

シン ソン ヨン

氏 名 SHIN SUNG YONG

学位の種類 博士（工学）

学位記番号 博第1160号

学位授与の日付 2019年9月4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 Study on High Performance Control of Switched Reluctance Motor for Industrial Servo Drive Application
(産業サーボドライブ用SRモータの高性能制御に関する研究)

論文審査委員 主査 教授 小坂 卓
教授 岩崎 誠
教授 森田 良文

論文内容の要旨

Today, environment problems became important thing to human. Especially, greenhouse gases to increase temperature of atmosphere always have been big issue. One of those gases, carbon dioxide produced in fossil fuel and industrial processes take charge to 65%, and 66% of the carbon dioxide is produced in industry, transportation, building, and electricity production sectors. To decrease the carbon dioxide, researches for improving efficiency of motors used in electric products or equipment are actively being conducted. In this situation, Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) with high efficiency has become the most popular motor since 1990s.

A development of NdFeB using rare-earth materials leads to increasing of motor efficiency and minimizing of size in PMSM. As carbon dioxide emission regulations become more severe, the use of PMSM has been rapidly expanded, resulting in that the use of NdFeB has been expanded. In this circumstance, China which owns 65% of rare-earth material reserves, accounts for 97% of the world's supply. This raised concerns about the weaponization of resources. The prices of rare-earth materials Dy (Dysprosium), Tb (Terbium) doped to NdFeB magnets to improve coercivity and operable temperature, are rapidly increased in 2011 due to the import restriction measures in 2008 by China. As a result, the price of NdFeB magnets in 2011 increased more than 15 times since 2008.

Ever since, as can be known in the motor development trends, many types of motor to reduce or get rid of the use of rare-earth magnets while maintaining motor performances have been studied. Among such many ways, switched reluctance motor (SRM) is selected as an alternative motor for PMSM in this study.

Through optimal structure design and introducing new material (ex. electromagnetic steel with 0.1mm thickness) to parts of SRM, an improvement of motor efficiency of a SRM, which reaches similar level with PMSM, has been reported in recent literatures. In addition, comparing with PMSM, rare-earth magnet is not needed and its structure is very simple and rugged. Also, scattering problem of magnetics at high speed operation and demagnetization problem at high temperature are disregarded. As industrial motor used in severe environment like high temperature and high speed operation, SRM has most favorable characteristics.

However, the fatal drawbacks of SRMs prevent from their widespread use. One of them is vibration resulting in acoustic noise. Another is torque ripple. In addition, to keep the strong point of SRM durable in severe environment, the effective position estimator to eliminate a position sensor which requires additional space and deteriorates durability and reliability is necessary. In this study, the researches on next contents have been conducted;

- 1) Improvement of vibration minimization performance through modified two-stage commutation,
- 2) Torque ripple suppression through current profile tracking control considering mutual coupling,
- 3) Simple and economic position estimation algorithm with small error in wide speed range.

This study consists of seven chapters. Each chapter explains the background and the results of three themes described above as follows.

In chapter 1, the trend of motor development is explained. The motors which don't use or reduce rare-earth magnet are introduced. Especially, this paper considers SRM as an alternative motor for PMSM. Many issues arising from SRM to be solved are summarized.

In chapter 2, the mechanism of vibration generation of general SRM is presented. The main source component to produce resonant vibration is investigated. To reduce the vibration at resonant frequency 4.5[kHz], conventional two stage commutation which has studied in advance is explained.

In chapter 3, the problem that conventional method does not work in high speed and high load condition is explained. The reason of that problem is investigated through 2D-FEM simulation and mathematical analysis. Finally, modified two stage commutation to solve this problems is proposed.

In chapter 4, the conventional torque control method using current profiling control is explained. The target current obtained by using torque-position-current model and torque contour function is controlled by using active current regulator. However, the torque ripple in current overlapping region during commutation is increased by affection of mutual coupling effect between energized two adjacent phases. The reason of this problem is investigated through 2D-FEM simulation.

In chapter 5, to minimize the torque ripple in current overlapping region, the modified method considering the mutual coupling effect is proposed. The process to obtain magnetization curves considering mutual coupling effect and their torque-position-current model is explained. Finally, it is demonstrated that the torque ripple is minimized by using the target current obtained from modified torque contour function and torque-position-current model.

