

機関番号：13701

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21760215

研究課題名（和文） コンデンサ並列形駆動回路によるSRMのトルク平準化と高性能可変速システムの構築

研究課題名（英文） Higher Performance Speed Control System with Flat Torque Control for Switched Reluctance Machines

研究代表者

石川 裕記（ISHIKAWA HIROKI）

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：90273119

研究成果の概要（和文）：本研究では磁石レスモータとして知られているスイッチトリラクタンスモータ（以下、SRMと略記）の技術課題のひとつである、大きなトルク脈動を抑制し、高精度・高性能SRM可変速駆動システムを構築することでSRMの汎用モータ化を目指したものである。

トルク脈動の抑制は、制御方式のみのアプローチでは限界があり、駆動回路構成からのアプローチとの併用が必要である。本方式ではトルク脈動抑制の観点から駆動回路の最適化を検討した上で、電流制御方式に改良を加えた。このシステムを実現し、従来は数百%であったトルク脈動を数%以下まで抑制できることを実証し、高性能速度制御システムを構築した。

研究成果の概要（英文）：One of the most attractive merits of switched reluctance machines (SRMs) is they have no permanent magnet. The SRMs, however, have some demerits, large torque ripples, and nonlinear characteristics, especially. The torque ripples results acoustic noises, irregular rotation, and nonlinear characteristics makes the precise control of SRMs. The demerits prevent for widespread use of SRMs.

The study tried to solve the demerits in order to apply SRMs to many fields. It is not enough to reduce the torque ripple with only the torque ripple suppression control. The realization of lower torque ripple of SRMs needs both instantaneous current waveform control and suitable drive circuit for flat torque control. In the study, a novel drive circuit with parallel capacitors was proposed and the lower torque ripple was realized with both the control and the circuit. The flat torque control on the drive circuit realized torque ripple less than 5%. It is confirmed in experiment that the speed control with both the proposed circuit and the flat torque controller has much higher performance than conventional SRM drive control.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：パワーエレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：スイッチトリラクタンスモータ、磁石レスモータ、トルク脈動抑制、並列コンデンサ形駆動回路、リアルタイム電流補償、可変速駆動システム

1. 研究開始当初の背景

現在普及が急速に拡大している永久磁石モータに使用される希土類金属は、今後価格の高騰と資源の枯渇が懸念される。その課題を解決するため、本研究では磁石レスモータとして知られているスイッチトリラクタンスモータ（以下、SRM と略記）の技術課題を克服し、脱永久磁石同期モータ化を目指すものである。

関連する国内外の研究動向に着目すると、SRM の強い非線形性に起因する大きなトルク脈動の抑制が試みられている。

モータ構造からのアプローチとして、突極構造を変更してトルク脈動を抑制する方法があるが、この方法は SRM の新規設計時には適用できるが、既設の SRM には適用できない。

制御からのアプローチとして、瞬時トルクが一定となるように固定子電流波形を制御する方法もある。この方法は制御ソフトウェアの変更により、既設の SRM にも適用できる。突極数が多い場合は、固定子電流波形を台形波状にすればトルク脈動を抑制できる。しかし、突極数が比較的少ない場合にはかえってトルク脈動を増加させる場合があり、汎用性に乏しい。この点をニューラルネットワークやファジー制御で解決することを試みたものがあるが、これらの制御法は制御システムの構成が非常に複雑であるため、制御設計者の経験と勘によるところが大きく、制御システムの異常時におけるデバッグ作業が容易ではない。この他、実測値に基づいて電流波形を導出する方法もある。この手法では測定装置、測定人員、測定に要する時間などに関わるコスト増が懸念される。

これらの各アプローチは、高速回転時に関する以下の問題に対して考慮されていない。

- ・ SRM の速度起電力が増大
- ・ 固定子電流の通流時間の短縮および波形制御精度の悪化

そのため、運転範囲が限定され、そのままでは幅広い分野への SRM の適用が難しい。

2. 研究の目的

本研究課題は、SRM の技術課題のひとつである大きなトルク脈動を克服し、高精度・高性能 SRM 可変速駆動システムを構築することで、脱永久磁石同期モータ化ならびに SRM の汎用モータ化を目指したものである。

