

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560354

研究課題名(和文) 顕著な非線形性をもつIPMモータセンサレスドライブシステムの単純最適制御

研究課題名(英文) Simple Optimal Control for senserless drive system of IPM motor with significant non-linearity

研究代表者

長谷川 勝 (HASEGAWA, Masaru)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：70340198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、埋込磁石同期電動機における、位置センサレス制御の実現、磁気飽和現象対策、電力変換器(インバータ)の非線形特性の3問題を同時に解決する手法を確立した。性能はシミュレーションと実験により評価しており、その妥当性、有効性を確認している。これにより、埋込磁石同期電動機の高出力密度化開発動向に適した制御手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：This project has solved simultaneously I. Realization of position sensorless control, II. Countermeasure for magnetic saturation phenomenon, III Countermeasure of non-linearity in PWM inverter with over-modulation to drive interior permanent magnet synchronous motors (IPMSMs). This project has completed above problems by both numerical simulation and experiments, meaning that the proposed method is significantly suitable for IPMSMs with high power density design.

研究分野：パワーエレクトロニクス, 制御

キーワード：埋込磁石同期電動機 センサレス制御 磁気飽和 過変調 くし形フィルタ

1. 研究開始当初の背景

我が国では、全電力消費量のうち 55%以上がモータで消費されており、高効率化が可能な IPM モータが注目されている。今なお、その用途が拡大しており、対環境性の課題からも、車載用としてもさらなる**高出力密度化**、**ロバスト化**、**高応答化**などが求められている。

車載、電気鉄道用途では、高応答トルク制御が求められる。この場合、IPM モータを駆動する電力変換器の制御入力飽和（以下、制御限界）の制約を受け、電力変換器の過変調運転、1 パルスモード、IPM モータの弱め磁束制御などを利用して性能改善を図ることになる。これまでも国内外で多くのアプローチが見られるが、それぞれ、

- 1) トルク応答が位相指令のフィードバック応答に制約される。
- 2) 複雑なアルゴリズムやルックアップテーブルを必要とする。
- 3) アルゴリズムが複雑な場合、超高速演算器が必要となり、現状では現実的なアプローチとはならない。
- 4) 電力変換器の非線形領域に対応した専用アルゴリズムが必要で、線形領域からの制御器切り替えが必要となる。

などの問題がある。また、全ての方法が IPM モータの基本モデルに立脚したものであり、モータパラメータの変動の影響を受ける。車載、電気鉄道用途において位置センサレス制御適用への期待は高いが、現在のところ、位置センサレス制御で上記の問題を扱ったものは見当たらない。以上から、

- a) 電力変換器の制御限界、b) 磁気飽和に伴うモータの特性変動、c) 位置センサレス制御の三問題を一掃してからトルク制御の高応答化に取り組む必要がある。本研究は上記の 3 つの課題を同時に解決する手法を提示し、その妥当性と有効性を評価するものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、低コスト化、**高出力密度化**が要求される電気自動車に搭載する埋込磁石同期モータ（以下、IPM モータ）の高応答トルク制御を

- 1) **位置センサレス**条件下で実現すること
- 2) **IPM モータの磁気飽和によるモータ特性変動にロバスト**であること
- 3) **電力変換器の制御限界**を考慮しつつ、**真に高応答なトルク応答**を得ることである。

3. 研究の方法

- 1) 最大トルク制御軸に基づく高応答トルク制御法

本研究では空間ベクトル変調と最大トルク制御軸とを組み合わせた高応答トルク制御法を開発し、初年度においてはシミュレーシ

ョンにより、2 年目以降については主に実験によりその妥当性と性能を評価した。

- 2) 6 倍周期脈動に対する対処法の確立
過変調領域、1 パルスモードで電力変換器を動作させると、運転周波数の 6 倍周期で電流脈動が生じ、電流応答を低下させる。本研究では応答性を重視するため、特定周波数を高速に除去できる「**くし形フィルタ**」を新たに導入して、モータパラメータに関する情報を一切用いずにこの問題に対処した。

