

平成21年 5月 8日現在

研究種目： 若手研究 (B)
 研究期間： 2007～2008
 課題番号： 19760189
 研究課題名 (和文) 最適トルク・電流分配による電気自動車用SRモータの高精度・高効率ドライブ
 研究課題名 (英文) High accuracy and high efficiency drive of SR motor for electric vehicle by optimum torque-current distribution technique
 研究代表者
 後藤 博樹 (GOTO HIROKI)
 東北大学・大学院工学研究科・助手
 研究者番号：90374959

研究成果の概要： SRモータは、構造が単純で堅牢、安価、悪環境下で運転可能、高効率などの特徴があり、電気自動車への応用が期待されるが、高精度なトルク制御法が確立されていない。そこで、電気自動車用SRモータの高精度・高効率駆動を目的として、最適トルク・電流分配をベースとした新しい制御方法を提案し、シミュレーションと小型モータを用いた実験により基本的なアルゴリズムの考案と検証を行い、最終的に実車へ制御を適用し、良好な結果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	0	2,400,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	270,000	3,570,000

研究分野：工学

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、電気自動車、トルクリプル、回生制動、四象限運転、可変速運転、トラクションコントロール、高効率駆動

1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境問題の深刻化や化石燃料枯渇への懸念から、クリーンで高効率な自動車の普及が求められており、燃料電池自動車やハイブリッド自動車などの研究開発が活発化している。これらの自動車はいずれも電動機を用いた電気自動車的一种であり、高性能・高効率・低コストな電動機、及び、その制御装置の開発は極めて重要な共通課題である。現在、自動車駆動用として用いられている電動機は、主として誘導機と永久磁石モータがある。誘導機は、製造コストが低く頑健であ

るが、原理上、更なる高効率化や小型化が難しい。一方、永久磁石モータは、高出力密度、高効率であり、近年、誘導機に代わって電気自動車駆動用モータとして多用される傾向にある。しかし、高出力・高効率を達成するために永久磁石に希土類元素を用いる必要があり、高コストであることや資源面において将来に不安があることなどの欠点がある。スイッチトリラクタンスモータ (以下、SRモータと略記) は、回転子に巻線や永久磁石を使用しないため、(1) 構造が単純で堅牢、(2) 安価、(3) 高温や振動などの悪環境下

で運転可能、(4) 高効率化が可能、(5) 保守が容易であるなどのすぐれた長所を持ち、また、始動トルクが大きく、大容量化も容易であることから、申請者は電気自動車への応用に着眼しており、SR モータを駆動輪と一体化した、インホイール電気自動車の開発を進めている。

しかし、SR モータの欠点として、(1) トルクリップルが大きい、(2) 回転子位置検出が必要、(3) 高効率なトルク制御法が確立していないことが指摘されている。特に、電気自動車においては、回生制動や後退を含む四象限可変速運転が必要であり、また、トラクションコントロールなどの高度運動制御への応用の観点から、高精度なトルク制御が重要な課題である。

従来のトルク制御法としては、オフライン解析により各トルク指令値に対応する理想電流波形をあらかじめ求めてコントローラに格納しておき、実電流を理想電流に追従させる方法が提案されている。しかし、理想電流波形はトルク指令値や回転子位置だけでなく、回転速度などによっても異なるため、格納するデータ量が膨大になることや、解析段階で駆動回路の影響を考慮することができないなど、必ずしも実用的であるとはいえなかった。申請者は、これまで、駆動インバータのフリーホイールモードを含めた励磁タイミングの最適化や磁束ベクトルの瞬時制御に基づくトルク制御法など簡単・高速で実用的なトルク制御手法を提案し、実験により良好な成果を得ている。

また、回転子位置検出器は熱や振動に弱く、高価であるため、回転子位置センサレス化はきわめて重要な課題である。申請者は、SR モータ駆動中の磁束ベクトルの向きに基づいて回転子位置を求める手法を提案し、実験において高い位置推定精度を得ている。

一方、SR モータの効率向上については、材料や構造の最適化などによる研究が盛んに行われているが、制御方法の改良による効率向上の報告はわずかである。特に、トルクリプル低減やセンサレス駆動制御時に関する効率の議論は皆無といってよい。その理由として、SR モータは非線形な特性が強いため、他のモータのように簡単な数式を用いて効率最大化のための解析解を求めることが困難であることが挙げられる。特に、Direct Torque Control などのベクトル制御的なアプローチではモータ全体の発生トルクや磁束ベクトルのみに着目するため、各相のトルクや電流については適切に分配されず、大きなロスとなってしまう、特に低負荷時に効率を著しく低下させてしまう問題がある。

2. 研究の目的

本研究課題では、電気自動車用 SR モータの高精度・高効率駆動を目的として、各相の最適トルク・電流分配をベースとした新しい制御方法の提案と実現を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

研究期間は2年間であり、1年目においては、シミュレーションと小型モータを用いた実験により基本的なアルゴリズムの考案と検証を行い、2年目においては、実車へ制御の適用とセンサレス化の基礎検討を行った。具体的には以下のようなものである。

(1) 汎用シミュレーションソフトウェア MATLAB/SIMULINK を利用して、制御アルゴリズムの検討を行った。まず、コントローラのサンプリング時間などのハードウェア的制約を無視した理想的なコントローラモデルを構築してシミュレーションを試行し、制御アルゴリズムの検討を行う。続いて、サンプリング時間などのハードウェア的制約を考慮し、コントローラモデルを詳細化してシミュレーションを行い、最適な制御パラメータを探索した。その後、いくつかの従来の制御法についても同様の方法でシミュレーションを行い、トルクリプルの比較を行った。

(2) 現有する小型 SR モータを使用して実験を提案手法の評価を行った。制御回路は SIMULINK 上に構築した制御モデルから自動的にプログラムを生成し、実機で動かすことができる DSP システム”dSPACE”を用いた。dSPACE システムとインバータ、小型 SR モータを接続して実験を行った。また、シミュレーションと同様、従来の制御方法についても同一の条件で実験を行い、トルクリプルなどの比較を行った。

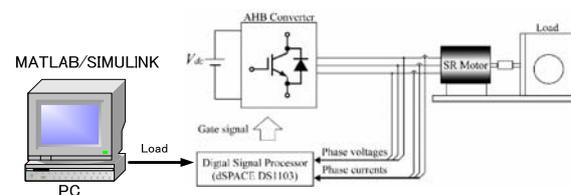


図1 実験装置の構成

(3) MATLAB/SIMULINK を利用して、制御アルゴリズム電気自動車への適用シミュレーションを行い、最適制御パラメータを求めた。

(4) 開発中の電気自動車は一人乗りの小型車であり、PC を利用する dSPACE システムを搭載することは困難であるため、新たに専用制御回路を開発した。なお、回路は信頼性の確保のため、プリント基板を製作した。設計には現有のプリント基板設計専用ソフトウェア OrCAD PCB Editor を用いた。

(5) 製作した制御回路を電気自動車に搭載し、実走行実験を行った。種々の条件で走行し、走行中の速度・電圧・電流波形を本研究費で購入したレコーダによって記録し、走行後にこれらを解析することにより、走行中のモータトルク・出力・効率を算定し、評価を行った。さらに、プログラムを変更して回生制動を含む四象限動作を行い、同様に評価を行った。

(6) さらに、完成したトルク制御システムに対し、回転子位置センサのセンサレス化が可能かどうかの基礎検討をシミュレーションにより検討した。

4. 研究成果

本研究課題では、以下のような成果を得た。

(1) 計算機シミュレーションにより提案制御手法の具体的なアルゴリズムを明らかにし、本提案手法による効率的なトルク制御が可能であることを確認した。

(2) 小型モータを用いた実験により、トルク制御精度や効率が従来手法より優れていることを確認した。

(3) 小型電気自動車駆動への適用シミュレーションモデルを構築し、基本的な制御アルゴリズム適用を行った。その結果、予測される良好な結果を得たほか、本制御アルゴリズムの万能性が明らかになった。

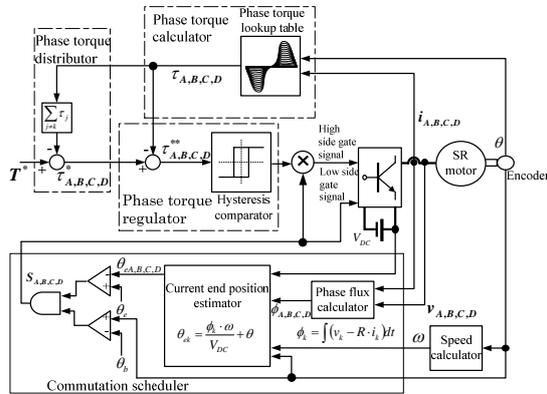


図2 構築した制御モデル

(4) 電気自動車駆動への適用シミュレーションにより、最適な制御パラメータを明らかにした。特に、高速回転時においては、励磁終了タイミングを変更することにより、効果的にトルクリップルを減少できることが明らかになった。

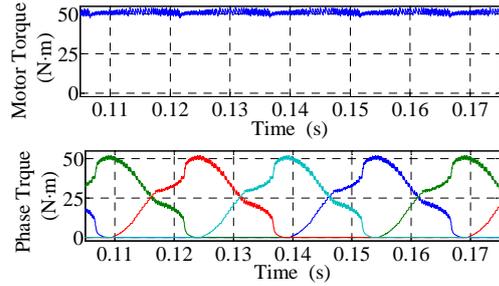


図3 シミュレーション結果（低速時）：総合トルクが一定に保たれていることがわかる。また、各相のトルクは常に正であり、トルクが適切に分配されていることがわかる。

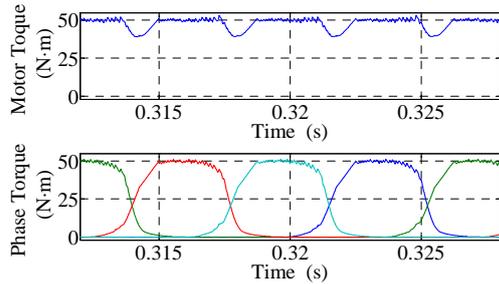


図4 シミュレーション結果（高速時）：総合トルクがところどころ一定に保たれておらず、トルクが脈動している。これは相トルクの切り替え時に起きていることがわかる。

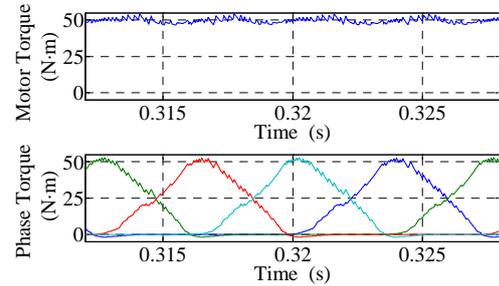


図5 制御パラメータを最適化したシミュレーション結果（高速時）：各相に若干の負トルクを許容することによって、総合トルクが一定に保つことができるように改善することができた。

(5) 制御回路を設計・製作し、実際に実走行試験を行い、トルクリップルが実際に減少していることを確認した。さらに、回生制動を含む四象限駆への拡張を行い、すべての象限においてトルクの高精度な制御が実現できていることを確認した。

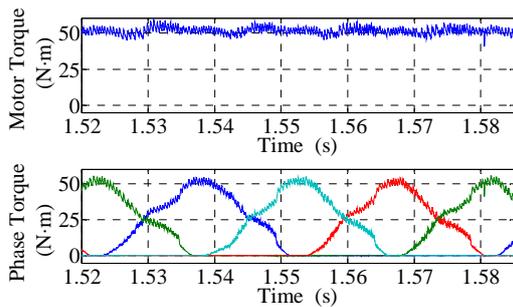


図6 実験結果：シミュレーション同様に、総合トルクが一定に保たれていることがわかる。また、各相のトルクは常に正であり、トルクが適切に分配されていることがわかる。このことから、提案制御法の有用性が実証されたといえる。

(6) センサレス化の基礎検討を行い、電気自動車の始動やトルクの制御が可能であることを確認した。

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7件)

① Fuat Kucuk, Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, "ANN based Torque Calculation of SR Motor without Locking the Rotor, 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials", 査読有, CD-ROM, 2008, HF-05

Ayumu Nishimiya Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, "A Novel Torque Control for a SR motor EV", XVIII International Conference on Electrical Machines, 査読有, CD-ROM, 2008, 1176

③ Ayumu Nishimiya, Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, "Control of SR Motor EV by Instantaneous Torque Control Using Flux Based Commutation and Phase Torque Distribution Technique", 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008), 査読有, CD-ROM, 2008, 496

④ Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, "Drive Circuit of Switched Reluctance Motors using Three-phase Power Modules", IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 査読有, Vol. 128, 2008, pp. 539-544

⑤ Fuat Kucuk, Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, "Position Sensorless Speed Estimation in Switched Reluctance Motor Drive with Direct Torque Control-Inductance Vector Angle based Approach-", IEEJ Transactions on Fundamentals and

Materials, 査読有, Vol. 128, 2008, pp. 533-538

⑥ 西宮歩, 後藤博樹, 郭海蛟, 一ノ倉理, "磁束に基づく励磁相切換を利用した瞬時トルク制御法の電気自動車用SRモータへの適用", 日本磁気学会誌, 査読有, Vol. 32, 2008, pp. 487-490

⑦ Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, "Efficient Control Method of Switched Reluctance Motor Using Direct Neighboring Phase Torque Distribution Technique", 12th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2007), 査読有, CD-ROM, 2007, 307

[学会発表] (計13件)

① 全宰徳, 後藤博樹, 一ノ倉理, "回生エネルギーを利用した電気自動車用SRMのトルクリプル低減", 電気学会全国大会, 平成21年3月17日, 札幌

② Fuat Kucuk, Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, "ANN based Torque Calculation of SR Motor without Locking the Rotor", 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 平成20年11月14日, Austin(アメリカ)

③ 西宮歩, 後藤博樹, 一ノ倉理, 郭海蛟, "電気自動車用SRモータの瞬時トルク制御", 電気学会回転機研究会, 平成20年11月12日, 名古屋

④ Ayumu Nishimiya Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, "A Novel Torque Control for a SR motor EV", VIII International Conference on Electrical Machines, 平成20年9月9日, Vilamoura(ポルトガル)

⑤ Ayumu Nishimiya Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, "Control of SR Motor EV by Instantaneous Torque Control Using Flux Based Commutation and Phase Torque Distribution Technique", 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008), 平成20年9月3日, Poznan(ポーランド)

⑥ 全宰徳, 後藤博樹, 一ノ倉理, "非対称電源を用いたSRMのトルクリプル低減の検討", 電気関係学会東北支部連合大会, 平成20年8月22日, 郡山

⑦ 西宮歩, 後藤博樹, 一ノ倉理, "電気自動車用多極SRモータの瞬時トルク制御法に関する検討", 電気関係学会東北支部連合大会, 平成20年8月22日, 郡山

⑧ 西宮歩, 後藤博樹, 郭海蛟, 一ノ倉理, "相トルク分配と磁束に基づく励磁相切換による瞬時トルク制御法のSRモータEVへの応用", 電気学会全国大会, 2008年3月21日, 福岡

⑨西宮歩, 後藤博樹, 郭海蛟, 一ノ倉理, “相トルク分配と磁束に基づく励磁相切換を利用した瞬時トルク制御法の電気自動車用SRモータへの適用”, スピニクス特別研究会, 2007年11月22日, 秋田

⑩西宮歩, 後藤博樹, 一ノ倉理, “相トルク分配と磁束に基づく励磁相切り替えによる瞬時トルク制御を用いた電気自動車用SRモータの4象限駆動, 電気学会マグネティクス研究会, 2007年10月4日, 函館

⑪西宮歩, 後藤博樹, 郭海蛟, 一ノ倉理, “磁束に基づく励磁相切換を利用した瞬時トルク制御法の電気自動車用SRモータへの適用”, 日本応用磁気学会, 2007年9月14日, 東京

⑫ Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, “Efficient Control Method of Switched Reluctance Motor Using Direct Neighboring Phase Torque Distribution Technique”, 12th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2007), 2007年9月3日, Aalborg Congress and Culture Center, Aalborg(デンマーク)

⑬西宮歩, 後藤博樹, 郭海蛟, 一ノ倉理, “相トルク分配と磁束に基づく励磁相切換によるSRモータの瞬時トルク制御法の電気自動車への応用”, 電気関係学会東北支部連合大会, 2007年8月23日, 弘前

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 博樹 (GOTO HIROKI)
東北大学・大学院工学研究科・助手
研究者番号: 90374959

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし