

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760212

研究課題名（和文）SRM自動車のセンサレス高精度トルク制御

研究課題名（英文）Sensorless High-Precision Torque Control of SRM EV

研究代表者

後藤 博樹 (GOTO HIROKI)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90374959

研究成果の概要（和文）：スイッチトリラクタンスモータ（SRM）は、レアアースを用いない高信頼・低コストモータとして、電気自動車への応用が期待される。しかし、トルクリプルによる振動・騒音・乗り心地などへの影響が懸念されるほか、回転子位置検出のためのセンサが必要なため、信頼性や低コスト性が損なわれるなどの欠点も有する。本研究では、これらの二つの欠点を解消するため、SRM自動車のセンサレス高精度トルク制御法の提案と実証を行った。

研究成果の概要（英文）：Switched Reluctance Motor (SRM), as a reliable, low-cost motor without rare earth, its application to electric vehicles is expected. However, large torque ripple and rotor position sensor have drawbacks such as compromising the reliability and low cost. In this study, in order to overcome the drawbacks of these two, we demonstrate high-precision sensorless torque control of automotive SRM.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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，回生可変速運転，高効率駆動，センサレス

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の一種であり、高性能・高効率・高信頼・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活発に研究開発されている。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ため高コストであり、それらの希土類元素は中国などの特定の地域でしか採掘できないために、特に我が国では資源面において将来に不安がある。また、永久磁石モータは自

動車の惰性走行時にも鉄損を生じることや、限られたバッテリー電圧で高速運転を行うために弱め界磁制御などを行うと効率が著しく低下するなど、自動車駆動用としては必ずしも適していない。

スイッチトリラクタンスマータ（以下、SRM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優れた長所を持ち、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目しており、SRM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、SRMの欠点として、(1)トルクリプルが大きい、(2)高効率なトルク制御法が確立していない、(3)回転子位置検出が必要ことが指摘されている。(1)および(2)について、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。申請者は平成19年度および20年度の科学研究費補助金（若手（B）課題番号：19760189）において、電気自動車用SRMの高精度・高効率駆動を目的とし、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し、実走行試験まで達成しており、現在、更なる改良を続けているところである。

一方、(3)について、高精度トルク制御を行うためには、他のモータと同様に高分解能の回転子位置検出器が必要であるが、これらのセンサは、熱や振動に弱く、非常に高価であり、そのままではSRMの長所をスポイルしてしまう。そのため、SRMの低コスト性や耐環境性を生かすために、センサレス化の要求が極めて高い。

研究代表者は、SRM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。しかしながら、その手法では、Direct Torque Controlのような磁束ベクトルの向きが回転子位置と常に同期する駆動方法には適用できず、申請者らが提案した駆動制御方法には適用できない。また、現状では始動方法も確立しておらず、そのまま電気自動車駆動用モータへ適用することは不可能である。

ところで、研究代表者らが提案している駆動方法では、回転子位置情報は(1)速度、(2)トルク、(3)励磁相切り替えのタイミング検出に用いている。これに対し、すでに筆者らは磁束と電流情報のみからトルクと速度を推定する方法を提案、実証しているため、残りの情報、すなわち、(3)を回転子位置センサを用いずに達成できれば回転子位置センサレス駆動

ができる着想するにいたった。また、これまでの実験からこのタイミング検出の精度はそれほど高くなくてもよいという考察が得られているため、原理的に経年変化などにも強いセンサレス制御が実現できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題では、電気自動車用SRMの高精度・高効率・低コスト・高信頼な制御の確立を目的とする。

3. 研究の方法

(1) シミュレーションによるアルゴリズムの検討

汎用シミュレーションソフトウェアMATLAB/SIMULINK、および回路シミュレーションソフトウェアSimplorer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った。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、位置推定精度や制御安定性などの比較検討を行った。

(2) 高速DSPと小型モータを用いた実験による評価

現有する小型SRMを使用して実験を行い、提案手法の基礎的な評価を行った。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、位置推定精度や制御安定性などの比較検討を行った。

