

称号及び氏名	博士（工学）	清水 悠生
学位授与の日付	令和 4 年 3 月 31 日	
論文名	「自動車駆動用 IPMSM の最適設計に関する研究」	
論文審査委員	主査	森本 茂雄
	副査	小西 啓治
	副査	林 海

論文要旨

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて、駆動用モータを動力源としたプラグインハイブリッド車や電気自動車、燃料電池自動車などのエコカーが注目を浴びている。自動車は様々な走行を行えるよう広範囲の速度・トルク領域における動作を必要とする。そのため、自動車駆動用モータは幅広い運転領域における動作を要求され、ロータに永久磁石を埋め込んだ埋込磁石同期モータ（IPMSM：Interior Permanent Magnet Synchronous Motor）が高出力、高効率、高信頼なモータとして広く用いられている。

IPMSM に適用される電磁鋼板や永久磁石といった磁性材料は IPMSM の運転特性を決める重要な要因であり、その運転特性に大きな影響を及ぼす。特に、従来自動車駆動用モータに用いられてきた永久磁石には多くのレアアースが用いられており、その供給源の多くを特定の国に依存していることから価格や供給量が不安定である。そのためレアアース、特に重希土類の使用量が少なく、かつ高い残留磁束密度や保磁力を示す高性能な永久磁石の開発が国を挙げて行われている。

IPMSM に残留磁束密度の高い強磁力磁石を用いると界磁磁束が増加するため、マグネットトルクが増加し高トルクが見込まれる。しかし、磁気飽和の影響により残留磁束密度の増加の割には高トルク化が図れず、またモータ全体の磁束密度の上昇により鉄損が増加し効率が悪化する可能性もある。そのため強磁力磁石を IPMSM に適用する際には、その磁石に適したモータ構造を検討する必要がある。また、一般に IPMSM はパルス幅変調インバータにより駆動するため、インバータのキャリア高調波の影響が運転特性に与える影響に関しても考慮する必要がある。さらに、本研究で提案するような磁石・空気層が多層となるロータ構造は、突極比が大きくなることからリラクタンストルクを得られやすいが、トルクリプルが増大する傾向にある。トルクリプルは振動や騒音を引き起こすため、トルクリプルを低減するような構造が求められる。

また、IPMSM はロータに永久磁石を埋め込む、という性質上、多種多様な設計案が検討可能であり、形状の特性解析には、長時間を要する 2 次元有限要素解析を使用する。ある要求仕様に対

して、多種多様な設計案を試行錯誤的に検討し、それら一つ一つの形状解析に長時間を要することから、IPMSMは最適設計期間が長期化するという問題点があり、高性能なIPMSMを短期間で効率的に設計できる自動設計システムが必要とされている。

以上で述べた課題を考慮し、本論文では、実際に研究開発中の強磁力磁石を用いた自動車駆動用IPMSMを対象として、高効率化・小型化・低トルクリプル化を目的とした最適構造の検討を実施した。また機械学習や深層学習を活用したIPMSMの自動設計システムを提案し、IPMSMの設計時間を大幅に短縮できることを示した。以下に各章の内容を示す。

第1章では、本論文の研究背景、目的、各章の概要を示した。

第2章では、本研究の解析対象であるIPMSMの理論的な数式モデルや制御法について記述した後、有限要素解析（FEA：Finite Element Analysis）を用いてIPMSMの運転特性を評価する方法について説明した。

第3章では、3代目プリウス駆動用モータをモデル化した1層V字構造IPMSMを基準モデルに設定し、このIPMSMに強磁力磁石を適用したモデル、さらに強磁力磁石の配置を2層構造に変更したモデルの特性解析結果を比較し、自動車駆動用IPMSMの運転特性に及ぼす永久磁石の特性と配置の影響を検討し、2層構造の磁石配置は1層V字構造の磁石配置よりも出力、効率の面で残留磁束密度の大きい強磁力磁石に適していることを示した。次に、強磁力磁石を用いた2層構造IPMSMの更なる運転特性の向上のため、積厚を薄くすることで小型・軽量化を目指したモデルとコア材料に低鉄損材料を適用することで高効率化を目指したモデルを提案し、運転特性の基準モデルとの比較、検討を行った。結果として、小型モデルは積厚を小さくしたことにより、高効率モデルは鉄心材料の飽和磁束密度が低下したことにより、どちらの提案モデルも最大トルクは基準モデルとほぼ同等の値となった。また損失の比較を行うと、提案モデルはどちらも運転領域全体で基準モデルより鉄損が低減し、効率が向上した。さらに提案モデル同士を比較すると、損失の基準モデルからの低減率は高効率モデルの方が大きく、基準モデルに比べて最大50%以上の損失低減を達成した。以上より、小型モデルは基準モデルよりも高い効率を維持しながら10%の小型化を達成し、高効率モデルは3つのモデルで最も高効率となることが明らかとなった。

第4章では、第3章で提案した高効率モデルと基準モデルの2つのモデルに対して、パルス幅変調インバータのキャリア高調波を考慮した入力電流を用いて運転特性の解析を行い、発生する損失特性について比較、検討を行った。また、キャリア周波数を5, 10, 20 kHzの3種類に設定し、キャリア周波数の高周波化によるモータ損失への影響の検討も行った。結果として、キャリア周波数を5 kHzに設定したモデルでは速度に対する出力、ヒステリシス損、渦電流損特性に乱れが生じたが、その他の設定では出力特性に大きな影響は表れなかった。それに対し鉄損特性を比較すると、ほぼ全ての速度域で5, 10, 20 kHzの順番にヒステリシス損、渦電流損共に大きい値となった。次に、損失の最も低減されるキャリア周波数20 kHzに設定したモデルに関して、正弦波駆動時との運転領域全体における損失の比較を行うと、低トルク域を中心に特に基準モデルで鉄損が増加したため、高効率モデルは基準モデルに対して最大60%以上損失を低減することが明らかとなった。

第5章では、第3章の提案モデルの一つである高効率モデルのトルクリプルが大きいという問題点を解決するため、まずホールを設けたロータ構造を有する2層構造IPMSMのトルク特性について検討を行った。さらに窪みを設けたモデルを作製し、トルクリプルの低減を図った。結果として、ホールを設けたモデル、ホールと窪みを設けたモデルの最大平均トルクは高効率モデルに比べて3.6, 3.7%小さくなったが、トルクリプル率はそれぞれ55.0, 66.0%低減できた。また運転領域全体のトルクリプルの比較を行うと、2つの提案モデルのトルクリプルはほぼ全ての運転領域で高効率モデルより低減できた。また提案モデル同士を比較すると、高トルク領域ではホールと窪みを設けたモデルのトルクリプルの方が小さいが、運転領域全体で比較するとホールのみを設けたモデルの方がトルクリプル低減効果は大きかった。したがって、ホールを設けたモデルは幅広い運転領域でトルクリプルを最も低減できる構造であり、ホールと窪みを設けたモデルは特に高トルク領域でトルクリプルを抑えられる構造であることが明らかとなった。

第 6 章では、2 層構造 IPMSM の速度—トルク特性を正確に予測するための回帰モデルの構築手法を提案し、回帰モデルを用いた磁石量最小化設計では、設計時間を大幅に短縮できることを示した。モータパラメータを予測対象として回帰モデルを構築し速度—トルク特性を予測すると、トルクと限界速度を直接予測する手法に比べて、トルクの予測誤差を低減できた。さらに提案手法による速度—トルク特性予測は FEA に比べて計算時間を 2.5 %にまで短縮できた。学習した回帰モデルを用いて磁石量最小化設計を実施すると、要求動作点を満足しつつ従来モデルよりも磁石量を低減する形状が入手でき、さらに FEA による最適化計算時間に比べて 2.9~6.9 %にまで設計時間を短縮できることがわかった。

以上の磁石量最小化設計では不可逆減磁特性を考慮していなかったため、不可逆減磁特性を予測可能な回帰モデルを構築した。モデルの精度向上のため、減磁評価用電流を通電したときの各磁石の見かけ上のパーミアンス係数を予測対象とすると、回帰モデルは高精度に磁石の不可逆減磁状態を評価できることがわかった。構築した回帰モデルを用いることで、耐減磁制約を考慮した磁石量最小化設計を実施可能となり、得られた最良個体は要求動作点と耐減磁制約を満足しながら 26.2 %の磁石量削減を達成した。さらに回帰モデルを用いた最適化設計は FEA のみの最適化設計時間に比べて 3.1 %にまで設計時間を短縮できることがわかった。

第 7 章では、複数のトポロジーに対象範囲を拡大した IPMSM のロータ形状最適化設計の時間短縮のため、深層学習技術を活用した自動設計システムを提案した。まず、各トポロジーに特化した機械学習手法を活用し、少数の FEA 結果から大量の教師データを生成する手法を提案した。本手法により、26,209 ケースの FEA 結果から、102,795,000 ケースの学習データを 3.6 時間で生成可能となった。続いて、敵対的生成ネットワークを活用して 3 つのロータトポロジーを設計可能な深層生成モデルを学習した。学習した生成モデルでは、膨大な設計変数空間を 256 次元の潜在変数空間に圧縮し、様々な設計可能形状を潜在変数空間で一元的に表現可能となった。特性予測に関してはマルチタスク畳み込みニューラルネットワークを活用し、入力する形状画像から幅広い電流ベクトルにおけるモータパラメータ特性を短時間で予測可能となった。また構築した回帰モデルは、データ生成時の機械学習による予測誤差を限界はあるものの補正可能であることもわかった。以上の 2 つの深層学習モデルを統合して構築した自動設計システムでは、複数のロータトポロジーの特性を同時に考慮した最適化設計を実施可能となった。最適化設計を実施すると、パレート解では FEA 結果とシステムの予測結果がほぼ同等の速度—トルク特性を示し、どの形状も要求制約を満足することがわかった。さらに、システムによる最適化計算時間は 13~15 秒程度であり、従来の数日~数週間という計算時間に比べて大幅な計算時間の短縮を達成した。

第 8 章では、本論文で得られた結果をまとめた。

審査結果の要旨

本論文は、自動車駆動用 IPMSM を対象として、強磁力磁石を用いた IPMSM の最適構造設計および機械学習や深層学習を活用した IPMSM の自動設計システムについて研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 自動車駆動用 IPMSM の回転子構造として、2 層構造の磁石配置は一般的な 1 層 V 字構造の磁石配置よりも出力、効率の面で残留磁束密度の大きい強磁力磁石に適していることを明らかにし、10%の小型化が実現できることを示した。また、コア材料に低鉄損材料を適用することで大幅な損失低減が可能であることを明らかにした。
- (2) インバータの PWM キャリア高調波を考慮したときの損失特性について検討し、低鉄損材料を適用した 2 層構造 IPMSM は、従来構造の基準モデルに対して最大 60 %以上損失が低減することを明らかにした。

- (3) 2層構造 IPMSM のトルクリプルの低減のために、ロータにホールおよび窪みを設けた構造を検討し、ホールおよび窪みの最適な配置により、トルクリプルを半減できることを明らかにした。
- (4) IPMSM の自動設計システムにおいて、2層構造 IPMSM の速度—トルク特性を正確に予測するための回帰モデルの構築手法を提案し、回帰モデルを用いた磁石量最小化設計では、設計時間を大幅に短縮できることを示した。さらに、永久磁石の不可逆減磁特性を予測可能な回帰モデルを構築することで、耐減磁制約を考慮した磁石量最小化設計が実施可能となり、得られた最良個体は要求動作点と耐減磁制約を満足しながら磁石量削減と大幅な設計時間の短縮を実現した。
- (5) 2層構造 IPMSM に加え複数のトポロジーに対象範囲を拡大した IPMSM のロータ形状最適化設計の時間短縮のため、深層学習技術を活用した自動設計システムを提案した。各トポロジーに特化した機械学習手法を活用し、少数の FEA 結果から大量の教師データを生成する手法および敵対的生成ネットワークを活用したロータトポロジーを設計可能な深層生成モデルを統合した自動設計システムを提案し、複数のロータトポロジーの特性を同時に考慮した最適化設計が可能となり、大幅な計算時間の短縮を達成した。

以上の諸成果は、自動車の電動化が加速している中で、小型化および高効率化が求められている自動車駆動用モータにおいて、小型・高効率な自動車駆動用モータの実現とその適用範囲の拡大に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。