

博士学位論文審査要旨

2020年1月18日

論文題目： 異常渦電流損を考慮したモータの鉄損予測手法に関する研究

学位申請者： 吉岡 卓哉

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 藤原 耕二

副査： 理工学研究科 教授 井上 馨

副査： 京都大学大学院工学研究科 教授 松尾 哲司

要 旨：

近年、世界各国において制定されている自動車の排ガスに対する規制は、内燃機関のみで構成される車両では対応が困難な水準になってきており、車両電動化の流れが加速している。電動化車両には多様な形態があるが、いずれにおいても、車両駆動はモータ（主機モータ）が担う。このため、モータのさらなる効率向上に加えて、搭載性向上や材料コスト減を目的とした小型化が進められているが、それに伴って出力の確保のために高回転化も必要となる。主機モータにおいて市街地走行や高速走行時に生じる損失は鉄損が支配的となり、高回転化に対しては鉄損の構成要素の一つである渦電流損が特に増大し、その低減策が重要となる。そこで本論文では、主機モータで発生する鉄損の予測精度向上を目的に、鉄損を構成する各種の損失の中から、その実用的なモデル化手法が確立していない異常渦電流損に関して、モータコア材の磁気特性測定によって異常渦電流損に影響を与える諸因子を検討し、得られた知見に基づいて、数値シミュレーションとの整合性に優れた実用的なモデル化手法を開発した。開発手法を量産主機モータの損失解析に適用して実測結果と比較検討することにより、鉄損予測精度の向上を確認した。以上のことから、提案する異常渦電流損を考慮したモータ鉄損予測手法の有用性を明らかにした。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2020年1月18日

論文題目： 異常渦電流損を考慮したモータの鉄損予測手法に関する研究

学位申請者： 吉岡 卓哉

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 藤原 耕二

副査： 理工学研究科 教授 井上 馨

副査： 京都大学大学院工学研究科 教授 松尾 哲司

要旨：

本論文提出者は、早稲田大学大学院先進理工学研究科電気・情報生命専攻修士課程を2014年3月に修了後、(株)デンソーに入社し、2017年4月に本学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程(後期課程)に入学して、現在在籍中である。本論文の主たる内容は、IEEE「Transactions on Magnetics」および電気学会「基礎・材料・共通部門誌」、電気学会「電力・エネルギー部門誌」に掲載されており、十分な評価を受けている。2020年1月18日に学術講演会が開催され、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明によって、いずれについても十分な理解が得られた。講演会終了後、審査委員により、論文に関係した諸問題について口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。英語については、語学試験に合格している。よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： 異常渦電流損を考慮したモータの鉄損予測手法に関する研究

氏名： 吉岡 卓哉

要旨：

本論文では、磁性体中の磁壁の移動に起因して発生する異常渦電流損を考慮したモータの鉄損予測手法に関する研究結果をまとめており、その内容は以下のとおりである。

背景：近年、世界各国において、自動車の排ガスに対して厳しい規制が設けられている。この規制は、内燃機関のみで構成される車両では対応が困難な水準になってきており、車両電動化の流れが加速している。電動化車両は、内燃機関とモータを併用したハイブリッド車 (Hybrid Vehicle)、充電可能なハイブリッド車であるプラグインハイブリッド車 (Plug-in Hybrid Vehicle)、内燃機関を搭載せず、電池とモータだけで車両駆動を行う電気自動車 (Electric Vehicle)、および、燃料電池を搭載した燃料電池車 (Fuel Cell Electric Vehicle) など、多様な形態をとるが、いずれの車種においても車両駆動はモータ (主機モータ) が担う。このため、電動化車両の製品競争力確保のため、主機モータのさらなる効率向上に加えて、搭載性向上や材料コスト減を目的とした小型化が進められている。小型化が進むと、出力の確保のために高回転化が必要となる。モータ単体に生じる損失は、機械損、銅損、鉄損に大別される。このうち、主な損失は銅損と鉄損になるが、主機モータにおいては、市街地走行や高速走行時に生じる損失は鉄損が支配的となる。したがって、今後さらなる小型化・高回転化が進むと考えられる主機モータの損失低減において、鉄損の低減は効果的である。