3) 弱め磁束制御への展開

運転範囲拡大法として弱め磁束制御があり、研究代表者らは最大トルク制御軸上の弱め磁束制御を開発し、主に実験によりその性能を評価した。

4. 研究成果

研究代表者らは、先行研究において IPM モータの等価 SPM モータモデルを導出し、自動的かつ磁気飽和による特性変動に低感度な最大トルク制御を実現した。したがって、この等価モデルが推定する座標方向にモータ電流を流し、この振幅を高速に立ち上げればよい。この事実に基づき、本研究では以下を明らかにした。

- a) 電力変換器の過変調、1 パルス運転を考慮した最大トルク制御軸に基づく位置センサレス高応答トルク制御法を提示し、その性能評価を行った。結果、定格運転時付近において 8 % のトルク向上を達成した。
- b) 最大トルク制御軸に基づく弱め磁束制御法を提示し、運転可能範囲の拡大を図った。
- c) 過変調、1 パルス運転時に生じる電流の特定周波数リップル成分を除去する方法としてくし形フィルタを適用し、定常時のみならず可変速時においても有効であることを確認した。
- d) 上記のくし形フィルタを停止・低速運転時における高周波電圧重畳位置センサレス制御にも適用し、高速で低演算不可な位置推定方式を実現した。

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 8 件)

松本 純、長谷川 勝、道木 慎二、最大トルク制御に適した磁束モデルに基づく IPMSM の位置センサレス弱め磁束制御、電気学会産業応用部門論文誌、査読有、Vol.135、No.6、2015 年、pp.662-670

Toshiki Suzuki, Masaru Hasegawa, Mutuwo Tomita, and Shinji Doki, Initial Position Estimation for IPMSMs Using Comb Filters

and Effects on Various Injected Signal Frequencies, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有, Vol.4, No.3, 2015年, pp.204-211

Toshiki Suzuki, Masaru Hasegawa, and Mutuwo Tomita, Fast Initial Position Estimation of IPMSMs Using Comb Filters, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有, Vol.3, No.2, 2014年, pp.104-111

Atsushi Matsumoto, Masaru Hasegawa, Mutuwo Tomita and Shinji Doki, Position Sensorless Control of IPMSMs Using Full-Order Flux Observer based on an Algebraic Design Method, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有, Vol.2, No.3, 2013年, pp.141-149

Atsushi Matsumoto, Masaru Hasegawa, and Keiju Matsui, Position Sensorless Control of IPMSMs Based on a Novel Flux Model Suitable for Maximum Torque Control, Electrical Engineering in Japan, 査読なし, Volume 184, Issue 3, 2013年, pp.55-66

Masaru Hasegawa, Masahiko Yoshimi and Atsushi Matsumoto, Parameter Measurements with Unknown Input Observer for IPMSM Position Sensorless Control Based on Maximum Torque Control Frame, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有, Vol.1, No.3, 2012年, pp.141-147

Masaru Hasegawa and Shinji Doki, Trends in Motor Drive Techniques in Japan --- Controls for Synchronous Motors with Non-linearity---, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有, Vol.1, No.3, 2012年, pp.123-131

Masaru Hasegawa, Hiroki Kitahara and Atsushi Matsumoto, Extended-Flux Model with Core-loss Resistance of Synchronous Reluctance Motors and Torque Estimation without Core Loss Measurement and Position Encoder, Journal of Energy and Power Engineering, 査読有, Vol.6, 2012年, pp.1480-1487

[学会発表](計 28 件)

Toshiki Suzuki, Shinji Doki and Masaru Hasegawa, Improvement in Response of Position Estimation for IPMSMs in Low-speed Regions Including Standstill Using Area Calculation, 17th European Conference on Power Electronics and Applications, No.588, 査読有, 2015年9月8日(to appear), Geneva (Switzerland)

Yousuke Nakayama, Atsushi Matsumoto and Masaru Hasegawa, A Robust Position Sensorless control Method of IPMSMs to Magnetic Non-linearity within Over-modulation Range, 17th European Conference on Power Electronics and Applications, No.250, 査読有, 2015年9月8日(to appear), Geneva (Switzerland)

