

マキノ ヒロアキ

| | |
|-------------|--|
| 氏 名 | 牧野 宏明 |
| 学 位 の 種 類 | 博士（工学） |
| 学 位 記 番 号 | 博第1021号 |
| 学位授与の日付 | 平成28年3月23日 |
| 学位授与の条件 | 学位規則第4条第1項該当 課程博士 |
| 学 位 論 文 題 目 | 用途指向形SRモータの制御に関する研究 (Study on Control of Application Oriented Switched Reluctance Motors) |

| | | | |
|--------|-----|-----|-------|
| 論文審査委員 | 主 査 | 准教授 | 小坂 卓 |
| | | 教授 | 岩崎 誠 |
| | | 教授 | 森田 良文 |

論文内容の要旨

環境保護が重要になっている現代社会において、電気―機械エネルギー変換デバイスの1つであるモータは、自動化・電動化の流れと相俟って、エネルギー消費量の多くを占める産業部門・運輸部門の省エネルギー化に貢献している。近年、特にレアアース材で組成されるネオジム系磁石を配した永久磁石形同期モータは、誘導機など従来モータに比べて小型軽量・高効率といった優れた特徴を持つ。例えば表面磁石形同期モータの場合、高トルク密度・高精度トルク制御という観点から、産業用サーボモータで実用されている。広い速度範囲で大出力特性が得られる埋込磁石形同期モータにあつては、ハイブリッド車(HEV)や電気自動車(EV)の駆動モータとして実用されている。同じ永久磁石形同期モータであっても、産業用サーボモータ、EV駆動用モータとしては、全く異なる性能が要求されるため、用途の要求性能と制約条件に対して特化設計された、用途指向形モータとして実用に供しているのが現状である。一方、永久磁石形同期モータの優れた性能は、レアアース材を使用したレアアース磁石の強力な磁力に依存する。しかし、希少資源であるレアアース材の価格・供給量は、産出国の社会情勢などの影響を強く受けてきている。例えば、ネオジム系磁石を組成するディスプロシウム(Dy)は、2010年6月～2011年7月の間に尖閣諸島問題などがあり、その価格は10倍以上に高騰した。そのため、永久磁石形同期モータの代替が可能な省・脱レアアースモータの開発が望まれている。

本論文では、その一候補としてスイッチトリラクタンスモータ（以下、SR モータ）に注目している。SR モータは磁石を一切用いず鉄と銅のみで構成され、巻線が集中巻であるなど構造が単純であることから製造容易であり、機械的に堅牢であることから安価な高速回転型の高出力モータとして期待できる。一方、SR モータはトルク脈動、振動・騒音が大きいことが課題として知られており、様々な用途への適用の妨げとなっており、その対策が重要な研究開発事項となっている。

上記背景の下、本研究では、（１）産業用サーボドライブ、（２）電気自動車駆動への適用を前提に、それぞれの用途において要求性能と制約条件を加味して設計された用途指向形 SR モータを対象に、トルク脈動や振動・騒音などを克服するための新しい制御法について検討している。（１）の産業用サーボドライブでは、特に位置決め時の正確な瞬時トルク制御性能が重要となる。トルク脈動を抑制し、かつ応答性の優れたトルク制御法の確立を目的としている。（２）電気自動車駆動では、その静穏性が重要であり、誘導電動機や永久磁石形モータとは異なる動作原理に起因して生じる SR モータ固有の振動発生原理の理論的な解明を起点に、振動・騒音抑制制御法を提案し、トルク脈動低減や高効率化を両立する手法の確立を目的としている。

本論文は、上記背景に従って 7 つの章で構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章では、省・脱レアアースモータの必要性和それを取り巻く研究開発動向について述べる。また、SR モータの特徴と代表的な運転法について述べる。

第 2 章では、産業用サーボモータとして設計試作された SR モータを対象に、瞬時電流波形制御によるトルク脈動抑制制御法の原理を述べる。提案制御法は、一定のトルク波形を得るための理想電流波形指令生成と、その電流波形を実現するための電圧制御法で構成され、トルク脈動抑制効果を解析および実験で検証している。

第 3 章では、前章を受け、瞬時電流波形制御に用いる電流指令値追従のための電圧制御法を提案している。従来制御法である電流ヒステリシス制御を比較対象に、電流制御性能・運転効率・運転音の観点から実験的に有用性を検証している。

第 4 章では、一般的な同期モータにも共通した振動発生原理の捉え方を述べ、これを SR モータに適用した場合に生じる固有の問題について明らかにし、SR モータに特化した振動加振源の解析法を提案している。

