

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686045

研究課題名(和文)SRモータ搭載EVの低トルクリプル・高効率協調マルチドライブ

研究課題名(英文)Cooperation Multi-Drive Control with Low Torque Ripple and High Efficiency for EV equipped with SR motors

研究代表者

後藤 博樹 (Goto, Hiroki)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90374959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,900,000円、(間接経費) 6,270,000円

研究成果の概要(和文)：希土類元素を用いないSRモータはその頑健性や低コスト性から究極の電気自動車駆動方式であり、インホイールダイレクトドライブに適していると考えられるが、トルクリプルが大きく、高効率なトルク制御法が確立していない。本研究課題では、インホイールSRモータを搭載した電気自動車における各輪駆動用モータのトルクリプルの低減、高効率駆動、および駆動回路の高効率化・低コスト化を目的として、複数のSRモータ間にわたる瞬時トルク制御法およびSRモータのマルチドライブ用低コスト・高効率駆動回路の提案と実証を行った。

研究成果の概要(英文)：An SR motor, as a reliable, low-cost motor without rare earth materials, its application to In-wheel Direct-Drive car, which is an ultimate electric vehicle, is expected. However, large torque ripple and low efficiency are serious drawbacks. In the study, a new control method to reduce torque ripple and drive at high efficiency was proposed. And the low-cost and high-efficiency control circuit for multi-drives was developed.

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：電気機器工学 電気自動車 マルチドライブ トルクリプル低減 エネルギー効率化 脱レアアース

## 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的一种であり、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、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損失を生じることや、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)回転子位置検出が必要、(2)トルクリプルが大きい、(3)高効率なトルク制御法が確立していない、(4)駆動回路が特殊であることが指摘されている。(1)について、SRモータのトルク制御を行うためには、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SRモータの長所をスポイルしてしまう。そのため、SRモータ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。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。また、平成21年度および22年度の科学研究費補助金(若手(B)課題番号:21760212)において、電気自動車用SRモータの高精度・高効率・低コスト・高信頼な制御の確立を目的として、新しいセンサレス制御法の提案、実証を行った。

また、(2)および(3)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:9760189)において、電気自動車用SRモータの高精度・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を提案し、実走行試験まで達成した。しかし、本手法のように、電流を制御する方法では、低速時は非常に高いトルクリプル抑制効果を発揮するものの、高速回転時には速度起電力のために思うように電流を制御することができず、トルクリプルが大きくなってしまふ。特に、励磁相切替時にトルクの落ち込みが大きく、不快な振動や走行安定性に影響を与える。それを解決するため、高速時に励磁終了角を遅らせることで高速時のトルク制御性を向上させたが、この場合は、回転方向に対して逆向きの相トルクが生じ、効率が低下してしまっていた。

そこで、申請者は開発中のインホイールSRモータ搭載電気自動車において、モータが複数あり、それらの回転速度・トルクは非常に類似した状態であることに着目した。すなわち、左右また前後、もしくは全駆動輪のそれぞれにトルクリプルがあった場合においても、速度・平均トルクがほぼ同じであれば、各モータのトルクの谷をずらすことで、重ね合わせた際に合計トルクが一定になるように制御することが可能である着想に至った。これは申請者が既に提案・実証している高精度トルク制御法における各相のトルク・電流分配法を一つのモータ内で完結せず、複数のモータにまたがって行うことにより実現を目指す。また、このことにより、トルク・電流分配に新たな自由度が生まれるため、より効率が低い分配法を選択することができることになる。

(4)について申請者はすでに、一般的な三相インバータモジュールでSRモータを駆動する方法を提案している。本研究課題においては、この駆動回路を発展させ、複数モータの駆動(マルチドライブ)に適した低コスト・高効率駆動回路の実現を目指す。そのためには、上述した新たな制御の自由度により実現できると考えられた。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、インホイールSRモータを搭載した電気自動車における各輪駆動用モータのトルクリプルの低減、高効率駆動、および駆動回路の高効率化・低コスト化を目的として、複数のSRモータ間にわたる瞬時トルク制御法およびSRモータのマルチドライブ用低コスト・高効率駆動回路の提案と実証を目指した。

### 3. 研究の方法

研究期間は3年間である。1年目である平成23年度においては、シミュレーションと小型モータを用いた実験によりマルチドライブトルクリプル低減制御の基本的なアルゴリズムの考案と検証を行った。

2年目である平成24年度においては、シミュレーションと小型モータを用いた実験によりマルチドライブ用低コスト・高効率駆動回路の基本設計と検証を行った。

最終年度である平成25年度においては実車へ適用するための制御装置・駆動回路の開発動作試験を行った。

以下、研究方法について年度ごとに具体的に示す。

#### 平成23年度

##### (1) シミュレーションによるマルチドライブトルクリプル低減制御手法の検討

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。SR モータの非線形モデルは、これまでの研究によりすでに構築されており、短期間での検討が可能であった。