Atsushi Matsumoto and Masaru Hasegawa, A Novel Anti-Windup and Flux-Weakening Control Method for Current Control of IPMSMs Using Current and Current Phase Operations, 17th European Conference on Power Electronics and Applications, 2015, No.325, 査読有, 2015年9月8日(to appear), Geneva (Switzerland)

松本 純, 長谷川 勝, PMSM の電流指令値および電流位相指令値操作型アンチワインドアップ弱め磁束制御法, 電気学会全国大会, 4-024, 2015年3月26日, 東京都大学(東京都, 世田谷区)

中山 陽介, 松本 純, 長谷川 勝, くし形フィルタを用いた永久磁石同期電動機の過変調駆動時における制御性能改善, 電気学会モータドライブ/家電民生合同研究会, MD-15-064/HCA-15-003, 2015年3月4日, 電気学会(東京都, 千代田区)

中山 陽介, 松本 純, 長谷川 勝, PMSM 過変調駆動のためのくし形フィルタを用いた基本波電流抽出法, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, C4-6, 2014年9月9日, 中京大学(愛知県, 名古屋市)

鈴木 俊毅, 道木 慎二, 長谷川 勝, 冨田 睦雄, 高速サンプリングを用いた IPMSM の直接初期位置推定性能改善, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, C4-3, 2014年9月9日, 中京大学(愛知県, 名古屋市)

中山 陽介, 松本 純, 長谷川 勝, 埋込磁石同期電動機の磁気飽和にロバストな位置センサレス制御と過変調駆動による駆動可能領域拡大, 電気学会産業応用部門大会, Y-95, 2014年8月26日, 東京電機大学(東京都, 足立区)

Atsushi Matsumoto, Masaru Hasegawa, Shinji Doki, A Novel IPMSM Model for Robust Position Sensorless Control to Magnetic Saturation, The International Power Electronics Conference Hiroshima, pp.2445 - 2450, 査読有 (Invited paper), 2014年5月21日, 広島国際会議場(広島県, 広島市)

Toshiki Suzuki, Masaru Hasegawa, Mutuwo

Tomita and Shinji Doki, Initial Position Estimation for IPMSMs Using Comb Filters and Effects on Various Injected Signal Frequencies, The International Power Electronics Conference Hiroshima, pp.907-913, 査読有 (Invited paper), 2014 年 5 月 19 日, 広島国際会議場 (広島県, 広島市)

鈴木 俊毅, 長谷川 勝, 富田 睦雄, くし形フィルタを用いた IPMSM の停止時を含む低速域センサレス制御性能改善, 電気学会全国大会, 4-103, 2014 年 3 月 19 日, 愛媛大学 (愛媛県, 松山市)

Atsushi Matsumoto, Shinji Doki and Masaru Hasegawa, A Novel Correction Method for Current Control of PMSM Operating within Voltage Saturation Region, 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.2539-2544, 査読有, 2013 年 11 月 13 日, Vienna (Austria)

鈴木 俊毅, 長谷川 勝, 三相三角波キャリア高調波電流の微分演算を用いない IPMSM 直接初期位置推定法, 電気関係学会東海支部連合大会, Po2-12, 2013 年 9 月 25 日, 静岡大学 (静岡県, 浜松市)

松本 純, 道木 慎二, 長谷川 勝, PMSM の電圧飽和領域における駆動に向けた電流制御器の積分値補正法, 電気関係学会東海支部連合大会, C3-2, 2013 年 9 月 25 日, 静岡大学 (静岡県, 浜松市)

Toshiki Nakamura and Masaru Hasegawa, Position Sensorless control in Overmodulation Range of Inverter for IPMSM with Magnetic Non-linearity, European Conference on Power Electronics and Applications, No.65, 査読有, 2013 年 9 月 4 日, Lille (France)

Toshiki Suzuki and Masaru Hasegawa, Fast Initial Position Estimation for IPMSMs at Standstill Using Comb Filters, European Conference on Power Electronics and Applications, No. 152, 査読有, 2013 年 9 月 3 日, Lille (France)

鈴木 俊毅, 長谷川 勝, 三相三角波キャリア PWM 方式による高調波電流を用いた IPMSM の直接初期位置推定, 電気学会産業応用部門大会, 3-58, 2013 年 8 月 30 日, 山口大学 (山口県, 宇部市)

松本 純, 道木 慎二, 長谷川 勝, PMSM の電圧飽和領域における駆動のための電流制御系補正法, 電気学会産業応用部門大会, 3-48, 2013 年 8 月 29 日, 山口大学 (山口県, 宇部市)

中村 俊貴, 長谷川 勝, 磁気飽和特性をもつ IPMSM に対する位置センサレス制御の過変調運転時性能, 電気学会半導体電力変換 / モータドライブ研究会, SPC-13-071/MD-13-013 2013 年 6 月 15 日, 青森市中央市民センター (青森県, 青森市)

中村 俊貴, 長谷川 勝, 最大トルク制御軸に基づく IPMSM 位置センサレス制御の過変調運転法における速度制御特性評価, 電気学会全国大会, 4-117, 2013 年 3 月 20 日, 名古屋大学 (愛知県, 名古屋市)

⑳ 鈴木 俊毅, 長谷川 勝, 富田 睦雄, くし形フィルタを用いた IPMSM の低速域センサレス制御性能改善, 電気学会半導体電力変換 / モータドライブ研究会, SPC-12-160/MD-12-054 2012 年 11 月 10 日, 福岡工業大学 (福岡県, 福岡市)

㉑ Atsushi Matsumoto, Masaru Hasegawa and Shinji Doki, A Flux-Weakening Control Method on Maximum Torque Control Frame for IPMSM Position Sensorless Control, IEEE Annual Conference on Industrial Electronics Society, pp.1602 - 1607, 査読有, 2012 年 10 月 27 日, Montreal(Canada)

㉒ 松本 純, 長谷川 勝, 道木 慎二, 誘起電圧表現における IPMSM の最大トルク制御軸上での弱め磁束制御, 電気関係学会東海支部連合大会, E4-7, 2012 年 9 月 25 日, 豊橋技術科学大学 (愛知県, 豊橋市)

㉓ 鈴木 俊毅, 長谷川 勝, 富田 睦雄, くし形フィルタを用いた IPMSM の高速初期位置推定, 電気関係学会東海支部連合大会, E4-6, 2012 年 9 月 24 日, 豊橋技術科学大学 (愛知県, 豊橋市)

㉔ 中村 俊貴, 長谷川 勝, 最大トルク制御軸に基づくインバータ駆動 IPMSM の過変調運転, 電気関係学会東海支部連合大会, Po1-16, 2012 年 9 月 24 日, 豊橋技術科学大学 (愛知県, 豊橋市)

㉕ 中村 俊貴, 長谷川 勝, 磁気飽和にロバストなシンクロスリラクスモータの数学モデルとトルク推定のパラメータ数最小化, 電気設備学会全国大会, H-8, 2012 年 8 月 22 日, 名古屋大学 (愛知県, 名古屋市)

㉖ 松本 純, 道木 慎二, 長谷川 勝, IPMSM 位置センサレス制御のための最大トルク制御に適した磁束モデルの適用可能性に関する考察, 電気学会産業応用部門大会, 3-68, 2012 年 8 月 23 日, 千葉工業大学 (千葉県, 習志野市)

⑳ 鈴木 俊毅，長谷川 勝，富田 睦雄，くし
形フィルタを用いた IPMSM の負荷時にお
ける高速初期位置推定法，電気学会産業応
用部門大会，Y-100，2012 年 8 月 21 日，千
葉工業大学(千葉県，習志野市)

6．研究組織

(1)研究代表者

長谷川 勝 (HASEGAWA, Masaru)
中部大学・工学部・教授
研究者番号： 70340198