

氏名（本籍）	張 磊（中華人民共和国）
専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	理博 第 269 号
学位授与の日付	令和 6 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理工学研究科 総合理工学専攻
学位論文題目 （英文）	磁気デバイス統合型モータの特性算定に関する研究
論文審査委員	（主査）教授 田島 克文 （副査）教授 熊谷 誠治 （副査）教授 山口 留美子

論文内容の要旨

近年、世界各地における海面上昇や干ばつ、洪水などの気象災害が多発しており、これらの現象は温室効果ガスの排出に伴う地球温暖化が主因であると考えられている。この状況を鑑みて、先進国を中心として温室効果ガスの排出量を抑制するための取り組みが進められている。一方で、発展途上国は急激な人口の増加や経済発展に伴い、温室効果ガスの排出量が急増しているのが現状である。そのため、これまで以上に温室ガスの排出量を抑制するための技術開発や対策強くが求められている。

各国政府の環境への配慮による規制強化や促進政策に後押しされ、各自動車メーカーによる低燃費化やエコ化のための技術開発が加速しており、ガソリンエンジンと電気モータの組み合わせで駆動するハイブリッド自動車(HEV)、バッテリーと電動モータのみで駆動する電気自動車(EV)や水素と酸素の化学反応によって発電してモータを駆動する燃料電池車(FCV)など、環境面に優れた電気エネルギーを活用する技術が普及しつつある。しかしながら、日本におけるHEVの市場シェアは22%を占めているものの、EVのシェアはいまだに5%以下だと報告されている。電気自動車の普及に向けた調査によると、EVの非所有者のうち、EVが一回のエネルギー補給あたりの走行距離がより長くなれば購入すると答えた人が全体の21%であり、短い航続距離が電気自動車購入をためらう要因となっているこ

とが明らかになった。

電動車における航続距離は、バッテリーに搭載するエネルギー総量と走行中のエネルギー消費率であるモード電費によって決まり、モード電費の向上には動力システム全体の効率向上が必要不可欠である。最近のEV駆動用モータは、駆動電圧を高電圧化して高速回転で運転することで高出力密度を図り、性能向上している。動力システムの動作としては、バッテリー電圧をDC/DCコンバータで駆動電圧まで昇圧し、インバータを用いてモータを駆動することが一般的である。昇圧機構の基幹部品であるリアクトルは、鉄心とコイルからなる受動素子であり、コンバータユニットの約半分の容積を占めており、大幅な小型化が求められている。しかし、コンバータ動作時に損失が発生するため、単純な小型化では発熱密度が上昇し、水冷等の冷却システムも必要になり、システム全体としての体積増加や効率低下の要因となっている。

EVの駆動用モータには、一般的にネオジム焼結磁石を用いた永久磁石モータが採用されている。また、DC/DCコンバータに用いられるリアクトルもモータと同様に磁気デバイスであり、これら動力システムにおける磁気デバイスは、従来システムではそれぞれのユニットに搭載されている。これまでの動力システムの開発では、それぞれのユニットでの最適化及びユニットレイアウトの最適化は進められているものの、ユニット領域を横断したデバイス融合によるシステムの小型化・軽量化は前例がない。これに対して本研究は、現在主流の鉄心に電磁鋼板を用いたラジアルギャップモータの固定子バックヨークを、磁氣的等方性と高い形状自由度を持つ圧粉磁心を用いたボビン型リアクトルに置き換えることで、モータ内部の鉄心とリアクトル磁路を共有することで磁気デバイスを融合し、DC/DCコンバータユニットにおけるリアクトル容積をゼロにすることが可能となる磁気デバイス一体構造モータを提案する。