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、トルク制御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アルゴリズムの評価

本研究では複数モータの同時制御を課題としているため、本来は複数モータを使用して評価を行うべきであるが、設備上の問題から評価に使用できる実機は現有する小型 SR モータを1台のみであった。そこで、高速 DSP を利用したリアルタイムシミュレータを構築し、実機とリアルタイムシミュレータを同時に制御することにより、提案制御手法の評価を行った。

実験では、トルクメータに接続された1台の小型 SR モータとリアルタイムシミュレータによる SR モータに対し、それぞれ異なる負荷を与え、それぞれに対し、構築したアルゴリズムによる制御システムにより、総合トルクリプル低減および高効率協調駆動制御を行った。この時、それぞれのモータのトルク波形を同時に計測し、その総和を計算することにより、総合的なトルクリプルを評価し、同時に2台の SR モータの総合効率にいても計測し、本アルゴリズムの有効性を検証した。



図1 小型 SR モータを用いた実機試験

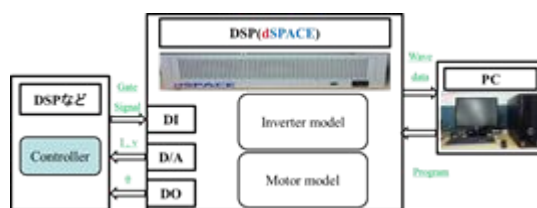


図2 リアルタイムシミュレータのイメージ：高速 DSP によりモータおよびインバータの実時間シミュレーションを行い、実機と連携して評価を行った。

#### 平成24年度

##### (1) シミュレーションによるマルチドライブ駆動回路の検討

回路シミュレータ Simplorer による提案駆動回路のシミュレーションによる検討を行った。Simplorer を用いることより駆動回路の振舞を含めた詳細なシミュレーションが可能であり、それに必要な電気自動車および SR モータの非線形モデルもすでに構築済みである（「非対称電源を用いた SR モータのトルクリプル低減の検討」, 全宰徳, 後藤博樹, 一ノ倉理, 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 2I05, 2008）。

##### (2) 小型 SR モータを用いた実証実験

平成23年度と同様に小型モータを用いて提案駆動回路の実証実験を行った。この際の駆動回路は信頼性の確保のため、プリント基板を設計した。設計には現有のプリント基板設計専用ソフトウェア Eagle を用いた。

#### 平成25年度

##### (1) 制御回路の開発

開発中の電気自動車は一人乗りの小型車であり、これまでの PC を利用する高速 DSP 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。この制御回路を実用的かつ低コストに設計することも本研究における大事な目的であることから、制御回路は DSP ではなく、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いることとした。FPGA はマイコンや DSP と違い、プログラムはハードウェアとして実現される

ため、完全な並列動作が可能であり、高速な制御が可能である。VHDL 言語により開発が可能のため、同じく VHDL 言語をベースとして Simplorer で構築した制御モデルをベースとした速やかな実装が可能となった。さらに、新たに汎用シミュレータ(Simulink)を用い、シミュレーションによりパラメータの設計ができるように環境を整え、実際に制御プログラムの基本動作を確認した。

## (2) 実機試験

モータ試験ベンチにより、開発した FPGA ベースの制御回路の動作試験を行い、マルチドライブ協調トルクリプル低減制御と提案駆動回路の動作について、電流・電圧・騒音等について検証し、提案駆動制御手法の有効性の確認を行った。

## 4. 研究成果

本研究により、以下のことを明らかにした。

- (1) シミュレーションによるマルチドライブトルクリプル低減制御アルゴリズムの検討のため、高速かつ大規模・長時間シミュレーションが可能なシミュレーション方式を確立した。
- (2) 上記シミュレーション環境により、マルチドライブ時においては単一のモータ制御時に比較して、トータルのトルクリプルを抑制できる制御手法を明らかにした。
- (3) 高速 DSP を用いてリアルタイムシミュレータを構築し、実モータ制御と連成してシミュレーションを行うことにより、提案制御アルゴリズムの検証を行うための手法を明らかにした。
- (4) 前述の検証環境により本アルゴリズムの実現性を確認した結果、提案制御手法で見かけのトルクリプルを抑制できても、低騒音化および高効率化への改良は限定的であることが明らかになった。
- (5) さらに低騒音化および高効率ドライブのため、磁束推定に基づく SR モータの予測制御を提案し、シミュレーションにより高いトルクリプル抑制効果と高効率化を明らかにした。
- (6) コンデンサと直流電源を直列接続することで、スイッチングデバイス数、配線数、および回路損失を減少させる駆動回路を提案し、シミュレーションにより提案制御方式と併用して動作可能であることを明らかにした。
- (7) 提案制御手法を用いるための FPGA を用いた実用的かつ低コストな専用制御回路を開発した。実際に制御プログラムの基本動作を確認した。
- (8) モータ試験ベンチにより開発した制御回路の動作試験を行い、マルチドライブ協調トルクリプル低減制御と提案駆動回路の動作について、電流・電圧・騒音等について検証し、提案駆動制御手法の有効性を確認した。