(3) 電気自動車駆動への適用シミュレーションと最適制御パラメータの選定

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) 制御回路の開発と実走行試験

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LabView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。また、制御回路はDSPではなく、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いることとする。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。制御回路を用いて実際に電気自動車を走行させ、センサレス始動、加速、回生制動、後退などの動作を検証した。

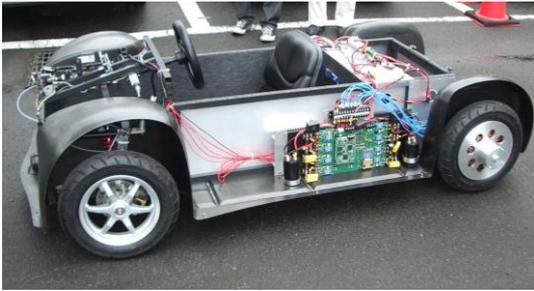


図1 開発中の電気自動車

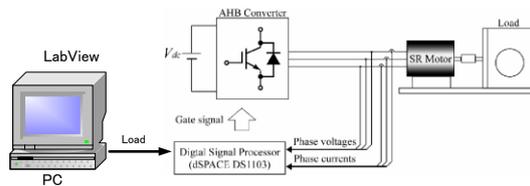


図2 小型モータを用いた制御実験の概要

4. 研究成果

本研究により、以下のことを明らかにした。

- (1) 計算機シミュレーションによりアルゴリズムの開発と検証を行い、提案センサレス制御法の有用性を確認した。
- (2) 小型モータを用いた実証実験を行い、提案センサレス制御手法によって、簡便なアルゴリズムでセンサレス、かつトルクリプルの小さい高精度なトルク制御が実現できることを確認した。
- (3) 計算機シミュレーションにより電気自動車用SRモータへの適用性を確認した。また、その場合の最適パラメータをシミュレーションにより明らかにした。
- (4) シミュレーション結果に基づき、電気自動車用SRモータの制御回路の開発を行った。実走行試験により、その基本動作を確認した。

以上により、本研究の目標を十分に達成した。

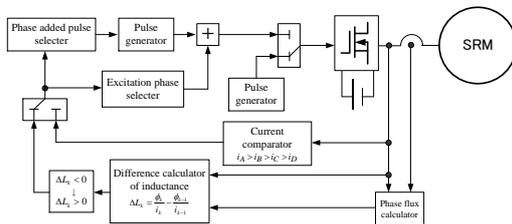


図3 開発したセンサレス駆動アルゴリズム：全相の巻線に同時にパルス電圧を注入し、その応答電流波形から初期励磁相決定して始動する。始動後は現在の励磁相の次の励磁相にパルス電圧を注入し、励磁層の切り替えタイミングを検出する。

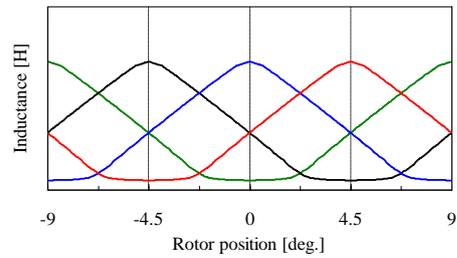


図4 回転子位置とインダクタンスの関係：各相のインダクタンスを比較することで、最適な初期励磁相を決定できる。

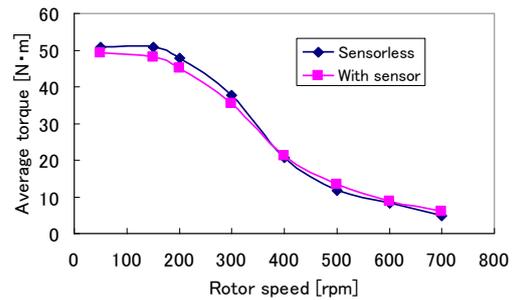


図5 速度—トルク特性：提案手法によるセンサレス駆動時でも、センサを用いた場合と同等の性能を有していることが確認できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 河津雄太良, 佐藤宏樹, 矢倉洋史, 後藤博樹, 一ノ倉理, 大型トレーラの燃費改善を目的としたインホイールSRモータ, 日本磁気学会誌, 査読有, Vol. 35, 2011, pp. 118-122.
- ② Hiroki Goto, Ayumu Nishimiya, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, Instantaneous torque control using flux-based commutation and phase-torque distribution technique for SR motor EV, The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 査読有, Vol. 29, No. 1, 2010, pp. 173-186.
- ③ 矢倉洋史, 後藤博樹, 一ノ倉理, インホイールドライブ電気バス用SRモータの極数の検討, 日本磁気学会誌, 査読有, Vol. 33, 2009, pp. 307-310.

