## 2022 年度若手研究者共同研究プロジェクト実施報告書

法政大学総長 殿

以下のとおり研究実施報告書を提出します。

研究課題名:永久磁石磁化推定システムの開発 研究代表者 氏名:中村 勢到 【在籍者】 基 研究科・専攻・学年(学生証番号):理工学研究科・電気電子工学専攻・2年(22R9302) 【修了者】 所属・職種: 本 指導教員(所属・職・氏名):理工学部 電気電子工学科・教授・岡本吉史 情 (※在籍者のみ記入) 共同研究者(所属・職・氏名): 報 (※指導教員と同人の場合は記入不要) その他 研究分担者: 研究期間: 2022年度 ~ 2024年度(※研究終了年度を記載) ※研究計画の進捗状況を中心に今年度の研究実施状況を記載してください。 近年、地球規模でカーボンニュートラルが促進されている、電気工学分野では、電気自動 車(EV)の普及に伴い、永久磁石同期電動機(PMSM)の高出力化設計の要求が高まってい る.本研究では、永久磁石をモータ鉄芯から取り外すことなく、磁気回路の漏れ磁束より永 久磁石磁化を非破壊的に推定できるシステムの開発を目的とする. 結果, PMSM の高回転化 に伴う磁石渦損起因の熱減磁に伴う永久磁石エネルギー積の経時変化、あるいは、設計段階 年 における着磁の状態を把握することができる.開発予定のシステムは、PMSM から発生する 漏れ磁束を計測する自動計測器と、測定器から得られる漏れ磁束を入力値として数値的に永 間 久磁石磁化分布を推定する手法(MELF)から成り立っている. 本システムより得られる磁 の 化分布により、高性能な PMSM の設計が可能となり、さらに、装荷された永久磁石の経時 研 変化を検知し、再着磁による永久磁石の再利用が可能となる。2022年度は次のように、項目 を分け、研究を進めてきた. 究 実 2022 年度研究計画進捗状況 施 (1) SiGrad におけるパラメータチューニング SiGrad とは、我々の研究室で開発した磁性体の無い自由空間中に置かれた永久磁石の磁化 概 を推定できる数値計算手法<sup>[1]</sup>である.MELFを開発する前段階として,直線探索の効果や, 要 各種数理計画法との適正について検討を行った.なお、数理計画法としては、最急降下法と 進ニュートン法を実装し、打切り特異値分解と比較し、SiGradとの親和性を検討した. (2) 三次元有限要素法及び随伴変数法の開発 PMSM のロータやステータ鉄芯は磁気非線形性を考慮する必要がある.一次六面体辺要素 による離散化及び,静磁界下における鉄芯の磁気非線形特性を容易に考慮することができる

三次元非線形有限要素法(FEM)の開発を行った.MELFでは目的関数の磁化 M に対する勾

配 ∂W/∂M を計算する必要があるため,鉄芯の磁気非線形性を考慮した随伴変数法(AVM)の開発を行った.

(3) MELF の数値計算アルゴリズムの構築

図1にMELFの計算アルゴリズムを示す.まず,初 期磁化ベクトルを定める(Step 1).次に,FEMより, 測定領域における磁束密度を計算し(Step 2),目的関 数を評価する(Step 3).随伴変数法により,勾配を計 算し(Step 4),最急降下法における修正ベクトル dを 計算する(Step 5).次に,直線探索を用いて,ステッ プ幅  $\alpha_n$ を決定する(Step 6).直線探索は,(1)の SiGrad におけるパラメータチューニングを行った際 に,親和性の高かった直線探索を選定し,目的関数の  $\alpha_n$ における微分値が0となるステップ幅を $\partial W/\partial \alpha_n$ の直線近似をすることで求解する方法<sup>[2]</sup>を導入してい る.その後,変数 M を次式のように更新する(Step 7).  $d_n$ の最大値が,収束判定値  $\varepsilon_{opt}$ より小さくなれば,最 急降下法の反復計算を終了する.収束判定条件を満足 していない場合は,Step 2~Step 7を繰り返す.



(4) シミュレーションにおける MELF の性能検証

MELFの性能検証を行うために、PMSMのベンチマークモデル(電気学会Dモデル<sup>[3]</sup>)の回転子を用いた.本モデルは、着磁方式として、組立着磁を想定し、固定子を除外した回転子のみを解析対象としている.図2に、電気学会Dモデルの回転子を示す.図3に、PM内部の磁化分布は、パラレル配向着磁を想定したDモデルで定義されている磁化分布と同様である.また、図4(b)は、図3で定義した目標磁化分布から得られる図4(a)で定義した測定点上の漏れ磁束である.測定点は、回転子表面から2mm離れた部分に円筒領域を設け、総数を7,152点とした.

図 5 に MELF により推定された磁化分布を示す.図 3 の目標磁化分布と似たような磁化分 布が推定された.推定された最小磁化強度は 1.221 T,最大磁化強度は,1.275 T であった. 今後は,磁石端部などに不完全着磁が生じた状態を想定した推定を行う.特定領域の推定精 度向上には,計測点の増加が必要となる.従って,メッシュ生成自由度の高い一次四面体用を 採用し,多数の測定点を配置した磁化推定を検討している.



## 参考文献

年

間

Ø

研

究

実

施

概

要

[1] N. Nakamura, Y. Okamoto, K. Osanai, S. Doi, T. Aoki, and K. Okazaki, "Magnetization estimation method for permanent magnet based on mathematical programming combined with sigmoid function," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 58, no. 9-6000704, Sep. 2022.

[2] Y. Okamoto, K. Fujiwara, and R. Himeno, "Exact minimization of energy functional for NR method with line-search technique," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 3, pp. 1288-1291, Mar. 2009.

[3]回転機のバーチャルエンジニアリングのための電磁界解析技術調査専門委員会:「回転機のバーチャルエンジニアリングのための電磁界解析」,電気学会技術報告,No. 776 (2000)

	成果発表(学会・論文・研究会等)		
	学会・論文・研究会等の別	タイトル	発行または発表年月
	招待講演 2022 年度第 1 回モータ技術部 門委員会	SiGrad を用いた永久磁石の磁 化推定	2022年6月
	学会発表 静止器/回転機合同研究会	シグモイド関数を援用した勾 配法(SiGrad)による永久磁 石磁化推定に関する検討	2022 年 9 月
研	学術論文 IEEE Transactions on Magnetics	Magnetization Estimation Method for Permanent Magnet Based on Mathematical Programming Combined with Sigmoid Function	2022 年 9 月 査読有
究	学会発表 マグネティックス研究会	磁気回路の漏れ磁束を用いた 永久磁石の非破壊磁化推定手 法(MELF)に関する基礎検討	2022 年 12 月
業	学会発表 令和 5 年電気学会全国大会	MELF を用いた SPMSM 回転 子の組立着磁後における永久 磁石磁化推定	2023年3月
績	その他(アピールすることがあ	かばご記入ください。)	