

学位被授与者氏名	中沢 吉博 (Yoshihiro Nakazawa)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第 4 2 号
学位授与年月日	平成 2 7 年 3 月 2 0 日
論文題目	設計と制御によるスイッチトリラクタンスモータのモータ効率改善に関する研究
論文題目 (英訳または和訳)	Study on Improvement of Motor Efficiency with Design and Control for Switched Reluctance Motor
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 木野 仁 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 朱 世杰 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 村山 理一 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 盧 存偉
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>近年、次世代の省エネ、省資源モータとしてスイッチトリラクタンスモータ (SRM: Switched Reluctance Motor) の実用化が期待されている。従来の SRM は永久磁石型同期モータと比較して効率で劣っていたが、モータ形状と励磁タイミングの最適化により、永久磁石型同期モータと同等のモータ効率を得られることが明らかにされている。しかし、コア形状を最適化するための設計は、有限要素法による磁場解析及び過渡シミュレーションを繰り返すことにより行われるため、多大な計算時間を要する。また、制御に関しては、最高モータ効率を達成する励磁タイミングとモータパラメータの関係は明らかにされておらず、現在のところ励磁タイミングは試行錯誤的に決定されている。</p> <p>そこでモータ効率改善を目的としてコア形状を設計した。磁場解析による詳細な設計を始める前に、インダクタンス曲線のモータ効率への影響を過渡シミュレーションにより検討し、その結果に基づきコア形状の設計指針を立てる設計方法を提案した。また、制御によるモータ効率改善のため、磁気エネルギーによるトルク発生原理に基づいて、発生トルクがインダクタンスの空間変化率と電流に比例することに着目した励磁区間可変シングルパルス制御法を提案した。</p> <p>本論文は 5 つの章から構成されている。第 1 章では、本研究の背景と関連する先行研究を引用しながら、本研究を行う必要性および研究の目的を述べている。</p> <p>第 2 章では、SR モータのトルク発生原理を示し、磁気特性の線形・非線形により発生トルクが異なることを述べている。</p> <p>第 3 章では、定格出力 3.5kW の SR モータのコア形状の基本設計を行い、モータ効率を向上させるための設計指針をまとめる。その設計指針に従い、磁場解析によるコア極数・形状の詳細な設計を実施し、高効率 SR モータのコア形状を決定する。決定したコア形状に基づき高効率 SR モータを試作し、実機試験においてモータ効率が 5% 向上することを確認する。</p> <p>第 4 章では、通電角指令値により励磁領域を変化させる 3 つの励磁モードを提案する。それぞれの励磁タイミングはモータの設計パラメータから計算される。そして、定格出力 180W の SR モータに対するシミュレーションおよび実機試験において、マップ上で効率、銅損、鉄損を励磁区間固定の 120° 通電電圧 PWM 制御法 (従来法) と比較することにより、その有効性を確認する。提案法は従来法よりも運転領域を拡大し、低中速域の高負荷トルク域で高いモータ効率を与えることを示す。また提案法により、動作点 0.8N·m, 1500min⁻¹において、最大 13.2% のモータ効率向上が得られることを示す。</p> <p>第 5 章では、本論文で得られた主要な結果を要約し、今後の研究課題について述べている。</p>
論文内容の要旨 (英文)	In recent years, practical applications of Switched Reluctance Motors (SRMs) are expected as next-generation energy saving and resource saving motors. However efficiencies of conventional SRMs are inferior to those of Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs). It is demonstrated that equivalent motor efficiencies with permanent magnet synchronous motors can be obtained by optimizing motor shapes and excitation timings. The design procedures to optimize the core shapes of SRMs take a lot of time, since the magnetic field analysis using Finite Element

Method (FEM) and transient analysis are iterated. In the control of excitation timings, it is not clarified that the relation between the excitation timings which accomplish maximum motor efficiencies and motor parameters. Currently the excitation timings are decided by trial and error.

Therefore the core shapes were designed to improve the motor efficiency. The influences of inductance curves on the motor efficiencies were investigated with transient simulations before beginning the detailed designs with the magnetic field analysis. The design method providing the design guide of core shapes based on the investigations was proposed. Also the single-pulse control method with variable excitation periods, which focus on torque producing was proportional to differential inductance and current, was proposed based on the torque producing principle due to magnetic energy for the improvement of the motor efficiency.

This thesis consists of five chapters. In the first chapter, the necessity for carrying out this study and the objective of this study are described by quoting the preceding study relevant to the background of this study.

The second chapter shows the torque producing principle of the SRM, and describes that producing torques are different between the linearity and non-linearity of magnetic property.

In the third chapter, the basic design for the core shapes of SRM of rated power 3.5kW is studied, and the design principles to improve the motor efficiency are summarized. According to the design principle, the detailed design of core pole number and core shapes are carried out with the magnetic field analysis using FEM, and the core shape of high efficient SRM are decided. The designed SRM is produced experimentally based on the design, and the improvement of motor efficiency, which is more than 5%, is confirmed experimentally.

In the fourth chapter, three excitation modes, in which an excitation region is varied for reference conduction angles, are proposed. The excitation timing of each excitation mode is calculated with the design parameters of a motor. In the simulation and real machine experiment for the SRM of rated output 180W, the effectiveness is confirmed by comparing the efficiency, copper loss, and iron loss of the 120° conduction voltage-PWM control method with a fixed magnetization interval (conventional method) with those of the proposed method on maps. It is shown that the proposed method expands operating ranges as compared with the conventional method, and gives the high efficiency under the high load torque of low-medium speed region. Also it is shown that the maximum motor efficiency of 13.2% is obtained by the proposed method in the operating point of 0.8N·m and 1500min⁻¹.

