

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04032

研究課題名（和文）半速同期リラクタンスモータの原理を応用したEV向け可変磁束SRモータの開発

研究課題名（英文）Development of Variable Flux SR Motor for EVs Based on the Principle of Half-Speed Synchronous Reluctance Motor

研究代表者

津田 敏宏（Tsuda, Toshihiro）

金沢工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10838056

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、半速同期リラクタンスモータの原理を応用し、EV用の新しい可変磁束SRモータの(HS-SynRM)の開発を試みた。本研究ではまず、モデル機的设计を行い、HS-SynRMにおける原理と有用性を理論的に明らかにした。さらに、原理的に発生し得るトルクリプルの低減策について検討した。その結果、以下の知見が得られた。(1) 突極集中巻構造の12スロット4極 HS-SynRMを設計し、電圧を印加するだけで定格速度に加速できる。(2) HS-SynRMの極スロットコンビネーションを変更することでトルクリプルをわずかに低減できる。(3) 回転子の突極に対してスキューを施すと、平均トルクが大幅に減少する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で検討したHS-SynRMは、回転子及び固定子が鉄と銅のみで構成されるため、永久磁石(PM)を使用しないモータであり、脱レアースフリーが実現できる。HS-SynRMの望ましい回転子構造を見出すことはできなかったが、今後、HS-SynRMの設計・解析を進める上で参考となり得る成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：In this study, a new variable flux SR motor (HS-SynRM) for EVs by applying the principle of a half-speed synchronous reluctance motor was developed. A small-scale HS-SynRM was designed and its principle and usefulness were theoretically clarified through finite element analysis. Furthermore, in order to reduce torque ripple, several types of rotor structure were designed and their torque characteristics was analyzed. As a result, the following findings were obtained.

(1) A 12-slot, 4-pole HS-SynRM with concentrated windings was designed and demonstrated that it can be easily accelerated to the rated speed by applying voltage without any speed sensor. (2) By changing the pole slot combination of HS-SynRM, harmonics included in the torque waveform can be slightly reduced.

(3) When the rotor salient poles are skewed, the average torque is significantly reduced. Therefore, the effect of reducing torque ripple due to skew cannot be expected.

研究分野：電気機器

キーワード：電気自動車 リラクタンスモータ 同期モータ

1. 研究開始当初の背景

我が国における CO2 排出量のうち約 20% を占める自動車においては、運転中にほとんど CO2 を排出しない電気自動車(EV)への移行が検討されている。このような用途では、限られたスペースを有効活用できるよう、小形で高効率な永久磁石同期モータ (PMSM) が適用されている。しかし、使用する永久磁石にはレアアースが含まれており、我が国の現状では、その全てを輸入に頼らざるを得ない。また、永久磁石は一般的に高価である。このため、永久磁石を使用しないモータの開発が強く望まれている。スイッチドリフトモータ(SRM)は、固定子と回転子が突極形であり、回転子は電磁鋼板と軸材だけで構成された簡単な構造を有する。このため、次世代の EV 用モータとして、その実用化に向けた研究が国内外で盛んに進められている。

近年、SRM の鉄心材料の適切な選定や磁気回路の最適化を行えば、同じ定格の PMSM と同等の効率を得られることが明らかにされた。この他、SRM におけるトルク脈動や振動・騒音を低減するための研究が、国内外の多くの研究者らによって進められている。

しかし、SRM には、その駆動と性能の面において、以下のような根本的な問題が残されており、本研究はこれらの解決を目指すものである。

① SRM ではパルス状の電流を回転子位置に応じて与えるため、特殊な電力変換装置で駆動する必要がある。また、その制御装置の設計には多くの経験が必要となる。汎用の電圧形インバータを使って正弦波駆動(ベクトル制御)を試みた例もあるが、動作原理が通常の交流機と異なるため、負性トルクが生じるなど、性能が悪化する問題がある。