脱永久磁石同期モータ化を目指すには、永久磁石同期モータのトルク脈動（数%程度）と同等もしくはそれ以下に抑制することが肝要である。

研究代表者は、本研究の事前研究として、瞬時電流フィードバックにより SRM の固定子電流波形を制御して、トルク脈動抑制を試

みてきた。これは、前述の既設 SRM に対するアプローチのひとつである。この方式により、負荷トルクの大きさによって異なるが、従来の SRM のトルク脈動率が 50~150%程度であったのに対し、低速時のトルク脈動が 5~10%程度、高速時には 20~30%程度と劇的な低減を実現した。しかし、このレベルは脱永久磁石同期モータ化を目指すには、十分なトルク脈動抑制レベルとはいえない。これは以下の理由であることが明らかとなった。

- ・ 低速時：固定子巻線電圧を PWM 制御によりデジタル的に印加するため、図 1 青枠内に示すように、スイッチングにともなって固定子電流が脈動し、理想電流との間に誤差が生じる
- ・ 高速時：巻線電圧不足により固定子電流が遅れ、波形制御精度が悪化する

本研究課題では、事前研究により明らかになった問題点を考慮し、駆動回路の改良を含めた SRM 可変速制御システムの最適化をトルク脈動抑制の観点から実現するため、以下を研究の目的とした。

- ・ 低速時：SRM に並列にコンデンサを接続した駆動回路を考案し、コンデンサ電圧の制御により、巻線電圧をアナログ的に印加することによるスイッチングの影響の低減
- ・ 高速時：並列コンデンサ電圧を電源電圧より高くし、さらに理想電流をリアルタイムで補正する、リアルタイム電流補償により、巻線電圧不足を解消。

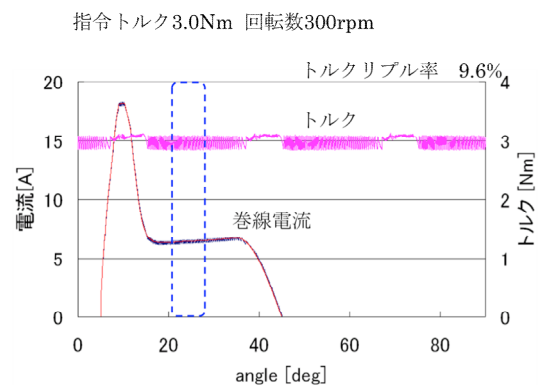


図 1：従来電流波形制御方式における電流およびトルク波形

3. 研究の方法

本研究課題では、以下の方法により、課題の克服を目指した。

2009年度は、主として、コンデンサ並列形駆動回路の設計・試作およびトルク脈動抑制制御アルゴリズムの構築に重点を置いた。

(1) コンデンサ並列形駆動回路の設計および試作

コンデンサ並列形駆動回路の基本原理は研究代表者がすでに開発したものであるが、これに、本研究課題で目指している『巻線電圧のアナログ化』という観点からの検討を追加するものである。本項目で、積極的にコンデンサ電圧を制御できる新しい回路構成を、研究代表者が開発した回路シミュレータ「回路解く蔵」を用いたコンピュータシミュレーションにより検討を行った。これに基づき、回路定数の設計および試作を行った結果、解析通りの動作特性を示すことを確認した。

(2) 並列コンデンサ電圧制御による固定子電流波形制御アルゴリズムの構築

低速時におけるトルク脈動の原因は、巻線電圧をPWM制御によってデジタル的に印加している、すなわち、電源電圧もしくはゼロ電圧に切り替えることによって発生する固定子電流のスイッチングリップルである。本項目で、巻線に印加する電圧を、並列コンデンサ電圧を制御することによってアナログ的に印加し、スイッチングリップルの低減を実現した。