本研究で提案する磁気デバイス一体構造モータが動作しているとき、モータの巻線電流で発生する磁束は径方向および周方向に流れるのに対し、リアクトル電流で発生する磁束は径方向および軸方向である。モータの固定子バックヨークとDC/DCコンバータのリアクトル2種類の磁気デバイスの磁路を共有することで、モータの低出力運転時(リアクトル電流小)には通常運転ができるのに対して、高出力運転時(リアクトル電流大)にはモータバックヨークが磁気飽和してモータ誘起電圧が低下し、弱め界磁電流が低くなるため、このように異なるユニットパーツを融合させて動力システムの小型化を実現するものであると同時に、磁気デバイスにおける鉄心の磁気特性を生かした動力システムの出力特性向上の可能性を有する。しかしながら、これらの効果を解析的に検討するためには動力システム全体のモデリングが必要となり、一般的な電磁界解析に用いられる有限要素法(FEM)と駆動回路の連成解析では膨大な時間がかかってしまい、現実的な時間での解析は不可能である。

この問題に対して本研究では磁気材料の非線形特性を表現するために磁界の強さの変化に伴う大きさが変わる非線形磁気抵抗を用いて、モータ駆動回路である昇圧コンバータと

インバータを連成した磁気回路モデルを構築し、モータ駆動システム全体の効率算定作成手法について検討した。磁気デバイス一体構造モータの磁気抵抗回路網モデルに基づき、同体格の表面磁石型同期モータ(SPM)と基礎特性の比較評価を行い、提案構造モータの妥当性を検証した。さらに、3D-FEMを用いてリアクトルの構造変更によるトルク特性の影響について検討し、提案モータは高速回転時に従来のSPMモータより高い出力が得られることを確認した。

本論文は磁気デバイス統合型モータの特性算定に関する研究について全6章で構成される。各章の内容は以下の通りである。

第1章序論であり、研究の背景と目的を述べ、本論文の概要の説明とともに本研究の位置づけについて言及した。

第2章では、回転子構造、巻線方式と永久磁石の種類から永久磁石モータの基本構造と回転原理について説明し、その上、本研究から提案した磁気デバイス一体構造モータの構成および動作原理について述べる。その後、有限要素法による電磁界解析を用いて磁気デバイス一体構造モータがモータとして動作できることを示した。

第3章では、磁気抵抗回路網解析(RNA)の基礎を説明したうえで、ベースモデルであるSPMモータのRNAモデルを構築し、FEMによる解析結果との比較から構築したRNAモデルの妥当性の検証を行った。

第4章では、電気・磁気回路網に基づくコンバータ・インバータ駆動時のシステム効率算定について述べている。一般的に、永久磁石モータはPWMインバータで生成される擬似正弦波電圧によって駆動されるため、まずPWMインバータの原理について説明した。次いで、システムの効率算定にモータコアの鉄損およびスイッチング素子の損失を求める必要があるため、モジュールごとの損失特性の近似手法について述べた。最後に電気・磁気・運動連成解析から、作成した電気・磁気回路網により高速・高精度な解析が可能であることが明らかになった。

第5章では、提案した磁気デバイス一体構造モータの有用性について述べている。本章は、より単純化したRNAのモデリング手法を提案した上、磁気デバイス一体構造モータのRNAモデルを作成し、同体格のSPMモータと基礎特性の比較検討から提案モータの出力特性について検討した。その結果、提案モータがシステム上成立であることを確認した。そして予想と同じ、低速時に最大トルクの損失が小さく、高速時に従来構造より出力が向上したことを明らかにした。

第6章では、アクトルの構造変更による磁気デバイス一体構造モータのトルク特性の改善効果について述べている。提案モータの最適設計を行うため、3D-FEMを用いて、デッドスペースの利用やコイルの間隔、巻数、および通電方向など、リアクトルの構造が提案モータのトルク特性への影響について検討した。その結果、発進、登坂の低速時において、提案モータの最大トルクの損失はベースモデルと比べ5%以下、そして弱め界磁制御を用