以上により、本研究の目標を十分に達成した。

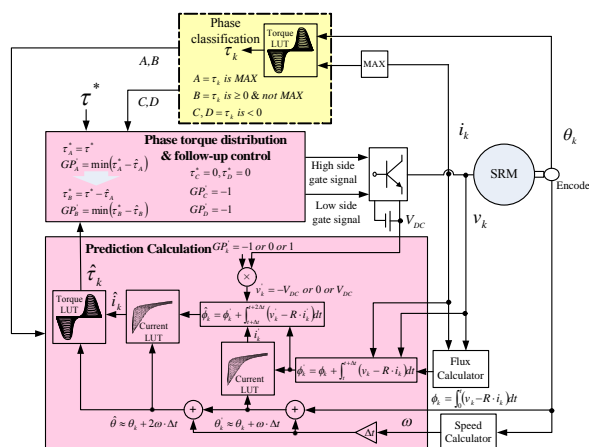


図3 磁束推定に基づくSRモータの予測制御：リアルタイムシミュレータの開発段階において明らかになった、高速にモータ状態を演算する手法を用い、制御応答を高速に予測することにより最適なゲートパターンを選択可能とする。

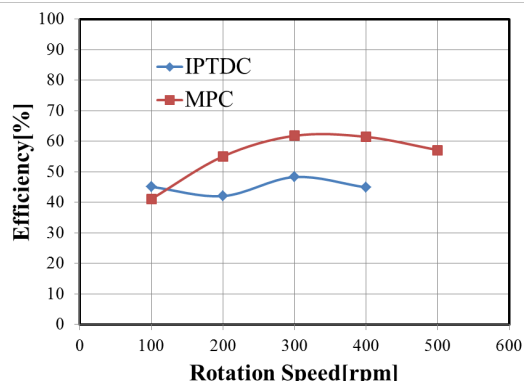


図4 提案手法による効率特性：新手法(MPC)では従来手法(IPTDC)に対し、大幅に高効率化が可能であることが明らかになった。



図5 開発したFPGAベースの制御回路

## 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 2件)

(1)T. Ogasawara, H. Goto, O. Ichinokura, A Study of Rotor Pole Shape in Outer Rotor Type SR Motor, Journal of the Magnetics Society of Japan, 査読有, 37-3 巻, 2013 年, 273-277

DOI:10.3379/msjmag.1305R009

(2)佐藤宏樹, 後藤博樹, 一ノ倉理, トルク重量比を考慮した電気バス用インホイール SR モータの最適極数の決定と試作機の基礎特性, 日本磁気学会誌, 査読有, 36-3 巻, 2012 年, 258-262

DOI:10.3379/msjmag.1205R016

[学会発表](計 28件)

(1)村上真哉, 後藤博樹, 一ノ倉理, アキシヤルギャップ型 SR モータの最適な直径 - 軸長比の検討, 電気学会全国大会, 2014 年 3 月 19 日, 松山

(2)後藤博樹, 柴本亨, 一ノ倉理, 電気自動車用インホイールアキシヤルギャップ SR モータの開発, 電気学会回転機研究会, 2013 年 11 月 14 日, 仙台

(3)時田崇広, 後藤博樹, 一ノ倉理, アキシヤルギャップ型 SR モータの振動解析, 電気学会回転機研究会, 2013 年 11 月 14 日, 仙台

(4)小笠原隆泰, 後藤博樹, 一ノ倉理, 集積型インホイール SR モータの試作検討, スピニクス特別研究会, 2013 年 10 月 17 日, 盛岡

(5)T. Ogasawara, H. Goto, O. Ichinokura, A Study of Rotor Pole Shape of In-Wheel Direct Drive SR Motor, 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2013), 2013 年 9 月 5 日, Lille (フランス)

(6)H. Goto, T. Shibamoto, K. Nakamura, O. Ichinokura, Development of High Torque Density Axial-gap Switched Reluctance Motor for In-wheel Direct-Drive EV, 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2013), 2013 年 9 月 4 日, Lille (フランス)

(7)小笠原隆泰, 後藤博樹, 一ノ倉理, インホイール SR モータへの駆動回路の集積に関する検討, 電気関係学会東北支部連合大会, 2013 年 8 月 22 日, 会津若松