鉄損は、銅損に比べて発生メカニズムが複雑になるため、鉄損低減策の立案・検証には、鉄損の正確な評価が重要になる。鉄損の評価方法は、実機を用いた測定と数値シミュレーションによる計算の2種類に分けられる。このうち、実機測定による評価では、鉄損を直接的に算出することは現状難しく、一般的に入力 (電圧 × 電流) から、モータ出力 (トルク × 回転数)、銅損、機械損を差し引いた残留分として定義される。この測定において、出力はトルクの測定精度に大きく依存するが、トルク計の測定レンジと測定分解能 (精度) に相関があり、トルクがダイナミックに変化する主機モータの測定においては誤差が生じやすい。また、測定中に発生する損失に起因してモータの温度が上昇し、それによって巻線抵抗やモータ内に含まれる永久磁石の性能が変化するので、測定のバラツキが大きくなる。このような測定上の難しさに加えて、鉄損の総量しか測定できず、どこでどれだけ損失が発生しているかを評価することはできないため、測定結果のみから鉄損低減策を具体化することは難しいと言える。

一方、数値シミュレーションでは、鉄損のモデル化次第で、発生要因毎に損失分布の可視化が可能のため、鉄損の分析と低減策の具体化にとって有効な手段となり得る。したがって、鉄損の正確な分析に基づく主機モータ鉄損低減策の効果最大化においては、数値シミュレーションを活用した高精度な鉄損予測技術の確立が重要となる。

従来の問題点と研究の目的：これまで、モータの損失を高精度に予測するための手法については、数多くの研究がなされてきた。しかしながら、以下に挙げる問題点から、特に製造過程における種々の加工の影響を受ける量産主機モータの損失を高精度に予測可能な状況に至っていない。

【問題 1】鉄損は、ヒステリシス損、古典的渦電流損、異常渦電流損に大別される。このうち、

ヒステリシス損と古典的渦電流損については、具体的な予測手法が提案されている。一方で、異常渦電流損は、磁性体中の磁壁の移動に起因して発生する損失であり、この磁壁挙動のスケールは数十～数百 nm であるため、直径が 200 mm を超える主機モータの損失予測に使用する有限要素モデルの要素サイズでは、この磁壁挙動を直接考慮することは現状では困難である。したがって、有限要素法による鉄損計算に対応した異常渦電流損のモデル化が必要となるが、未確立である。

【問題 2】 前述のように、異常渦電流損はミクロなスケールの損失であり、直接測定できないため、測定可能な鉄損を、ヒステリシス損、古典的渦電流損、異常渦電流損に分離して分析する必要がある。このような考えに基づき、異常渦電流損を分離する方法は数多くの研究がなされてきたが、いくつかの仮定（古典的渦電流損は周波数の 2 乗に比例する、表皮効果は無視するなど）を含んでおり、異常渦電流損の分離方法の確立には至っていない。このように、異常渦電流損に対する基礎的性質の検討は十分には進んでおらず、予測モデルへの反映が困難な状況にある。

【問題 3】 量産主機モータでは、打抜き加工による塑性変形やコアを組み付ける際の焼嵌めなどに起因する圧縮応力により損失が増加することが知られており、その検討は、主機モータの損失を高精度に予測するために必要不可欠である。これまでの研究で、圧縮応力印加時や塑性変形時の磁気ヒステリシスに対する検討は進められてきたが、異常渦電流損に対する分析は十分に進んでおらず、圧縮応力や塑性変形を考慮した予測モデルは未確立である。

