

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文概要

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

具森 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

2023年11月

近年、地球温暖化の進行が指摘され、温室効果ガスの主要因と言われる空気中のCO₂の増大が世界的な問題となっている。そのため、京都議定書をきっかけとして先進国でのCO₂排出量を制限する規制がなされている。具体的な政策として、我が国では2021年に、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」が閣議決定され、2050年のカーボンニュートラルに向けた基本的な考え方、ビジョンが表明された。国際的にも150以上の国・地域が、同様に年限付きカーボンニュートラルの実現を表明しており、これらの国・地域のGDPは世界全体の約94%を占めている。これらの政策は持続可能な社会の構築を目指して、化石燃料を代替する新たな技術を開発する大きなビジネスチャンスともなっている。資源エネルギー庁が公開しているデータにおいては、国内の最終エネルギー消費の構成比は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。家庭部門で全体の14%が消費され、そのうち50%が電気として使用されている。一方、運輸部門は旅客部門、運輸部門、貨物部門に大別されるが、エネルギー消費の大半はガソリンと軽油、ジェット燃料油などが占めており、電力量比はわずか数%と低く留まっている。これは国内に限ったことではなく多くの主要先進国でも同様な割合であると考えられ、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、国を挙げて取り組まれていることと整合する。

運輸部門の電化を実現するためには、駆動システムに着目すると、エンジンからモータへ、ガソリン・軽油から蓄電池（バッテリー）へ電化を推進する必要がある。1997年にトヨタ自動車（株）が世界初となるハイブリッド自動車「PRIUS」を販売してから、国内ではPHV (Plug-in Hybrid Vehicle) やEV, FCV (Fuel Cell Vehicle: 燃料電池車) への展開が加速している。この駆動システムの電化、すなわち電動機駆動システムは“電力変換システム”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、およびコンバータを介して蓄電池から直流電圧をインバータに印加するシステムで構成されている。蓄電池の充電に関しては、外部の充電器から充電ケーブルを用いて、もしくは近年注目されているワイヤレス充電によりコンバータを介しAC/DC変換などを行い充電される。この“電力変換システム”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特に自動車業界で推進されており、その中核技術として電磁界解析がある。しかしながら、電磁界解析を電動機駆動システム設計で有効活用し、実用的に使用していくうえで、未だ以下の課題が残されている。

- ① モータの高速定常解析：PM (Permanent Magnet) モータの設計・開発では電磁界解析が活用されており、基本特性の評価には欠かせないものである。一方で、PWM (Pulse Width Modulation) インバータ電圧を印加する詳細解析では多数ステップの解析が必須となり、その計算コストの削減が要求されている。
- 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, 従来の設計条件であった周波数帯 (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。

そこで本研究では, 上記の 2 課題に対して, 電磁界解析を発展させた解決手段を提案する。具体的には, モータの新たな高速定常解手法を開発して従来法よりもより少ない計算時間で定常解を得ることができること, さらに, 寄生抵抗や寄生インダクタンス, 寄生容量を考慮可能な新しい解析手法を開発し, 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の手法では考慮できなかった電磁現象を考慮可能であることを示す。

本論文は全 6 章で構成されており, 各章の概要を以下に述べる。

第 1 章では, 本研究の背景として, 電動機駆動システムにおける電磁界解析の必要性と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る。

第 2 章では, 電動機駆動システムの数値解析の困難性について, 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する。また電磁界解析の定式化について, 静磁界, 準静磁界, 静電界, 準静電界, 電磁波を示し, 本研究のターゲットとす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説明する。

第 3 章では, 新たなモータの高速解析手法を提案する。まずモータの高速定常解析手法の必要性として, モータの詳細解析では PWM のような電圧入力解析が必須であること, 定常解を得るまでに数周期分の計算を要するため高速定常解析が求められていることを述べる。その後, 従来の高速定常解析手法である時間周期性, すなわち基本波の半周期性を利用した補正方法である TP-EEC (Time-Periodic Explicit Error-Correction) 法と, その発展版である多相交流簡易 TP-EEC 法の三相交流時の補正方法について説明する。そして三相交流を同期回転座標系 (dq 軸座標系) に変換すると基本波成分を直流成分に変換することが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新たな dq-TP-EEC 法について提案する。原理検証として, 簡易リニアモータモデルを用い, 一周期 36 ステップで分割し, 従来の多相交流簡易 TP-EEC 法の 1/6 時間周期補正では 6 回補正, すなわち 6 ステップ \times 6 回 = 36 ステップ要したのに対し, 提案法では 1 ステップ補正でも 6 回の補正 = 6 ステップで素早く定常解を算出可能であることを示した。また, dq-TP-EEC 法を適用する際の留意点として, 1/3, 1/2 時間周期では補正効果がないことの理論的証明も示す。実機検証解析として, 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, 一周期 180 ステップで分割して正弦波電圧源解析で検証した結果として, 従来では 1/6 周期補正で 6 回 = 360 ステップ要したのに対し, 提案法の 1 ステップ補正は 6 回 = 6 ステップで高速にほぼ定常に達することを示した。PWM 電圧源解析に提案法を適応し, 1/66

ステップで補正を実施して正弦波電圧源解析同様の 6 回の補正でほぼ定常に達することを実証し、従来法の 1/6 周期補正に対し約 11 倍の高速化を達成した。より厳密に定常状態に達するには、1/66 から 1/6 への二段階補正を行うことも可能であることを示した。また、オープン巻線モータのようにわずかに直流重畳している三相交流の場合では、z 相成分を dq-TP-EEC 法で補正することはできないが、dq 軸成分は補正可能であるため、z 相成分である直流成分を事前に解析し、それを初期値として dq-TP-EEC 法を適用することで補正可能であることも示した。

第 4 章では、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基礎検討として、電磁界解析手法である Darwin model を発展させた新たな低周波安定化手法を提案する。まずインダクタの寄生容量の影響を考慮した電磁界解析が要望されていることの理由を述べたのち、従来法と先行研究の問題点を指摘する。そして従来法の Darwin model の定式化では不定かつ解に一意性がなく不安定であるため、クーロンタイプゲージを課すことにより解に一意性を持たせて不定性を排除すると同時に、幅広い周波数領域で反復法による反復回数の増大を抑えて安定的に求解するために冗長変数を導入した新たな定式化を提案する。検証モデルを用いて周波数領域解析で Full wave 解析と同じ結果が得られること、すなわち定式化の妥当性を検証し、不定性を排除したことで直接法でも計算可能となり反復法と同じ結果が得られることを実証した。さらに時間領域解析と周波数領域解析とで同じ結果が得られること、すなわちこれまでの電動機駆動システム解析において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可能であることを示した。具体的なモデルとして 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、立ち上がりおよび立下り時間が 100ns である幅 1 μ s の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 PCB に発生する容量効果による立ち上がりおよび立下り時間の急激な電圧変化が電流の振動現象、いわゆるリンギ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。

第 5 章では、本論文の成果の今後の展開として、電動機駆動システム設計におけるデジタルトランスフォーメーションを通じてのエンジニアリングチェーンでの役割、すなわち Model Based Design での CAE 技術の役割について述べる。Model Based Design ではプラントモデルとしてモータの等価回路モデルを発展させた 1D モータモデルが使用されているが、さらなる発展として冷却設計（サーマルマネージメントシステム）や騒音・振動設計への展開の期待と、提案した Darwin model などをベースとしたリンギング電流が表現可能な等価回路モデルや磁気コアの発熱も考慮可能なプラントモデルへの展開の期待について述べ、本研究の今後の方向性を明確化している。

第 6 章では、本研究で得られた成果、今後の課題、さらなる研究の検討事項と方向性について纏めている。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 貝森 弘行 印

