

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

電動機駆動システムにおける電磁界数値解析の
実用化に関する研究

Enhancement of Electromagnetic Field Analysis
for Practical Motor Drive Systems

申請者

貝森 弘行

Hiroyuki KAIMORI

電気・情報生命専攻 コンピュータ援用電磁工学研究

2024年2月

近年、地球温暖化問題が顕在化し、我が国の 2050 年のカーボンニュートラルを目指して電力分野における電源としての再生可能エネルギー利用拡大と、それに伴う非電力分野の電化促進に向けた技術開発が活発に行われている。

資源エネルギー庁によると、国内の最終エネルギー消費の 60%以上が企業・事業所等で使用され、そのうちの 50%以上が電力として消費されている。また、全体の 14%が家庭部門で消費され、そのうち 50%が電気として使用されている。このようにエネルギー需要の電化が進む一方で、運輸部門に関しては、エネルギー消費の大半はガソリンと軽油などが占め、電力量比は僅か数%と低く留まっている。このような状況を受けて、運輸部門に関連する自動車や鉄道、飛行機などの EV (Electric Vehicle) シフトの必要性が叫ばれ、世界的な課題となっている。

運輸部門の電化を促進するためには、駆動システムにおいて、エンジンからモータへ、ガソリン・軽油から蓄電池へと電化を推進する必要がある。トヨタ自動車(株)が世界初となるハイブリッド自動車「PRIUS」を 1997 年に販売して以来、国内では PHV (Plug-in Hybrid Vehicle) や EV, FCV (Fuel Cell Vehicle) への展開が加速している。この電化された駆動システム、すなわち電動機駆動システムはエネルギー変換システムであり、駆動モータを制御するための制御回路とインバータ、および蓄電池から直流電圧をインバータに印加するコンバータ等で構成されている。より高度化されたエネルギー変換システムを開発・設計する際に、CAE (Computer Aided Engineering) 技術を活用した試作レス化が現在は必須となっており、その中核技術として位置づけられているのが電磁界解析技術である。しかしながら、電磁界解析を電動機駆動システム設計で使用し、実用的に有効活用していくうえで、以下の課題がまだ残されている。

- ① モータの高速定常解析手法の確立：高効率なモータとして広く普及している PM (Permanent Magnet) 同期モータ等の設計・開発で機器特性の評価に電磁界解析を適用する際に、PWM (Pulse Width Modulation) インバータ電圧を印加する条件下での詳細解析では多数ステップの解析が必要となり、開発コストの削減のためにその計算時間の削減が強く望まれている。
- ② パワーエレクトロニクス磁気素子を対象とした寄生容量、寄生インダクタンスを考慮可能な解析手法の確立：SiC (Silicon Carbide) や GaN (Gallium Nitride) スイッチング素子による高周波化 (MHz レベル) により、従来の設計条件の周波数帯 (商用周波数 ~kHz レベル) では問題とならなかった寄生容量や寄生インダクタンスの影響が無視できなくなっているものの、その評価を可能とする安定的な解析手法が存在しない。

本研究では、上記の二つの課題の解決手段として、新たな電磁界解析手法を開発している。具体的には、モータの高速定常解析手法を新たに開発し、従来手法と比較してより短時間で定常解を取得できること、さらに寄生インダクタンスや寄生容量等を考慮可能な解析手法を開発し、電動機駆動システム中のパワーエレ

クトロニクス磁気素子を対象とした従来手法では考慮できなかった電磁現象を評価可能であることを検証している。本論文はこれらの成果を纏めたものであり、6章で構成されている。以下に各章の概要を述べ、評価を加える。

第1章「序論」では、本研究の背景として、電動機駆動システム設計における電磁界解析の必要性和課題について説明したうえで、本論文の目的と位置づけを述べている。

第2章「電動機駆動システムの数値解析の困難性」では、先ず、モータとパワーエレクトロニクス素子の電磁界数値解析の現状と課題を説明している。そして静磁界、準静磁界、静電界、準静電界、電磁波に分類して電磁界解析の定式化を示し、本研究で焦点を当てる電動機駆動システム中のパワーエレクトロニクス素子に適用可能な定式化と他の定式化との適用範囲の差異について明確化している。

第3章「モータの高速解析手法」では、同期モータに特化した新たな高速解析手法を提案している。先ず、従来の高速定常解析手法である TP-EEC (Time-Periodic Explicit Error-Correction) 法や多相交流簡易 TP-EEC 法の時間周期性を活用した定常解への補正方法について説明している。これに対し、三相交流を同期回転座標系 (dq 軸座標系) に変換することで基本波成分を直流成分に変換可能であることに着目し、時間周期性にとらわれずに補正可能である dq -TP-EEC 法を新たに提案している。妥当性の検証例題として先ずは簡易リアモータモデルを用い、従来手法と比較し、提案の dq -TP-EEC 法では十分に短時間で定常解を算出可能であることを示したうえで、提案手法を適用する際の適切な補正区間に関する留意点についても理論的に証明している。また、電気学会より提案されている複数のベンチマークモータモデルを用いて実機レベルの検証解析も行い、PWM 電圧源の条件下も含め、定常解に達するまでの計算時間を大幅に短縮できることを示している。さらに、より厳密に定常状態に達する方策として、二段階補正法などのいくつかの効果的な適用法も明らかにしている。本章の成果は、電動機駆動システムの詳細設計で中心となるモータの高精度解析において、解析時間の大幅な短縮による開発コスト低減に貢献するものであり、高く評価できる。

第4章「パワーエレクトロニクス素子への新しい電磁界解析手法」では、電動機駆動システム中のパワーエレクトロニクス素子の電磁界解析の高度化に向けて、従来の Darwin model を発展させた安定的な解析手法を新たに提案している。はじめにインダクタの寄生容量等の影響評価が必要となってきた近年の背景を述べたのち、従来手法の問題点を明らかにしている。これに対し、従来の近似手法である Darwin model の定式化にクーロンタイプゲージを課すことにより解の不定性を排除すると同時に、冗長変数を導入することで幅広い周波数領域で反復解法による安定的な求解を可能とした新たな近似解析手法を提案している。そのうえで、インダクタンス成分やキャパシタンス成分を有する複数の基本的な検証モデルを用いて、周波数領域解析で Full wave 解析と同一結果が得られることを示し、

提案手法の妥当性を実証している。また時間領域解析と周波数領域解析との比較に基づき、パワーエレクトロニクス磁気素子のスイッチング周波数帯での電動機駆動システムにおいて、これまで例のなかった渦電流、電界、磁界すべてを考慮した時間領域解析が安定的に可能であることを明らかにした。さらに実機レベルの解析として、PCB (Printed Circuit Board) 基板のダブルレイヤースパイラルインダクタモデルを用いて急峻な台形波電圧波形を印加した時間領域解析を行い、ダブルレイヤースパイラルインダクタ間の容量効果がリング電流を発生させることを提案手法で表現可能であることを示した。本章の成果は、電動機駆動システムで用いられるパワーエレクトロニクス磁気素子に対し、磁気コア損失や多数配線からなるコイル損失、漏れ磁束による損失等の詳細評価を、実用上許容できる計算時間で安定的に可能とするものであり、高く評価できる。

第 5 章「デジタルトランスフォーメーションにおける電動機駆動システムの展開」では、今後の進展が期待される電動機駆動システム設計における MBD (Model Based Design) の高度化に向け、CAE 技術としての本論文の成果の活用について、今後の方向性を明確化している。

第 6 章「結論」では、本研究で得られた成果・知見を総括し、今後の関連技術の展開と合わせて纏めとしている。

以上を要約するに、本研究は、カーボンニュートラルの実現のために重要となる運輸部門の電化促進を背景に、電動機駆動システム設計技術のさらなる高度化に不可欠な要素技術として、新たに二つの電磁界数値解析手法を開発し、モータの高速定常解析およびパワーエレクトロニクス磁気素子を対象とした寄生インダクタンスや寄生容量等の安定的な解析を可能としたものである。これらの成果は、電磁界解析とその応用分野に多くの有益な知見を与え、電気機器工学分野の発展に多大な貢献をなしている。よって本論文は、博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。

2024 年 1 月

審査員 主査 早稲田大学教授 博士 (工学) 早稲田大学 若尾 真治

副査 早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 石山 敦士

早稲田大学教授 博士 (工学) 早稲田大学 林 泰弘

早稲田大学教授 博士 (工学) 早稲田大学 近藤 圭一郎