そこで本研究では、異常渦電流損に関して上述した種々の問題点を検討し、量産主機モータの設計に活用可能な実用的な損失予測手法の確立に資することを目的とする。

論文の構成と内容：本研究では、異常渦電流損を考慮したモータ鉄損の高精度計算手法について論究している。

第 1 章では、本研究の背景および鉄損計算における問題点、本研究の目的、本研究の概要について述べる。

第 2 章では、鉄損を計算する上で必要となる磁場解析手法およびヒステリシス損と古典的渦電流損のモデル化手法について述べる。

第 3 章では、異常渦電流損のモデル化手法について述べ、基礎的な検証モデルを用いて、鉄損計算精度を検討する。

第 4 章では、モータ Assy 化に必要となる焼嵌めによって生じる圧縮応力やモータコア加工時における打抜き加工によって生じるモータコアの塑性変形が、異常渦電流損に与える影響について述べる。

第 5 章では、2 章から 4 章で述べた鉄損のモデル化手法を主機モータに適用し、モータの鉄損計算精度を検討する。

第 6 章では、本研究を総括し、今後の課題および展望について述べる。

本論文の結論：本研究によって得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 主機モータのコア中の高調波磁束に起因するヒステリシス損および古典的渦電流損を、一般的な静磁界有限要素解析で得られた磁束分布から求めた後に、後処理でコアの積層方向に対してヒステリシス特性を考慮した一次元渦電流解析を適用し得られた古典的渦電流損と渦電流損補正係数を用いて異常渦電流損をモデル化する手法を検討した。単板磁気特性試験で得られた様々な周波数および磁束密度振幅における鉄損測定結果と、後処理一次元有限要素解析により算出したヒステリシス損および古典的渦電流損の差を異常渦電流損と定義し、異常渦電流損および渦電流損補正係数が磁束密度および周波数に依存して変化することを明らかにした。さらに、異常渦電流損と電磁鋼板の板厚との関係を調査し、電磁鋼板の薄板化により異常渦電流損が減少することを確認した。

- (2) 前述の渦電流損補正係数を用いて、高調波磁束に対応する異常渦電流損予測モデルを複数考案して比較検討を行った結果、主機モータ設計への適用が現実的と考えられる手法を見出した。その具体的な計算手順は、次のとおりである。任意の磁束密度波形を離散フーリエ変換して次数 j の周波数 f_j に対する成分 B_{mj} を求めた後、測定に基づいてあらかじめ構築しておいた渦電流損補正係数のデータベースから各成分に対する係数 $\kappa_j(B_{mj}, f_j)$ を算出する。全古典的渦電流損に対する各次数における古典的渦電流損の比を用いて重付けを行うことにより、検討対象の磁束密度波形に対する渦電流損補正係数を導出する。異常渦電流損は、導出した渦電流損補正係数と後処理次元有限要素解析で得られた古典的渦電流損から求めることができる。単板磁気特性試験において磁束に高調波を重畳させ、構築した鉄損予測モデルの妥当性を検証した結果、損失予測精度は 5% 以内と精度良く計算できていることが明らかになり、提案手法の妥当性を確認した。
- (3) 主機モータ量産時の圧縮応力や塑性変形を考慮した鉄損予測手法の構築に向け、圧縮応力印加時と塑性変形後の磁気特性測定を通じて、異常渦電流損および渦電流損補正係数への影響を明らかにした。圧縮応力印加により、異常渦電流損は増加する傾向を確認した。また、塑性変形により、異常渦電流損が減少する傾向を確認した。
- (4) 構築した異常渦電流損を考慮した鉄損予測手法を、インバータ駆動の主機モータに適用し、損失測定値と比較検討を行った。キャリア高調波の影響が顕著である駆動点では、予測した鉄損に占める異常渦電流損の寄与は小さい一方で、キャリア高調波の影響が少なく、自動車の高速走行時に対応した駆動点では異常渦電流損が予測した鉄損のうち 20% を占め、高い寄与が有するという、従来の予測手法では得られなかった知見を得た。加えて、モータコア端部の塑性変形を考慮した場合は、異常渦電流損は増加しないが、圧縮応力を考慮した場合、異常渦電流損が数十～数百% 増加するという、新たな知見を得た。