いた高速領域において、提案モータの最大出力がベースモデルより36%向上することが可能であることを示した。

第7章では、結言であり、本研究で得られた成果をまとめるとともに、残された今後の課題について述べる。

論文審査結果の要旨

電動車における航続距離は、バッテリーに搭載するエネルギー総量と走行中のエネルギー消費率であるモード電費によって決まり、モード電費の向上には動力システム全体の効率向上と車載部品の小型軽量化が必要である。最近のEV駆動用モータは、駆動電圧を高電圧化して高速回転で運転することで高出力密度を図り、性能向上している。動力システムの動作としては、バッテリー電圧をDC/DCコンバータで駆動電圧まで昇圧し、インバータを用いてモータを駆動することが一般的である。昇圧機構の基幹部品であるリアクトルは、鉄心とコイルからなる受動素子であり、コンバータユニットの約半分の容積を占めており、大幅な小型化が求められている。しかし、コンバータ動作時に損失が発生するため、単純な小型化では発熱密度が上昇し、水冷等の冷却システムも必要になり、システム全体としての体積増加や効率低下の要因となっている。

これに対して本研究では、現在主流の磁心に電磁鋼板を用いたラジアルギャップモータの固定子バックヨークを、磁氣的等方性と高い形状自由度を持つ圧粉磁心を用いたボビン型リアクトルに置き換えた磁気デバイス統合型モータを提案する。本モータはモータ内部の鉄心とリアクトル磁路を共有することで磁気デバイスを融合し、DC/DCコンバータユニットにおけるリアクトル容積をゼロにすることが可能となる。

本論文は6章で構成される。各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、研究の背景と目的、位置づけを述べている。

第2章では、回転子構造、巻線方式と永久磁石の種類から永久磁石モータの基本構造と回転原理について説明し、その上で磁気デバイス統合型モータの構成および動作原理について述べる。その後、有限要素法による電磁界解析を用いて磁気デバイス統合型モータがモータとして動作可能であることを示した。

第3章では、磁気抵抗回路網解析(RNA)の基礎を説明したうえで、ベースモデルであるSPMモータのRNAモデルを構築し、FEMによる解析結果との比較から構築したRNAモデルの妥当性の検証を行った。

第4章では、電気・磁気回路網に基づくコンバータ・インバータ駆動時のシステム効率算定について述べている。一般的に、永久磁石モータはPWMインバータで生成される擬似正弦波電圧によって駆動されるため、まずPWMインバータの原理について説明した。次いで、システムの効率算定にモータコアの鉄損およびスイッチング素子の損失を求める必要があるため、モジュールごとの損失特性の近似手法について述べた。最後に電気・磁

気・運動連成解析から、作成した電気・磁気回路網により高速・高精度な解析が可能であることを明らかにした。

第5章では、提案した磁気デバイス統合型モータの有用性について述べている。本章は、より単純化したRNAのモデリング手法を提案した上、提案モータのRNAモデルを作成し、同体格のSPMモータと基礎特性の比較検討により提案モータの出力特性について検討した。その結果、提案モータがシステム上成立することを確認するとともに、低速時に最大トルクの低下が小さく、高速時に従来モータより出力が向上することを明らかにした。

第6章では、リアクトルの構造変更による磁気デバイス統合型モータのトルク特性の改善効果について述べた。提案モータの最適設計を行うため、3D-FEMを用いて、デッドスペースの利用やコイルの間隔・巻数および通電方向など、リアクトルの構造が提案モータのトルク特性に与える影響について検討した。その結果、発進、登坂の低速時において、提案モータの最大トルクの低下はベースモデルと比べ5%以下、そして弱め界磁制御を用いた高速領域において、提案モータの最大出力がベースモデルより36%向上することを示した。

第7章では、結言であり、本研究で得られた成果をまとめるとともに、残された今後の課題について述べる。

以上のように本論文は磁気デバイス統合型モータの実用化に必要な特性算定に関して検討を行うとともに、本モータの実用性を明らかにした。本論文より得られた知見はカーボンニュートラルの達成に寄与できるものと考えられる。よって本論文は博士（工学）の学位論文として十分価値があるものと認められる。