第 5 章では、電気自動車駆動用として設計試作された SR モータを対象に、振動騒音抑制制御の原理を説明し、実験的にその有用性を評価している。また、トルク脈動低減・高効率運転との同時達成を実現する手法についても検討している。

第 6 章では、特定の条件で制振性能が劣化する要因を述べる。この対策として、振動抑制制御を前提としたロータ形状設計法を提案し、解析により制振性能向上効果を検証する。

第 7 章では、本研究で得られた成果ならびに今後の課題について、整理している。

論文審査結果の要旨

資源枯渇問題ならびに地球温暖化問題の対策として省エネルギー化が重要となっている現代社会において、低コストで高い耐環境性を有し、かつ高効率を実現する新たなモータの開発がキーテクノロジーとなっている。これに対し、レアアース材で組成されるネオジム系磁石を配した永久磁石形同期モータ（以下、PMSMと略記）は、誘導電動機など従来モータに比べて小型軽量・高効率といった優れた特徴を有し、例えば、産業用サーボモータ、EV駆動用モータなど、現在、幅広い用途で普及している。これら多岐に亘る用途に対し、モータには全く異なる性能が要求されるため、用途の要求性能と制約条件に対して特化設計された用途指向形モータとして、PMSMは実用化されている。PMSMの優れた性能は、前述のようにレアアース材を使用したレアアース磁石の強力な磁力に依るものであるが、希少資源であるレアアース材の価格・供給量は、産出国の社会情勢などの影響を強く受ける。このため、永久磁石形同期モータの代替が可能な省・脱レアアースモータの開発が望まれている。

上述の背景の下、本論文は、磁石を一切用いず鉄と銅のみで構成され、巻線が集中巻であるなど構造が単純であることから製造容易であり、機械的に堅牢であることから安価な高速回転型の高出力モータとして期待されるスイッチトリラクタンスモータ（以下、SRモータと略記）を、脱レアアースモータの一候補として取り上げている。SRモータはトルク脈動、振動・騒音が大きいことが課題として知られており、様々な用途への適用の妨げとなっている。その対策はSRモータの普及に向けて極めて重要な研究課題である。本論文では、(A)産業用サーボドライブ、(B)電気自動車駆動への適用を前提に、それぞれの用途において要求性能と制約条件を加味して設計された用途指向形SRモータを対象に、トルク脈動や振動・騒音などを克服するための新しい制御法について纏めたものである。具体的には、(A)産業用サーボドライブでは、特に位置決め時の正確な瞬時トルク制御性能が重要で、トルク脈動を抑制し、かつ応答性の優れたトルク制御法を提案している。(B)電気自動車駆動では、その静穏性が極めて重要であり、誘導電動機やPMSMとは異なる動作原理に起因して生じるSRモータ固有の振動発生原理の理論的な解明を起点に、振動・騒音抑制制御法を提案し、トルク脈動低減や高効率化を両立する制御法を提案している。

本論文の各章の概要は以下の通りである。

第1章では、省・脱レアアースモータの必要性とそれを取り巻く研究開発動向について述べ、SRモータの特徴と代表的な運転法を説明して、本論文で目的とする制御上の課題について明確にした。

第2章では、産業用サーボモータとして設計試作されたSRモータを対象に、瞬時電流波形制御によるトルク脈動抑制制御法の原理を述べ、その原理に基づき、一定のトルク波形を得るための理想電流波形指令生成とその電流波形を実現するための電圧制御法で構成されるトルク制御法を提案し、その有用性を解析および実験で検証した。

第3章では、前章を受け、瞬時電流波形制御に用いる電流指令値追従のための電圧制御法を提案している。従来制御法である電流ヒステリシス制御を比較対象に、電流制御性能・運転効率・運転音の観点から実験的に有用性を検証した。

第4章では、一般的な同期モータにも共通した振動発生原理の捉え方を述べ、これをSRモータに適用した場合に生じる固有の問題について明らかにし、SRモータに特化した振動加振源の解析法を提案した。

第5章では、電気自動駆動用として設計試作されたSRモータを対象に、振動騒音抑制制御の原理を説明し、実験的にその有用性を評価した。加えて、トルク脈動低減・高効率運転の同時達成を実現する手法についても検討し、その有用性を評価した。

第6章では、特定の条件で制振性能が劣化する要因を述べ、その対策として振動抑制制御を前提としたロータ形状設計法を提案し、解析により制振性能向上効果を検証した。

第7章では、本研究で得られた成果をまとめ、本研究で残された課題を述べると共に、今後の展望について言及した。

SRモータの実用化の障害となっていた諸問題は、本論文で示される幾つかの提案制御法により解決することができ、その意味で本論文はその独創性と実用性の観点から学位論文に値する十分な価値をもつものと判定する。