本研究の目的は、巻線界磁モータと永久磁石モータのように、全く異なる2つのモータ特性を、1つのモータで実現し、モータ性能を飛躍的に改善させることにある。報告者はこれまで、巻線界磁モータ構造体と永久磁石モータ構造体を組合せた、複数統合型モータを考案し、先行研究のモータに対し高トルク密度化を実現した。一方、提案モータでは高トルク密度の代償に、トルクリップルが増大する結果となった。本研究では、これまで得られた成果と、リップル低減を実現する回帰モデルベース制御法を併用し、高トルク密度及び低トルクリップルの両立を目指す。

### 3. 研究内容及び成果

#### (1). 代理モデルの構築

提案制御法では、電流指令値に対する実機の応答トルクを、Look up Table を用いてモデル化する。また、応答トルクはモータの主要次数である 6f 成分に限定してモデル化する。図 1 に制御検証に使用したモデルを示す。検証モデルでは駆動回路の 3 相モータ部を、Look up Table で置換えている。これにより、実機の応答を模擬したモータモデルを構築できる。構築したモデルの計算精度を図 2 に示す。本検証では、一定の電流指令を与えた際の実機トルク波形と、図 1 で示した回路モデルで算出したトルク波形を比較している。図 2 より、構築した制御検証用モデルは、細かい成分は含まれていないものの、主要なトルクリップル成分は十分に模擬出来ている。

実機検証では、図 1 で構築したモデルを用いて、数値最適化により最適な電流指令値を算出し、同指令値を実機モータに通電しその効果を明らかにする。

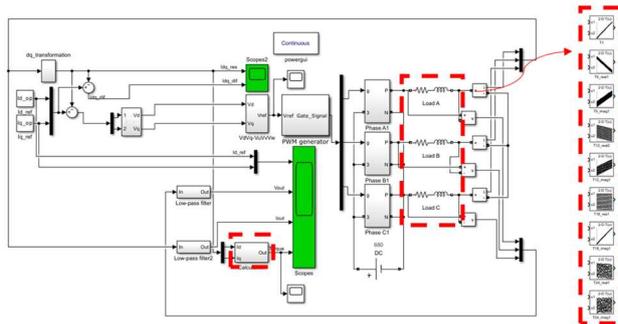


図 1 検証モデル

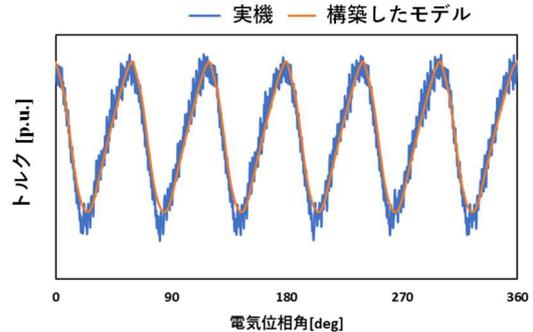


図 2 構築した代理モデルの精度検証

#### (2). 代理モデルを用いた検証結果

数値解析により明らかにした提案制御法の効果を、実機にて確認するため、図 3 に示す試験ベンチを構築した。本試験機では、図に示すインバータを用いて、電流指令値を調整する。

得られた実験結果を図 4 に示す。本試験では、電流値を段階的に変更し、各電流条件時のトルクリップル値をプロットした。また、比較として簡易的に手作業で電流指令値を調整した結果と比較している。手作業で電流指令値を調整した場合、最適な指令値を探索できておらず、詳細・膨大な調整作業を伴う。対して、提案法では検証した 2 条件 (Case A, Case B) のどちらも大幅なトルクリップル低減を実現できている。本結果より、実機応答値を Look up Table でモデル化する提案制御法の有用性が示された。なお、Case A と Case B では、モデル化する際に実施した指令値の組合せ数を変更している。具体的には、Case A よりも Case B の方が試験点数が多い。想定では、試験点数が多いことで、より高い効果が得られると考えられたが、図 4 結果にはそれが見られない。提案制御法における、モデル化過程での試験点数と、得られる効果の関係性については、より詳細な分析が必要である。

上記結果より、本助成で検討した実機トルク応答を Look up Table でモデル化する方法は、一定の成果を示した。一方、同制御法の確立には、データ点数と効果の関係等でより詳細な追加検証が必要なが分かった。今後は、検証内容を充実化する予定である。

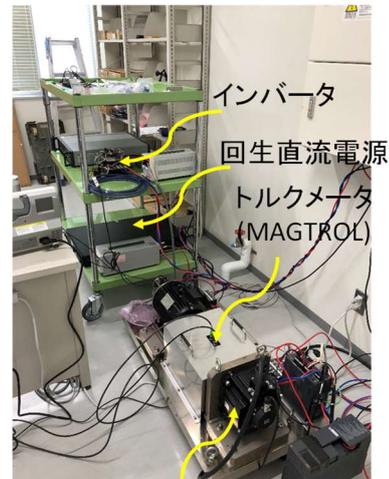


図 3 試験ベンチ

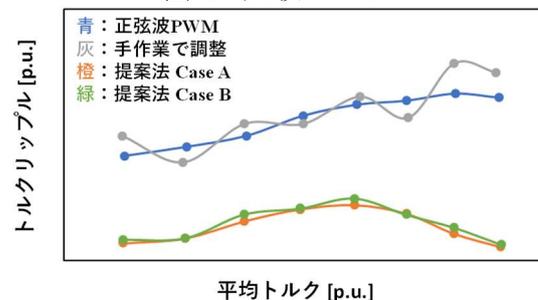


図 4 実験結果

#### 4. 今後の研究の見通し

---

これまでの検証は、全て定格出力 3kW の原理検証機を用いて実施してきた。一方、研究背景・目的にも記載した通り、本研究は電気自動車をターゲットとしている。開発した構造・制御法を実使用レベルで検証するために、今後は数十 kW クラスの実仕様で提案した構造・制御法を検証する。

#### 5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

---

##### 【学術論文】

- [1]. Y. Hidaka, "Torque Improvement of Magnet-Assisted Wound Field Motor With Field Unit Type Rotor," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 60, no. 1, pp. 101-111, Jan.-Feb. 2024, doi: 10.1109/TIA.2023.3295361.
- [2]. N. Minh Khoa and Y. Hidaka, "Torque Ripple Reduction Mechanism of Flux Barrier in Field-Unit Type Magnet-Assisted Wound Field Motor," IEEE Access, vol. 12, pp. 142047-142057, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3466138.

##### 【国内会議】

- [3]. 加藤 迅, 日高 勇氣:「数値最適化と Look up Table を用いたトルクリップル抑制の基礎検証」, 電気学会北陸支部大会, 2024.
- [4]. NGUYEN MINH KHOA, 日高勇氣:「界磁ユニット式磁石補助型巻線界磁モータにおけるフラックスバリアによるトルクリップル低減効果」, 電気学会静止器回転機合同研究会(SA-24-076, RM-24-114), 2024.
- [5]. 安達 健悟, 日高 勇氣:「分散ほぞ構造による界磁ユニット式磁石補助型巻線界磁モータの高回転化」, 電気学会産業応用部門大会, 2024.
- [6]. NGUYEN MINH KHOA, 日高勇氣:「界磁ユニット式磁石補助型巻線界磁モータのトルクリップルを低減するフラックスバリア形状の提案と実機検証」, 電気学会産業応用部門大会, 2024.
- [7]. 安達 健悟, 日高 勇氣:「EV・HEV 向磁石補助型巻線界磁モータの界磁ユニット構造による高トルク密度化」, 電気学会全国大会, 2024.