2022 年 11 月 29 日

2021 年度　永守財団　研究助成　研究報告書

所　属　機　関	名古屋工業大学　大学院工学研究科 電気･機械工学専攻
職位または役職	准教授
氏　名	松盛　裕明

1. 研究題目

モータの鉄損解析に使用する鉄損データマップの高速作製法に関する研究

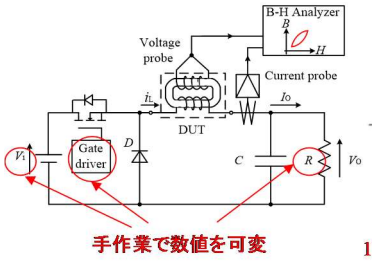
2. 研究目的

本研究はモータの鉄損を解析するために必要な損失データマップ(以下，ロスマップ)の高速作成を目的とし，作成されたロスマップが実用上で有用であるか検証を行う。
モータは多くの場合においてインバータと組み合わせて使用されていることから，インバータ駆動を想定した設計手法が必要とされている。なかでも，モータのステータやロータに使用する磁性体に発生する鉄損は，インバータ駆動を行うと増加することが報告されている。さらに，自動車駆動用モータは高回転化による小型化が進められているが，高回転時には鉄損が増加するため，高回転時の効率改善にむけて鉄損の低減が課題となっている。インバータ駆動時の鉄損増加の原因について説明する。鉄損は B-H 平面上に描かれる B-H ループの面積で表される。インバータ駆動を使用しない場合の B-H ループは基本波成分(正弦波励磁)に起因するメジャーループのみであるが，インバータ駆動を行うとスイッチングによる電流リプル成分に起因する複数のマイナーループが描かれるため，鉄損が増加する。
モータに発生する鉄損計算の研究の多くが正弦波励磁時の鉄損データを用いて評価しており,マイナーループの鉄損を考慮していない。実際のインバータ駆動上での鉄損値と計算値に差異が生じている。そのため多くのモータ設計には経験則が用いられており，低損失化には十分な余地が残っている。
近年，電磁界解析とプレイモデルを組み合わせた鉄損の解析手法が着目されているが，鉄損のヒステリシス損失成分しか考慮しておらず，鉄損の渦電流損失成分が計算できない事に加えて，計算に有する時間が長い，鉄損の計算精度が低いなど，多くの課題が残っている。2019 年度-2020 年度の研究においてロスマップの高速作製手法とモータに使用される珪素鋼板と鉄粉材料についての鉄損値がロスマップ法を用いて概ね計算できたため，最終年度では提案手法で作成されたロスマップを用いて，珪素鋼板･モータ形状における鉄損が正確に計算できるかを検証する。

3. 研究内容及び成果

■研究内容

モータに発生する鉄損を計算するためのロスマップデータは励磁周波数 f, 磁束密度リプル ΔB, 直流磁界バイアス H_0 特性を必要とする。これまでは図 1 に示すように, 降圧チョッパを用いて 1 つ 1 つ手作業でマイナーループの発生位置(鉄損の発生条件)をかえて鉄損データを取得していたため熟練の測定者でも 2 日ほど時間がかかっていた。そこで, 図 2 に示すように PWM インバータ回路を用いると, 1 回の動作で複数のマイナーループが描かれるので, このマイナーループをニューラルネットワークで学習し, 高速で鉄損データマップが作成する。さらに, 作成したデータマップが実際の鉄損計算に使用可能なのかを検討する。



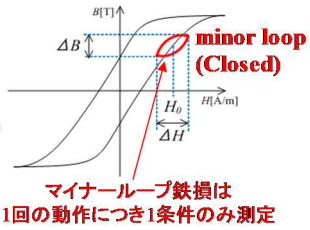


図 1　従来の鉄損データ取得システム

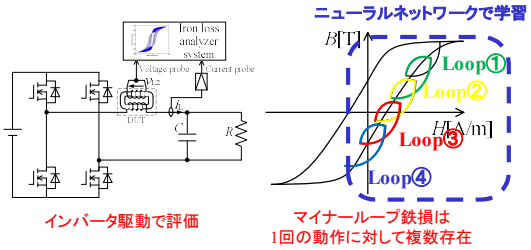


図 2　ニューラルネットワークを用いた鉄損データの学習

■研究成果

①珪素鋼板のマイナーループに起因する鉄損計算

2019-2020 年度の成果においてモータに使用される磁性体材料である鉄粉材料と珪素鋼板におけるインバータ駆動時の鉄損計算が可能になった。そこで, 最終年度では図 3 に示す UU コア形状単純な形状の磁性体材料から, 図 4 の様なモータのステータやロータ様な凹凸がある材料の鉄損計算に取り組む。凹凸がある材料の場合, 図 5 が示すように, 磁束密度分布に不均一性が生じる。鉄損は概ね磁束密度の二乗に比例するので, 正確な鉄損計算を行うには不均一性の考慮が重要となる。ロスマップ法の鉄損計算に電磁界シミュレータによる磁束密度分布の不均一性の考慮を追加することで, どこまで鉄損計算の精度が上昇するかを検討する。現状では電磁界シミュレータ(J-MAG)を用いて, 過去の研究で行われていたモータのモデルを用いて 3 次元のシミュレーションが実行できる状態に至った。今後は 3 次元シミュレーションで得られた磁束密度分布と提案している鉄損計算アルゴリズムを組み合わせて, 鉄損計算を行う予定である。

図 3　UU コア形状の珪素鋼板

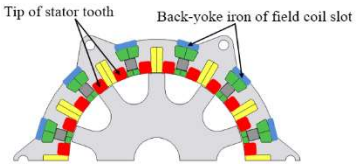


図 4　モータのステータやロータ

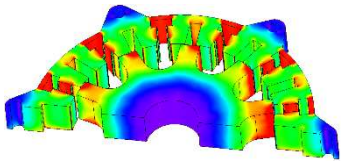


図 5　磁束密度分布

②2020 年度の研究成果の論文化

2020 年度の研究成果をまとめ, AIP Advances に論文投稿を行った。11/14 に掲載決定の通知を受領した。論文タイトルは下記の通りである。

Hiroaki Matsumori, Taisei Yamaguchi, Toshihisa Shimizu, Takashi Kosaka, and Nobuyuki Matsui,“Iron loss evaluation method for SiFe sheet material under PWM inverter excitation”

4. 今後の研究の見通し

実モータでの鉄損計算に適用予定である。例えば，図 5 の様な磁束密度分布から各セグメントの磁束密度を検出し，セグメント毎に鉄損を計算することで，磁束密度不均一の影響を考慮することができる。

5. 助成研究による主な発表論文，著書名

Hiroaki Matsumori, Taisei Yamaguchi, Toshihisa Shimizu, Takashi Kosaka, and Nobuyuki Matsui,“Iron loss evaluation method for SiFe sheet material under PWM inverter excitation” AIP Advances (11/14 に掲載決定の通知を受領)