(3) リアルタイム電流補償による理想電流波形導出アルゴリズムの確立

高速時におけるトルク脈動の原因は、回転数の増加に伴う、速度起電力も増加、および理想電流を実現するための巻線電圧不足である。本項目は、巻線電圧不足の生じる期間において、理想電流をリアルタイムで変更し、巻線電圧不足の解消を実現した。

(4) 上記(2)および(3)の併用型制御アルゴリズムの構築

トルク平準化制御を施したSRMの可変速駆動システムを構築するには、上記(2)および(3)で検討した制御方式を併用することが必要となる。本項目では、併用型アルゴリズムを構築した。

(5) 一定速駆動時における実機検証

本項目で、可変速駆動システムへの適用に先立ち、一定速度かつ一定トルク指令におけるトルク脈動抑制効果について、実機検証を行った。低速時には上記(2)、高速時には主として(3)の方式を適用した。実機検証では、瞬時トルクの検出が必要であるが、市販のトルクメータでは本研究で必要とする周波数特性が得られない。このため、瞬時トルク検出システムも併せて検討した。

2010年度は、主として、コンデンサ並列形駆動回路の可変速システムへの適用とその効果の検証に重点を置いた。

(6) コンデンサ並列形駆動回路の適用による可変速駆動時のトルク脈動抑制効果の検証

本項目で、指令トルクの変化に対する電流応答について検証を行い、過渡時も含めたトルク脈動抑制効果の評価を行った。電流制御系には前年度(4)で検討した併用型制御アルゴリズムを適用するが、その切り替え速度、切り替え方式についても検討した。

(7) コンデンサ並列形駆動回路の適用による可変速駆動時の速度制御性能評価

可変速システムは、前年度に検討した固定子電流波形制御による瞬時値電流制御系とPI制御による速度制御系で構成した。電流制御系は瞬時値制御となるため、トルク脈動抑制だけでなく、電流応答の高速化も期待できる。本項目は、電流応答、速度応答、負荷応答など、可変速駆動システムには不可欠な応答波形について検証し、その性能を評価した。

4. 研究成果

本研究課題により得られた成果は以下の通りである。

- トルク脈動の抑制には、制御方式のみのアプローチでは限界があり、駆動回路方式からのアプローチとの併用によるシステムの最適化が重要である。
- 運転領域により、その制御方法の切り替えが必要である。
- トルク脈動の抑制には、低速時はスイッチング動作にともなう電流脈動の抑制、高速時は巻線電圧不足の解消が重要である。
- これらの制御は、従来の駆動回路では実現不可能である。
- 駆動回路方式は様々なものが国内外を問わず提案されているが、両方式を同時に実現する回路は、図2に示す研究代表者が開発したコンデンサ並列形SRM駆動回路が最適である。

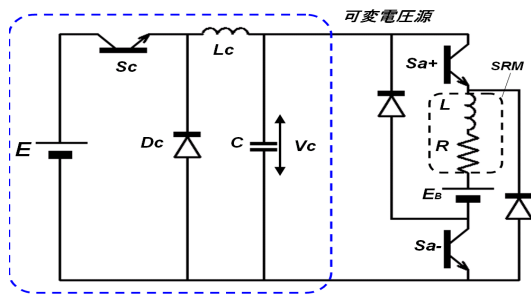


図2 コンデンサ並列形駆動回路（一相分）

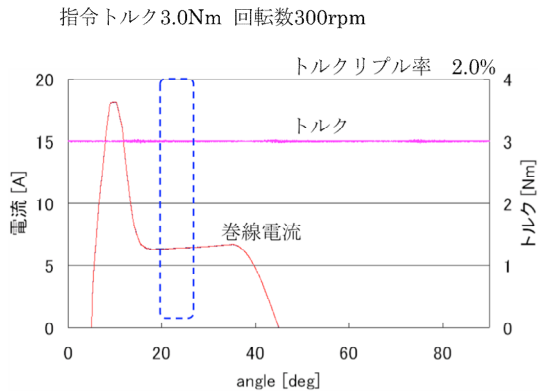
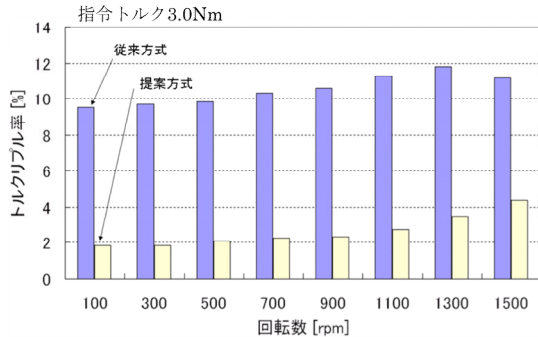
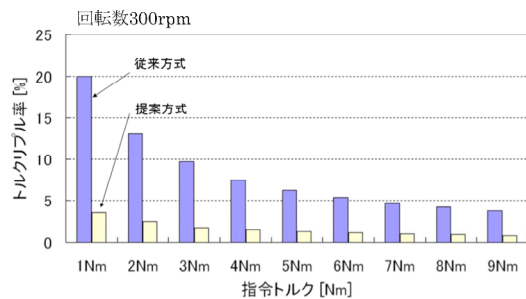


図3 本研究課題で開発した電流波形制御方式における電流およびトルク波形



(a) 回転数特性



(b) 負荷特性

図4 従来の電流制御のみの方式と開発した方式でのトルク脈動率の比較

・低速時の電流脈動抑制には従来のようなチョッピングによるデジタル的な巻線電圧印加方法ではなく、図2の並列コンデンサCの電圧 V_c を制御してアナログ的に印加することが有効である。これにより、図3に示すようにトルク脈動のさらなる低減を実現した。

・高速時の巻線電圧不足はSRMの回転速度に依存して増加する誘起電圧に起因する。これはSRMに並列に接続されたコンデンサの電圧を昇圧する機能により解消できる

・運転速度領域による制御の切り替えのための制御アルゴリズムを確立した。

・本方式の実現により、図4に示すように従来の電流制御のみの場合に比べ、トルク脈動を5%以下に大幅に抑制できることを実証した。

・高性能速度制御システムを構築し、良好な速度制御特性を得た。

・本研究で不可欠であるSRMのパラメータ抽出法について、磁場解析ソフトによる違いを明らかにし、この違いが制御方式に与える影響についても言及し、検討を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- (1) Simulation for Constant Torque Control of Switched Reluctance Motors by FEM and Circuit Simulator (H. Ishikawa), Proceedings of the International Power Electronics Conference Sapporo. Pp.651-656, June 22-24, 2010. (査読あり)
- (2) A Current Controller for a Switched Reluctance Motor Based on Model Reference Adaptive Control (H. Naitoh and H. Ishikawa), Proceedings of the Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pp. 1270-1275, June 14-16, 2010. (査読あり)
- (3) Novel Speed Control System with Flat Torque Control for Switched Reluctance Motor Drives (H. Ishikawa, P. Rishab, A. Tsutsumi, and H. Naitoh), The 12th International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS2009), 2009 (CD-ROM). (査読あり)

〔学会発表〕（計4件）

- (1) 岡本正義, 石川裕記, 内藤治夫: 「移動平均法を用いた SRM の電流制御系の設計」, 平成 22 年電気学会産業応用部門大会講演論文集[YPC], Y-116, p. 116, 2010 (査読あり)
- (2) 中島一憲, 石川裕記, 内藤治夫: 「SRM の速度制御系における電流応答の高速化」, 平成 22 年電気学会産業応用部門大会講演論文集[YPC], Y-117, p. 117, 2010 (査読あり)
- (3) 岡本正義, 石川裕記, 内藤治夫: 「移動平均法を用いた SRM の電流制御系の設計」, 平成 21 年電気学会産業応用部門大会講演論文集[YPC], Y-36, 2009 (査読あり)
- (4) 今井崇敬, 石川裕記, 内藤治夫: 「可変電圧源による SRM のトルク脈動抑制法」, 平成 21 年電気学会産業応用部門大会講演論文集[YPC], Y-37, 2009 (査読あり)

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www1.gifu-u.ac.jp/~ishikawa/home.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 裕記 (ISHIKAWA HIROKI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号: 90273119