〔学会発表〕(計15件)

- ① 河津雄太良, 後藤博樹, 一ノ倉理, アウターロータ型SRモータの固定子極長に関する検討, 電気学会マグネティックス研究会, 2010年11月25日, 秋田
- ② 河津雄太良, 後藤博樹, 一ノ倉理, 電気バス用SRモータの制御システムの検討,

- 電気学会回転機研究会, 2010年10月20日, 北見
- ③ Erkan Sunan, Syed Muhammad Raza Kazmi, Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, Osamu Ichinokura, Instantaneous Torque Ripple Control and Maximum Power Extraction in a Permanent Magnet Reluctance Generator driven Wind Energy Conversion System, The 19th International Conference on Electrical Machines (ICEM2010), 2010年9月8日, ローマ (イタリア)
 - ④ Fuat Kucuk, Hiroki Goto, Hai Jiao Guo, Osamu Ichinokura, Fourier Series based Characterization of Switched Reluctance Motor using Runtime Data, The 19th International Conference on Electrical Machines (ICEM2010), 2010年9月7日, ローマ (イタリア)
 - ⑤ 河津雄太良, 佐藤宏樹, 矢倉洋史, 後藤博樹, 一ノ倉理, 大型トレーラの燃費改善を目的としたインホイール SR モータの検討, 日本磁気学会, 2010年9月5日, つくば
 - ⑥ 河津雄太良, 後藤博樹, 一ノ倉理, 相互インダクタンスを考慮した多極 SR モータのシミュレーションモデル, 電気関係学会東北支部連合大会, 2010年8月26日, 八戸
 - ⑦ 佐藤宏樹, 河津雄太良, 矢倉洋史, 後藤博樹, 一ノ倉理, インホイール SR モータを用いた大型トレーラの燃費改善の検討, 電気関係学会東北支部連合大会, 2010年8月26日, 八戸
 - ⑧ 河津雄太良, 後藤博樹, 一ノ倉理, 始動を考慮した電気自動車用 SRM のセンサレス駆動, 電気学会全国大会, 2010年3月17日, 東京
 - ⑨ 河津雄太良, 後藤博樹, 一ノ倉理, インダクタンス分布を用いた SRM のセンサレス駆動, 日本磁気学会スピニクス特別研究会, 2009年10月22日, 米沢
 - ⑩ 矢倉洋史, 後藤博樹, 一ノ倉理, 固定子の支持を考慮したデュアルロータ型 SR モータの検討, 日本磁気学会, 2009年9月13日, 長崎
 - ⑪ 山内崇弘, 後藤博樹, 一ノ倉理, 高速用 SR モータの動特性解析, 電気関係学会東北支部連合大会, 2009年8月20日, 仙台
 - ⑫ 矢倉洋史, 後藤博樹, 一ノ倉理, 固定子の支持を考慮したデュアルロータ構造とシングルロータ構造の SR モータにおける比較, 電気関係学会東北支部連合大会, 2009年8月20日, 仙台
 - ⑬ 中川隼太, 後藤博樹, 一ノ倉理, IPMSM のセンサレス DTC 駆動に関する検討, 電

気関係学会東北支部連合大会, 2009年8月20日, 仙台

- ⑭ 河津雄太良, 後藤博樹, 一ノ倉理, 電気自動車用 SRM のセンサレス駆動に関する検討, 電気関係学会東北支部連合大会, 2009年8月20日, 仙台
- ⑮ 全宰徳, 後藤博樹, 一ノ倉理, 瞬時トルク制御における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, 電気関係学会東北支部連合大会, 2009年8月20日, 仙台

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・助教

研究者番号: 90374959

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし