

称号及び氏名 博士（工学） 吉川 祐一

学位授与の日付 平成 29 年 3 月 31 日

論文名 「永久磁石同期モータの高トルク密度化に関する研究」

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

東日本大震災以降、地球環境保護の観点や二酸化炭素排出規制の影響により、国内全消費電力の約半分を消費しているモータに対して、省エネルギー化の要求が非常に高まってきている。この流れによって、家電製品に使用されるモータだけでなく、産業用、車載用などの様々なモータにおいて、高効率化が求められており、回転子に永久磁石を用いた永久磁石同期モータ（PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor）の普及が加速している。

また、日本国内においては、PMSM の一つである埋込磁石形同期モータ（IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor）の研究開発による技術進化によって、コンプレッサ用モータや HEV 用のモータなどで 95% を超える効率を実現している。しかしながら、効率を向上させるためには、モータ内部で強い磁束を発生させる希土類焼結磁石を使用する必要がある。希土類焼結磁石は、ネオジムと鉄とボロンを主成分とした永久磁石であり、モータに用いることで高効率、高出力化が実現できる。しかし、希土類磁石に含まれる成分の中でも重希土類と呼ばれ、永久磁石の保磁力を高めるために添加されるジスプロシウムやテルビウムなどは、採掘できる個所が世界でも限られていることから、非常に高価になるため、高級な家電製品に用いられるモータや自動車用の主機モータでしか使用されていないのが実情である。

さらに、尖閣諸島問題に端を発した希土類元素の供給問題によって、希土類焼結磁石は、価格が高騰するなどの供給リスクが発生した。これにより、脱重希土類や省希土類をコンセプトとしたモータの開発が様々な研究機関で進められている。例えば、希土類焼結磁石の代替として、安価で安定供給可能なフェライト磁石を用いたスポーク状 IPMSM、ダブルステータ型のアキシシャルギャップモータ、アモルファスモータ、ハイブリッド界磁モータなどが

提案されており、希土類焼結磁石を用いた IPMSM (以下、希土類焼結 IPMSM) と比較して、同等程度の特徴が確認されている。しかしながら、アモルファス金属や圧粉磁心などの高価な材料を使用する必要があることや、構造が複雑になること、ロータ強度が悪化するなど、希土類焼結 IPMSM と置き換わるためには、課題が残されている。また、希土類焼結磁石ではなく、比較的安価な Dy を使用しない希土類ボンド磁石を用いたモータ、希土類ボンド磁石を用いた IPMSM (以下、希土類ボンド IPMSM) も提案されているが、希土類焼結 IPMSM と同等の特徴を満足させるためには、極数の変更や、回転数の向上などの条件が必要となる。以上のことから、希土類焼結磁石の代替としてフェライト磁石や、希土類ボンド磁石を用いるためには、ステータコアに高価な材料を使用することや、モータの構造を複雑にする必要がある、実用化するためには永久磁石以外のコストが高価になる恐れがある。そこで、モータの効率を大きく下げることなく、モータの主要材料を安価なものに変えていくことができれば、高効率なモータを広く普及することができ、本当の意味で省エネルギー化が実現できると考える。PMSM の設計において、ステータコアの積厚やステータ径などのモータ体格は、モータ出力と使用環境等によって決定される。モータ出力を向上させるためには、トルクを向上させるか、回転数を向上させるかをしなければならない。しかし、モータの回転数は、減速機を含むモータ以外では、機器の仕様にかかわるため、変更することが困難である。そのため、同一体格でのモータ出力の向上には、トルクの向上が必須となる。これは逆に考えると、モータ出力を同一とした場合においては、体格の小さいモータで同一のトルクを出力することができれば、モータの出力密度 (モータ出力 / 体積) は向上させることができる。そこで、本研究では、効率を低下させずにトルク密度 (トルク / 体積) を向上させることで、小型化を実現し、省資源化を図ることを目的とした。この目的が達成できれば、安価な PMSM を実現し、高効率な PMSM を世界に広く普及させることが可能であると考えられる。

本論文は、このような背景に基づき、PMSM の高トルク密度化をモータの構造、形状面で実現する方法に関して一連の研究結果をまとめたものである。

PMSM において、出力トルクは、永久磁石によるマグネットトルクと、d 軸インダクタンスと q 軸インダクタンスの差によって生じるリラクタンストルクによって表される。同一電流の条件下で PMSM の出力トルクを向上させるためには、永久磁石による鎖交磁束を大きくするか、d 軸インダクタンスと q 軸インダクタンスの差を大きくすることが必要である。

以上の事から、PMSM の高トルク密度化には、以下に示す 3 つの方法があると考えられる。まず、マグネットトルクを向上させる方法として、永久磁石による鎖交磁束を大きくするために、残留磁束密度 B_r の大きい永久磁石を有効的に用いることと、エアギャップの面積を拡大することが考えられる。次に、リラクタンストルクを活用することである。

まず、永久磁石を有効的に用いて高トルク密度化していく方針について説明する。永久磁石は、 B_r が大きくなると共にコストが高くなり、 B_r が最も大きい希土類焼結磁石を用いることが、最も PMSM の高トルク密度化に効果的である。しかしながら、希土類焼結磁石は、コストの観点で課題が多く、歩留まり悪化につながるような形状を構成することが難しいため、平板形状で用いることが多くなっている。

一方、フェライト磁石と希土類ボンド磁石は、希土類焼結磁石に比べると B_r は約 50% 程度から 30% 程度と低い、コストが大幅に安くなる。希土類ボンド磁石は、希土類磁石の磁粉と樹脂等を混練して成形するため、樹脂材料や樹脂との配合比を工夫するなどによる永久磁石の高密度化が進められていることや、既に Dy レスの希土類ボンド磁石用の磁粉が、市場に流通していることから、今後の研究開発による進化が期待できる。また、フェライト磁石は、主要な原材料が酸化鉄であるため、コストが安く資源リスクも低いため、非常に有用な永久磁石であると考えられる。これらの事から、本研究の対象とする永久磁石は、フェライト磁石と希土類ボンド磁石とし、これらの永久磁石を有効的に活用することに着目し、検討を行っている。

次に、エアギャップ面積の拡大について説明する。マグネットトルクは永久磁石による鎖

交磁束に比例する。鎖交磁束はロータの永久磁石からステータ巻線に鎖交する磁束であるため、ステータとロータの隙間であるエアギャップに依存する。すなわち、エアギャップでのロス小さくするためには、エアギャップを短縮するか、エアギャップ面積を拡大することが必要であり、これらの対策を実施することによって、永久磁石による鎖交磁束は大きくなると考えられる。しかしながら、エアギャップの面積は一般的なラジアルタイプの PMSM の場合、ステータ、ロータの径とコア積厚によって一意的に決定されるため、新たなモータ構造が必要となる。

最後にリラクタンストルクの活用については、IPMSM を始めとした様々なモータ形式において研究開発が進んでいる。リラクタンストルクは、極数とスロット数の組み合わせや、巻線方式、モータの形状によって大きく変化する。しかしながら、本研究においては、補助的な位置付けとして、リラクタンストルクを活用している。

以上の事から、本研究では PMSM の構造や形状に着目し、トルク密度の向上を図るために、モータの限られたスペースの中で、永久磁石の磁束を有効的に活用し、鎖交磁束を大きくする方法を提案している。