② 上記のように汎用の電圧形インバータが適用できないため、既に収められているモータを SRM に交換する際、インバータと共に交換せざるを得ない。

③ 励磁源を持たないため、磁束を作るための電流を多く流す必要がある。また負荷に応じて磁束を制御できない。これにより力率が悪く、変換器容量が大きくなる。

2. 研究の目的

本研究では、半速同期リラクタンスモータ(半速 SynRM)と呼ばれる、特殊な原理を持つリラクタンスモータの開発を行うものである。半速 SynRM、固定子巻線に交流と直流電流を同時に流すことで、回転子が鉄心のみで構成されるのにも関わらず、突極形同期モータのような可変磁束機能を持つ。突極形同期モータは広く産業界に普及しているモータであり、回転部に設けた界磁巻線に直流電流を制御すると、可変磁束となって力率 1.0 で運転できる。しかし直流電流を流すためのブラシ・スリップリングが必要であり、構造は SRM に比べると極めて複雑である。

本研究では、半速 SynRM の原理を SRM に応用して励磁源を与えることで、構造が簡単でありながら汎用インバータで高力率運転できる新しい SRM を開発する。これにより、前記①～③の問題を解決する。

3. 研究の方法

本研究は、新しい原理を持つ SRM の開発を目的に、以下に示す具体的な項目について取り組む。

① 新原理に基づく新しい SR モータの設計と製作 開発する SRM の原理と有用性を実証するため、試作機の電磁気設計を行い、鉄心寸法と固定子巻線の巻数を決める。開発する SRM は半速 SynRM の原理を応用しているが、磁束の流れや電磁気的な現象は、従来の SRM や半速 SynRM と異なる。そこで、機内の電磁気的な現象と性能を有限要素法による電磁界解析に基づいたシミュレーションで分析しながら、試作機の寸法を決定していく。現在のところ、試作機の固定子スロット数は 18、極数は 12 極で計画している。

② 製作した SRM を用いた実機検証及び性能評価 製作した試作機を用いて、開発する SRM の原理と有用性を実験的に明らかにする。実験では、電圧形インバータを用い、試作機を突極形同期モータの制御理論(ベクトル制御)に基づいて駆動する。インバータのハードウェアは汎用のものと同じでよいが、直流電流が重畳できるよう制御器を改良する。実験では、EV 駆動に求められる定トルク・定出力特性を取得し、開発する SRM の原理と性能を評価するとともに、重畳した直流電流の効果を定量的に明確にする。

③ 特性解析手法の構築 この研究では、開発する SRM の寸法と使用材料から、特性を数式で求められるようにする。本研究は電磁界解析を用いて設計を開始するが、この方法は計算時間が数時間とかなり長いため、最適な設計解を探索するような目的には向いていない。そこで、開発した SRM の機内磁束を考察して磁気回路網を構築する。この磁気回路網からインダクタンス等の定数を算出することで、試作前段階で特性を短時間に予測できるようにする。

4. 研究成果

本研究ではまず、図 1 に示すような突極集中巻構造の半速 SynRM を設計し、その基本特性を電磁界解析で確認した。

(1) トルク波形

図2と図3に、設計した半速-SynRMのトルク波形と、その波形をフーリエ変換した解析結果を示す。図2より、トルクリプル率 R_t を算出すると355.97%と大きい値となった。 R_t が大きくなる理由としては、図3に示すように、トルク波形に主に1次の高調波トルクが多く含まれていることが原因である。

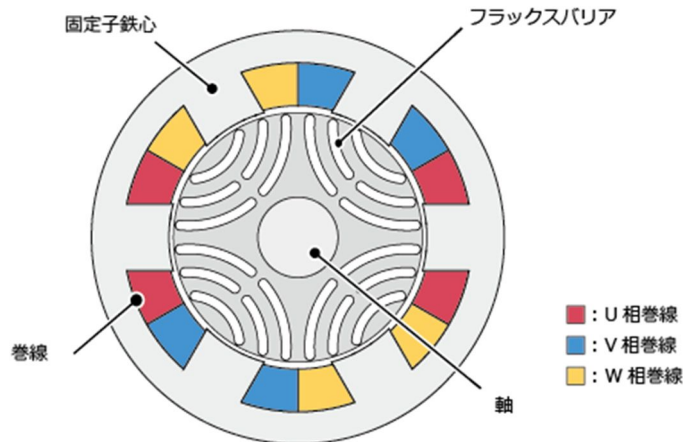


図1 突極集中巻構造の半速 SynRM の基本構造

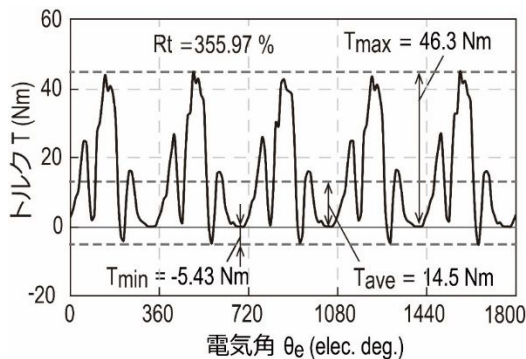


図2 トルク波形

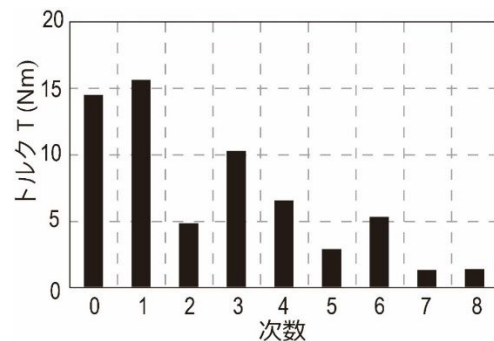


図3 トルク波形に含まれる高調波

(2) トルクリプルの改善

図2と図3に示したように、トルク波形には主に1次の高調波トルクが含まれており、これによって研究対象機のトルク波形は大きく脈動する。試作や実験を行うためには、この低減方法を明確にしておく必要がある。そこで、回転子を軸方向にねじる、いわゆるスキューを施すことで、トルクリプルが低減できないかどうかを検討した。

半速 SynRM の回転子における突極に、軸方向に電気角で 360° の範囲でスキュー角を調整し、トルク波形を調査した。図4に一例として、スキュー角度が 40° の場合について、トルク波形をフーリエ変換した結果を示す。図4より、平均トルクが 4.51 Nm となり、図2と比較して大幅に減少した。その他のスキュー角でも、大幅に平均トルクが減少していたことから、半速 HS-SynRM においては、回転子スキューによるトルクリプルの低減効果は期待できないものと考えられる。

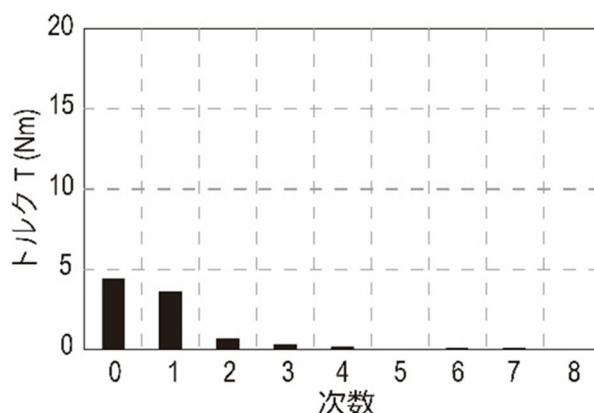


図4 スキューを施した場合におけるトルクの高調波分析結果

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1．発表者名 坂根弥樹
2．発表標題 集中巻半速同期リラクタンスモータの設計と基本特性
3．学会等名 2021年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4．発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------