(8)村上真哉, 後藤博樹, 中村健二, 一ノ倉理, アキシヤルギャップ型 SR モータの固定子極長の検討, 電気関係学会東北支部連合大会, 2013 年 8 月 22 日, 会津若松

(9)時田崇広, 後藤博樹, 中村健二, 一ノ倉理, アキシヤルギャップ型 SR モータに関する振動・騒音の解析, 電気関係学会東北支部連合大会, 2013 年 8 月 22 日, 会津若松

(10)大沼裕樹, 後藤博樹, 一ノ倉理, CarSim を用いたインホイール SR モータ電気自動車

の走行シミュレーション, 電気関係学会東北支部連合大会, 2013 年 8 月 22 日, 会津若松  
(11)後藤博樹, 柴本亨, 中村健二, 一ノ倉理, アキシヤルギャップ型 SR モータを用いたインホイールダイレクトドライブ EV の開発, 電気学会全国大会, 2013 年 3 月 22 日, 名古屋

(12)小笠原隆泰, 後藤博樹, 一ノ倉理, 駆動回路集積型インホイール SR モータの検討, 電気学会全国大会, 2013 年 3 月 22 日, 名古屋

(13)Toru Shibamoto, Hiroki Goto, Kenji Nakamura, Osamu Ichinokura, A Prototype Design of Axial-gap Switched Reluctance Motor for In-Wheel Direct-Drive EV, International Conference on the Asian Union of Magnetic Societies, 2012 年 10 月 4 日, 奈良

(14)Takayasu Ogasawara, Hiroki Goto, Osamu Ichinokura, A Study of Rotor pole shape in Outer Rotor Type SR Motor, International Conference on the Asian Union of Magnetic Societies, 2012 年 10 月 4 日, 奈良

(15)小笠原隆泰, 後藤博樹, 一ノ倉理, アウターロータ型 SR モータの回転子形状に関する検討, 電気学会 A 部門大会, 2012 年 9 月 20 日, 秋田

(16)柴本亨, 後藤博樹, 中村健二, 一ノ倉理, 電気自動車用アキシヤルギャップ SR モータの試作検討, 電気学会 A 部門大会, 2012 年 9 月 20 日, 秋田

(17)椛沢涼太, 後藤博樹, 一ノ倉理, 相互インダクタンスを考慮した SR モータのリアルタイムシミュレーション, 電気学会 A 部門大会, 2012 年 9 月 20 日, 秋田

(18)小林身早, 後藤博樹, 一ノ倉理, 巻線抵抗を考慮した磁束推定に基づく SR モータのモデル予測制御, 電気学会 A 部門大会, 2012 年 9 月 20 日, 秋田

(19)柴本亨, 後藤博樹, 中村健二, 一ノ倉理, インホイール型アキシヤルギャップ SR モータの開発, 電気学会マグネティクス研究会, 2012 年 3 月 29 日, 仙台

(20)佐藤宏樹, 後藤博樹, 一ノ倉理, 電気バス用大型インホイール SR モータの開発, 電気学会回転機研究会, 2011 年 10 月 26 日, 長崎

(21)椛沢涼太, 後藤博樹, 一ノ倉理, SR モータ電気バスの制御を含めた走行シミュレーション, 電気学会マグネティクス研究会, 2011 年 10 月 25 日, 京都

(22)小林身早, 後藤博樹, 一ノ倉理, 磁束推定に基づく SR モータのモデル予測制御, スピニクス特別研究会, 2011 年 10 月 17 日, 郡山

(23)佐藤宏樹, 河津雄太良, 矢倉洋史, 後藤博樹, 一ノ倉理, 電気バス用インホイール SR モータの開発, 日本磁気学会, 2011 年 9 月 29 日, 新潟

(24) 梶沢涼太，後藤博樹，一ノ倉理，  
Realtime-Workshop を用いた SR モータ電気  
バスの長時間走行解析，日本磁気学会，2011  
年 9 月 29 日，新潟

(25) 佐藤宏樹，後藤博樹，一ノ倉理，大型車  
両用インホイール SR モータの特性，電気関  
係学会東北支部連合大会，2011 年 8 月 25 日，  
多賀城

(26) 梶沢涼太，後藤博樹，一ノ倉理，インホ  
イール SR モータを搭載した電気バスの走行  
特性に関する検討，電気関係学会東北支部連  
合大会，2011 年 8 月 25 日，多賀城

(27) 小林身早，後藤博樹，一ノ倉理，SR モー  
タの予測制御に関する検討，電気関係学会東  
北支部連合大会，2011 年 8 月 25 日，多賀城

(28) 後藤博樹，磁気回路法によるモータ特性  
の高速計算，第 19 回磁気応用シンポジウム  
(招待講演)，2011 年 7 月 21 日，東京

〔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

## 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