In the fifth chapter, the main results obtained in this thesis are summarized, and future research challenges are described.

論文審査結果

審査の結果

本学位論文は、永久磁石型同期モータ（PMSM）と同等のモータ効率を有するスイッチトリラクタンスモータ（SRM）ドライブを開発するために、SRM の設計試作と励磁制御法の提案を行った。

SRM の従来設計では、有限要素法（FEM）による静磁場解析と過渡シミュレーションによるモータ効率の評価を繰り返すことにより行われるため、多大な計算時間と労力を要していた。そこで、FEM による静磁場解析を用いる詳細な設計を始める前に、SRM のコア形状に相関を有するインダクタンス曲線のモータ効率への影響を予め過渡シミュレーションにより検討し、その結果に基づきコア形状の設計指針を立てる設計手順を提案した。具体的には、定格出力 3.5kW の SRM に対して、モータ効率を向上させるための設計指針をまとめ、その設計指針に従い、磁場解析によるコア極数・形状の詳細な設計を実施し、高効率 SRM のコア形状を決定した。決定したコア形状に基づき高効率 SRM を試作し、実機試験においてモータ効率が 5% 向上することを確認した。

励磁制御法においては、モータ効率を改善する励磁タイミングとモータパラメータの関係が明らかにされておらず、これまで励磁開始角及び励磁終了角は試行錯誤的に最適化されていた。そこで、磁気エネルギーによるトルク発生原理に基づいて、発生トルクがインダクタンスの空間変化率と電流に比例することに着目した励磁区

	<p>間可変シングルパルス制御法（提案法）を提案した。具体的には、通電角指令値により励磁領域を変化させる 3 つの励磁モードを有するシングルパルス制御法を提案した。そして、定格出力 180W の供試 SRM に対するシミュレーション及び実機試験において、マップ上でモータ効率、銅損、そして鉄損を励磁区間固定の 120° 通電電圧 PWM 制御法（従来法）と比較することにより、従来法と比較して提案法が運転領域を拡大し、低中速域の高負荷トルク域で高いモータ効率を達成できることを示した。また提案法により、動作点 0.8Nm, 1500min⁻¹ において、最大 13.2% のモータ効率向上を達成できることを示した。</p> <p>以上より、本学位論文で開発した高効率 SRM と励磁区間可変シングルパルス制御法を組み合わせることにより、PMSM ドライブと同等のモータ効率を達成できる SRM ドライブの実用化への展望が開けた。</p> <p>学位論文公聴会においては、論文内容に関連する種々の工学的及び技術的な質問があったが、いずれも適切な回答を行うことができた。また公聴会後の最終試験においては、学位論文に関連する分野の学識を有し、今後研究を進めていくための研究能力を備えていることが判明した。</p> <p>以上の結果から、学位審査委員会はこの論文が博士（工学）の学位に適格であると判定した。</p>
<p>主な研究業績</p>	<p>参考論文 5 編 1 冊</p> <p>査読付き論文</p> <p>1. 「スイッチトリラクタンスモータのモータ効率を向上させる設計法」, 電気学会論文誌 D, 134 巻, 7 号, pp.656-666(2014) 著者：中沢吉博, 大山和宏, 能塚和磨, 藤井裕昭, 上原一士, 百武康</p> <p>国際会議論文（※発表者に○のこと。） （口頭発表, 査読有り）</p> <p>1. “Design of High Efficient Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle” , IEEE, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, Proceeding on Industrial Electronics Society, CD-ROM, pp.7325-7330 (2013) Authors: Kazuhiro Ohyama, ○Yoshihiro Nakazawa, Kazuma Nozuka, Hiroaki Fujii, Hitoshi Uehara, and Yasushi Hyakutate</p> <p>（口頭発表, 査読有り）</p> <p>2. “Improvement of Efficiency of Switched Reluctance Motor by Single Pulse Control Based on Linear Torque Equation” , IEEE, 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), CD-ROM, pp.1-10 (2013) Authors: ○Yoshihiro Nakazawa, Kazuhiro Ohyama, Hiroaki Fujii, Hitoshi Uehara, and Yasushi Hyakutate</p> <p>（基調講演, 査読無し）</p> <p>3. “Development of Drive System Using Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle” , The Institute of Industrial Applications Engineers (IIAE), The 1st International Conference on Industrial Application Engineering 2013 (ICIAE 2013), CD-ROM, pp.1-8 (2013) Authors: ○Kazuhiro Ohyama, Yoshihiro Nakazawa, Kazuma Nozuka, Hiroaki Fujii, Hitoshi Uehara, and Yasushi Hyakutate</p> <p>（口頭発表, 査読有り）</p> <p>4. “Improvement in Efficiency of Switched Reluctance Motor by Single Pulse Control in Low and Medium Speed Region” ,</p>

	<p>King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Thailand (KMITL), International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST), CD-ROM, pp.TB2-510-TB2-513 (2012) Authors: ○Yoshihiro Nakazawa, Kazuhiro Ohyama, Hiroaki Fujii, Hitoshi Uehara, and Yasushi Hyakutate</p>
--	--