(2024年1月8日 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文	<u>Hiroyuki Kaimori</u> , Takeshi Mifune, Akihisa Kameari, Shinji Wakao, Low-Frequency Stabilized Formulations of Darwin Model in Time-Domain Electromagnetic Finite-Element Method, in IEEE Transactions on Magnetics, (Early Access) doi: 10.1109/TMAG.2023.3304998.
○論文	<u>Hiroyuki Kaimori</u> , Yasuhito Takahashi, Shinji Wakao, Steady-State Analysis of Electric Machines Using the TP-EEC Method Based on Time-Periodic Conditions in a Rotational Reference Frame, IEEE Journal of Industry Applications 11(3), May 2022, DOI: 10.1541/ieejia.21008445
○論文	<u>Hiroyuki Kaimori</u> , Takeshi Mifune, Akihisa Kameari, Investigation of Darwin Model with Two Types of Coulomb Gauge Condition in Frequency-Domain Electromagnetic Finite-Element Method. In: Ehrhardt, M., Günther, M. (eds) Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2021. ECMI 2021. Mathematics in Industry, vol 39. Springer, Cham. (2022) https://doi.org/10.1007/978-3-031-11818-0_60
○国際会議 (査読あり)	<u>Hiroyuki Kaimori</u> , Takeshi Mifune, Akihisa Kameari, Shinji Wakao, Low-Frequency Stabilized Formulations of Darwin Model in Time-Domain Electromagnetic Finite-Element Method, IEEE the 24th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG), ID:133, May 2023
○国際会議 (査読あり)	<u>Hiroyuki Kaimori</u> , Yasuhito Takahashi, Steady-state Analysis of Electric Machines Using TP-EEC Method Based on Time-Periodic Condition in Rotational Reference Frame, 2020 IEEE 19th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), ID:567, Nov. 2020
○国際会議 (査読あり)	<u>Hiroyuki Kaimori</u> , Takeshi Mifune, Akihisa Kameari, Novel Application of Coulomb Gauge Condition in Electromagnetic FEM Computations for Darwin Approximation, 2020 IEEE 19th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), ID:989, Nov. 2020
国際会議 (査読なし)	<u>Hiroyuki Kaimori</u> , Takeshi Mifune, Akihisa Kameari, Darwin Model with Coulomb Gauge in Frequency-Domain Electromagnetic FEM Computation, 21st ECMI Conference on Industrial and Applied Mathematics, ID:378, Minisymposium Talks, April 2021
国内会議	<u>Hiroyuki Kaimori</u> , Quasi-static electromagnetic eddy current analysis based on Darwin model considering both inductance and capacitance effects, 第47回 日本磁気学会学術講演会, S-4, 2023
国内会議	貝森弘行, 美舩健, 亀有昭久, 若尾真治, 低周波安定化Darwin近似による時間領域有限要素解析の検討, 電気学会静止器回転機合同研究会資料, SA-23-002, RM-23-002, (2023)
国内会議	貝森弘行, 若尾真治, 中山貴登, 準静電界解析による高周波対応複合誘電性材料の複素誘電率の算出に関する検討, 電気学会静止器回転機合同研究会資料, SA-22-059, RM-22-062, (2022)
国内会議	貝森弘行, パワエレ用磁気素子のコイル寄生容量の電磁界解析に関する研究, 電気学会全国大会, S13-7, (2022)
国内会議	貝森弘行, 美舩健, 亀有昭久, Darwin近似のための補助変数を使用したクーロンゲージによる有限要素電磁界解析の検討, 電気学会静止器回転機合同研究会資料, SA-21-007, RM-21-007, (2021)
国内会議	貝森弘行, 高橋康人, 同期回転座標系での時間周期条件に基づくTP-EEC法を用いた周期定常解析の高速化, 電気学会静止器回転機合同研究会資料, SA-20-025, RM-20-025, (2020)
国内会議	貝森弘行, 亀有昭久, Darwin近似によるキャパシタンス・インダクタンス効果を考慮した電磁界解析, 電気学会静止器回転機合同研究会資料, SA-20-047, RM-20-071, (2020)