In chapter 6, in order to develop simple and economic position estimation algorithm, the method to use the linear gradient of phase voltage and voltage rate obtained by using three voltage sensors is proposed. Through experiment, the accuracy of the algorithm has been confirmed.

In chapter 7, the content achieved by this paper and the tasks to be addressed in the future are summarized.

論文審査結果の要旨

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、製造容易かつ機械的に堅牢かつ希土類元素など希少資源に依存しないため、低コストで耐環境性に優れるモータとして再注目されているスイッチトリラクタンスモータ（SRモータ）を、産業用サーボモータの一候補として研究対象としている。近年、薄板電磁鋼板や短ギャップ長などの採用により、永久磁石形同期モータ（PMSM）と同一体格で同一トルク・出力を実現しつつ、遜色のないモータ効率が実現できるとのSRモータの研究開発事例が報告されているが、一方で振動・騒音やトルク脈動が大きいことが課題としている。これらは産業用サーボモータとしての応用の障害となるため、実用化に向けてその対策は極めて重要な研究課題であるとしている。本論文では、産業用サーボモータとしての適用を前提に、要求性能と制約条件を加味して設計された供試SRモータを対象に、振動・騒音やトルク脈動を低減抑制するための制御法について纏めたものである。具体的には、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、より効果的な振動・騒音抑制制御法を提案している。また、位置決め時に重要となる正確な瞬時トルク制御性能を向上させるため、その阻害要因である二相通電時の相互誘導の影響を考慮したモータモデリング手法を提案し、汎用サーボモータで要求される $\pm 5\%$ のトルク脈動率を指標に、提案モータモデルに基づくトルク脈動抑制制御法の有用性を検証している。加えて、更なる低コスト化に貢献する回転子磁極位置センサを排除した回転子磁極位置センサレス制御法についても提案し、その制御性能を実験で明らかにしている。

本論文の各章の概要は以下の通りである。

第1章では、高効率モータの必要性、希少資源である希土類元素への依存脱却を図る省・脱レアアースモータの必要性とそれらを取り巻く研究開発動向について説明し、先行研究の動向を踏まえ、産業用サーボモータとしてSRモータを候補として取り上げた理由を述べている。その特徴と代表的な運転法ならびにそれに起因する振動・騒音やトルク脈動など克服すべき課題および関連する先行研究の動向を述べ、本論文で目的とする制御上の課題について明確にしている。

第2章では、SRモータ独特の振動発生原理を述べ、共振振動を生じさせる主要加振源が固定子ティースに働く電磁力の半径方向成分であることを説明している。発生原理に基づいて振動を抑制するための先行研究アプローチの一手法であり、次章で提案する振動抑制制御法の基盤となる二段階転流制御法を説明している。

第3章では、前章を受け、従来の二段階転流制御法での問題点を示し、その対策として回転子ティース形状設計法と転流前後で印加電圧を個別に最適化して振動抑制効果を改善する改良型二段階転流制御法を提案し、供試SRモータに適用した実験結果でその有用性を定量的に明らかにしている。

第4章では、トルク脈動を抑制するための先行研究アプローチの一手法である瞬時電流波形制御法を説明し、2次元有限要素磁場解析によるシミュレーションにより、二相通電期間での相互誘導磁束に起因して生じるトルク脈動が克服すべき課題であることを明らかにしている。

第5章では、前章を受け、二相通電時の相互誘導磁束の影響を考慮したモータモデリング手法を提案し、提案モータモデルに基づいてトルク脈動抑制性能を改善した改良型瞬時電流波形制御法を提案し、供試SRモータに適用した実験結果でその有用性を定量的に明らかにしている。

第6章では、SRモータの回転子磁極位置センサレス制御に関する数多くの先行研究を俯瞰した上で、低コストかつ簡便に実現可能な回転子磁極位置推定法として、二相へ診断パルス電圧を印加した際の各相の電圧の回転子磁極位置に対する変化とその分圧比の回転子磁極位置に対する変化に着目して、安価な電圧センサを使った新たな回転子磁極位置推定法を提案している。供試SRモータに適用した実験結果で提案手法の有用性を定量的に明らかにしている。

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ている。

SRモータの産業用サーボモータとしての適用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。