本論文は、緒論、結論を含め全 5 章で構成される。

まず第 2 章では、モータの構造を 2 次元的に捉え、ギャップ面積を最大限に拡大するために、ステータの内側と外側にロータを配置したデュアルロータ構造の PMSM を提案している。ステータにトロイダル巻線を施すことによって、ステータの内側と外側に配置したロータに同時にトルクを発生させることができる。これにより、永久磁石を配置できる箇所が大幅に拡大されるため、従来のフェライト磁石を用いた PMSM に比べて、高トルク密度化が実現できることが期待できる。フェライト磁石を用いたデュアルロータ構造の SPMSM と希土類焼結磁石を用いた IPMSM を比較し、シミュレーションと試作機による実験の両面から総合的に評価した結果、インナーロータとアウターロータの二つトルクが利用できるため、希土類焼結磁石を用いた IPMSM と同等のトルク密度を実現可能であることが確認できた。

第 3 章では、第 2 章とは異なるアプローチでギャップ面積の拡大について検討している。ステータコアの上下面の電磁鋼板を折り曲げることにより、ギャップ面積を拡大する SPMSM を提案している。電磁鋼板を折り曲げることによって発生するうず電流損と、エアギャップ面積拡大による効果を、シミュレーションと試作機による実験により検討を行った。これにより、電磁鋼板を折り曲げてエアギャップ面積を拡大することによって、永久磁石を有効的に活用することができ、トルク密度を向上できることが確認できた。

第 4 章では、低コストで高効率を実現するモータとして、従来の希土類焼結磁石を用いた IPMSM に対して、希土類ボンド磁石をロータ内部に直接成形することによって、ロータを構成する希土類ボンド磁石を用いた IPMSM を提案している。特に、ロータの永久磁石挿入部の最適形状をシミュレーションにより明らかにし、希土類ボンド磁石の磁石材料と、希土類ボンド磁石をロータの永久磁石挿入孔に直接成形することによる効果を示している。また、希土類焼結磁石を用いた IPMSM と希土類ボンド磁石を用いた IPMSM の試作機を作成し、シミュレーションと実験の両面から総合的に評価している。その結果、希土類ボンド磁石を用いた IPMSM は、形状と工法の工夫によって、希土類焼結磁石を用いた IPMSM と同等のトルク密度を実現できることが確認できた。

最後に、第 5 章では、結論として本論文についての総括を述べる。

審査結果の要旨

本論文は、重希土類を使用しない永久磁石同期モータの高トルク密度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) モータの構造を 2 次元的に捉えギャップ面積を最大限に拡大するために、ステータの内側と外側にロータを配置したデュアルロータ構造の PMSM を提案した。提案構造では、永久磁石を配置できる箇所が大幅に拡大されるため、従来のフェライト磁石を用いた PMSM に比べて高トルク密度化が実現できること、希土類焼結磁石を用いた IPMSM と同等のトルク密度を実現可能であることをシミュレーションと試作機による実験の両面から確認した。
- (2) ステータコアの上下面の電磁鋼板を折り曲げることにより、ギャップ面積を拡大する SPMSM を提案した。電磁鋼板を折り曲げることによって発生するわず電流損とエアギャップ面積拡大による効果について、シミュレーションと試作機による実験により検討を行い、電磁鋼板を折り曲げてエアギャップ面積を拡大することによって永久磁石を有効的に活用することができ、トルク密度を向上できることを確認した。
- (3) 低コストで高効率を実現するモータとして、従来の希土類焼結磁石を用いた IPMSM に対して、希土類ボンド磁石をロータ内部に直接成形することによってロータを構成する希土類ボンド磁石を用いた IPMSM を提案した。希土類焼結磁石を用いた IPMSM と希土類ボンド磁石を用いた IPMSM の特性について、シミュレーションと実験の両面から総合的に評価して、希土類ボンド磁石を用いた IPMSM は、形状と工法の工夫によって希土類焼結磁石を用いた IPMSM と同等のトルク密度を実現できることを確認した。

以上の諸成果は、重希土類を使用しない永久磁石同期モータにおいて、効率を低下させずにトルク密度を向上させ、小型化と省資源化を実現するもので、安価で高効率な永久磁石同期モータを世界に広く普及させることが可能となり、省エネルギー化や地球環境保護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。