

称号及び氏名	博士（工学） 小林 眞莉香
学位授与の日付	令和 4 年 3 月 31 日
論文名	「リラクタンストルクを活用した省・脱レアアースモータの 高性能化に関する研究」
論文審査委員	主査 森本 茂雄 副査 石亀 篤司 副査 小西 啓治

論文要旨

埋込磁石同期モータ（IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor）は、効率が高く可変速運転範囲が広い用途で使用されている。しかし、IPMSM のロータ（回転子）に使用される希土類焼結磁石は高いエネルギー積を得るために多くのレアアースを含んでいる。なかでも、ジスプロシウム（Dy: Dysprosium）などの重レアアースは世界生産量の多くが特定の地域に限定されており、今後の価格高騰や長期にわたる資源確保のリスクが問題視されている。そのため、Dy などの重レアアースを使用しない省レアアースモータ、またはレアアースを一切使用しない脱レアアースモータの開発が望まれる。

省レアアースモータの候補として、希土類焼結磁石の代わりに希土類ボンド磁石を適用したモータが注目されている。希土類ボンド磁石は、磁力（最大エネルギー積）が希土類焼結磁石と比べて 1/4 程度であるが Dy を含まず安価である。従来研究では、数十 kW 級の自動車駆動用モータへの適用が検討されているが、ボンド磁石の不可逆減磁が考慮されていない。大電流・高温で駆動する自動車駆動用モータにボンド磁石を適用する際、不可逆減磁の考慮が必要不可欠である。不可逆減磁を考慮した上で、希土類焼結磁石を用いた IPMSM と同等の出力、効率を得る希土類ボンド磁石を用いたモータの開発が望まれる。

省・脱レアアースモータの高出力化、高効率化に加えて、低振動化も重要な課題である。省・脱レアアースモータの中でも永久磁石補助型同期リラクタンスマータ（PMASynRM: PM Assisted Synchronous Reluctance Motor）は、リラクタンストルクを最大限に活用するためロータに多層の磁石を埋め込んだ構造を有する。そのため、PMASynRM は表面磁石同期モータ（SPMSM : Surface PMSM）に比べてエアギャップ中に発生する磁束密度波形に多くの空間高調波を含み、コギングトルクが大きい課題がある。コギングトルクは低速時のモータ騒音や振動の要因となるため、平均トルクを維持したまま、コギングトルクを低減する構造の検討が必要である。

また、永久磁石を一切用いない脱レアアースモータとして、リラクタンストルクのみで駆動する同期リラクタンスマータ (SynRM) が注目されている。SynRM は、現在の産業用モータとして主流である誘導モータと比べて同体格での出力密度が高く高効率である。しかし、ロータに多層の空気層より成る磁束障壁 (フラックスバリア) を持つため、通電時のトルクリプルが大きい課題がある。SynRM の出力や効率を維持したまま、トルクリプルを低減する構造の検討が必要である。

以上に述べた課題を考慮し、本論文では、リラクタンストルクを活用した省レアアースモータである Dy を含まない希土類ボンドを用いた PMASynRM と脱レアアースモータである SynRM の高性能化について検討を行った。ロータ構造設計により、高出力、高効率、低振動化を実現し、モータの省資源化を図ることを目的とした。本研究の省・脱レアアースモータが実現できれば、従来の希土類焼結磁石を用いた IPMSM よりも省資源化・コスト削減が期待でき、高効率なモータを世界中に広く普及させることができる。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、Dy を含まず安価な希土類ボンド磁石を用いた自動車駆動用 PMASynRM を提案した。機械強度の制約下でボンド磁石適用 PMASynRM のロータ構造を設計した結果、リラクタンストルクを活かした磁石形状の最適設計によって自動車駆動用モータに要求される幅広い速度範囲での高出力特性を満足することを示した。また、ボンド磁石のリコイル曲線の測定値を用い、リコイル比透磁率 μ_{rec} が逆磁界の強さと磁石温度に伴い変化することを考慮した減磁解析手法を提案した。提案した減磁解析の結果と、 μ_{rec} を定数とした減磁解析結果を比較した結果、検討した減磁条件においては両者に大きな差は無いことを示した。したがって、検討した減磁条件においては、簡易的に μ_{rec} を定数とした減磁解析でも問題ないことを明らかにした。さらに、不可逆減磁を考慮したボンド磁石適用 PMASynRM と希土類焼結磁石を用いた HV 駆動用 IPMSM の運転特性を有限要素法 (FEM : Finite Element Method) 解析により比較した。その結果、ボンド磁石適用 PMASynRM は磁石温度 100°C において、トルク、出力、効率特性の全てにおいて同等以上の性能を達成することを明らかにした。一方で、磁石温度 150°C においては、ボンド磁石の材料特性の低下が顕著となるため、ボンド磁石適用 PMASynRM の方が高速域のトルク、出力が低く、ほぼ全運転領域の効率が低くなることを示した。

第 3 章では、ロータに 2 層の希土類ボンド磁石を有する PMASynRM のコギングトルク低減を目的とし、ロータ表面に溝を設けたロータ構造を検討した。コギングトルクを低減する溝を設計するためには、溝の位置や幅、深さなど多くの寸法を最適化する必要がある。全ての寸法を FEM 解析による試行錯誤で求める場合、解析時間が非常に長くなってしまう。そこで、溝の新しい設計手法として、時間がかかる FEM 解析を必要最小限に抑え、主に理論式に基づいて最適設計する手法を提案した。FEM 解析より求めた溝の無い基準モデルのギャップ中の磁束密度分布の 2 乗波形 (以下、 B_g^2 波形) を近似した。階段波形と台形波形の 2 通りの近似波形を検討した結果、台形波近似の方が磁石配置に関係なく高精度に近似できることを示した。ロータ表面に溝を設けたモデルの B_g^2 波形を定義し、コギングトルクの主要成分が最小となる理想的な B_g^2 波形を理論的に導出することで、最適な溝の位置と幅を決定した。その後、溝の深さの最適値を FEM 解析により求めた。最適な溝の構造が得られるまでに FEM 解析したケース数は僅か 6 ケース程であり、数百、数千ケースにも及ぶ従来法 (FEM 解析のみによる試行錯誤) に比べて大幅な時間短縮ができた。提案手法の汎用性を示すために、ボンド磁石適用 PMASynRM に加えて、モータ体格や磁石形状が異なる 2 種類の IPMSM に最適な溝を設計した結果、全てのモデルにおいてコギングトルクが 80%以上低減することを解析により示した。また、溝による平均トルクの低下は 1%以下であり、平均トルクをほぼ維持できることを示した。

第 4 章では、ロータに 4 層のフラックスバリアを有する SynRM のトルクリプル低減を目的とし、機械的強度を考慮した非対称なロータ構造を有するモデルを提案した。なお、定格出力 7kW の産業用 SynRM を基準モデルとし、そのトルクリプル率は 19.5%であった。提案した非対称モデルは 2 通りある。1 つ目は、1 つのロータコアに 2 種類のフラックスバリア形状を組合せたモデル

ルであり、トルクリプルが 6.4%まで低減することを解析により示した。このモデルは、ロータコアの金型が 1 種類で済むため製造コストが基準モデルとほぼ変わらない利点がある。2 つ目は、フラックスバリア形状が異なる 2 種類のロータを積厚方向に組み合わせて積厚比率を最適化したモデルであり、トルクリプルが 4.9%まで低減することを解析により示した。このモデルは、2 種類のロータコアの金型が必要となるが、積厚比率を最適化することでトルクリプル低減効果がより大きいことを明らかにした。また、基準モデルとトルクリプルが最小となった積厚方向に非対称なモデル (2 つ目の非対称モデル) の試作機を製作し、その瞬時トルク波形および平均トルク、効率などの基本特性を測定した。実験結果より、提案した積厚方向に非対称なモデルは基本特性を維持しながらトルクリプルを低減できることを確認した。

第 5 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、重希土類を使用しない省レアアースモータと磁石を使用しない脱レアアースモータの高性能化について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) ジスプロシウムを含まず安価な希土類ボンド磁石を用いた自動車駆動用 PMASynRM を提案し、機械強度の制約下でリラクタンストルクを活かした磁石形状の最適設計により、要求される幅広い速度範囲での高出力特性を満足するとともに、100°C以下の温度条件においては、希土類焼結磁石を用いたハイブリッド自動車駆動用モータと同等以上の出力、効率特性を達成することを明らかにした。
- (2) 希土類ボンド磁石の減磁解析を正確に行うために、リコイル曲線の測定値を用いてリコイル比透磁率が逆磁界の強さと磁石温度に伴い変化することを考慮した減磁解析手法を提案した。提案した減磁解析の結果と、リコイル比透磁率を定数とした減磁解析結果を比較した結果、検討した減磁条件においては両者に大きな差は無いことを明らかにした。
- (3) ロータに 2 層の希土類ボンド磁石を有するモータのコギングトルク低減を目的とし、ロータ表面に溝を設けたロータ構造を検討し、溝の位置や幅、深さなど溝の新しい設計手法として、時間がかかる磁界解析を必要最小限に抑え、主に理論式に基づいて最適設計する手法を提案した。提案手法を 3 種類のモータに適用した結果、全てのモデルにおいてコギングトルクを 80%以上低減できることを解析により確認した。また、溝による平均トルクの低下は 1%以下であり、平均トルクをほぼ維持できることも確認した。
- (4) ロータに 4 層のフラックスバリアを有し、磁石を使用しない脱レアアースモータである同期リラクタンスモータのトルクリプル低減を目的とし、機械的強度を考慮した非対称なロータ構造を有する新規構造を提案した。1 つのロータコアに 2 種類のフラックスバリア形状を組合せたモデルではトルクリプルが 6.4%まで低減すること、フラックスバリア形状が異なる 2 種類のロータを積厚方向に組み合わせて積厚比率を最適化したモデルではトルクリプルが 4.9%まで低減することを解析により明らかにした。後者のモデルの試作機を製作し、実験結果より提案構造は基本特性を維持しながらトルクリプルを低減できることを確認した。

以上の諸成果は、電動化が加速して小型・高効率な埋込磁石同期モータで使用される希土類材料、特に重希土類に対する資源リスクが問題となっている中で、本論文で提案した省・脱レアアースモータは、低価格で安定供給可能な高性能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。