

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008 ～ 2009
 課題番号：20760190
 研究課題名（和文）磁気非線形性を考慮した高速駆動埋込磁石同期モータのロバスト適応制御
 研究課題名（英文）Robust-Adaptive Control of High Speed IPMSM Considering Magnetic Nonlinearity
 研究代表者
 長谷川 勝（HASEGAWA MASARU）
 中部大学・工学部・准教授
 研究者番号：70340198

研究成果の概要（和文）：本研究では、その用途が拡大している埋込磁石同期モータのロバスト適応制御法を開発した。この強い磁気非線形性による制御性能の低下を回避すべく、(1)未知入力オブザーバによる感度低減化、(2)磁気非線形性に低感度な新数学モデルの構築などを実現し、埋込磁石同期モータの位置センサレス制御における性能改善を図った。

研究成果の概要（英文）：This study has developed robust-adaptive control of IPMSM for various applications. To avoid degradation of control performance due to magnetic nonlinearity in IPMSM, this study has realized (1) robust position estimation using unknown input observer, (2) a new mathematical model with less sensitivity to magnetic nonlinearity, yielding robust performance improvement in position sensorless control of IPMSM.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：パワーエレクトロニクス，制御工学

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：埋込磁石同期モータ，位置センサレス制御，磁気非線形，適応オブザーバ，未知入力オブザーバ，磁束モデル

1. 研究開始当初の背景

省エネ、CO₂ 排出低減をキーワードに小形・高効率モータとして埋込磁石同期モータ (IPMSM) に注目が集まる中、その小形化に付随する負の効果として各種モータの磁気非線形性（主に磁気飽和現象）が顕著となった。このことは、制御の観点からモータの伝達関数が増大したものとして捉えることができ、

モータ効率の低下および位置センサレス制御の安定性に悪影響をもたらす。このため、この解決が求められ、磁気飽和現象に伴うインダクタンス値の変動を把握することが最も基本的な考え方となった。報告者は、本研究の前段階として、適応オブザーバによるインダクタンスの適応同定法を提案し、その補償を試みた。しかしながら、適応同定に基づ

く方法では、原理的に同定の応答改善が困難で、電流応答に匹敵する同定応答が得られないため、十分な補償法とはならなかった。

2. 研究の目的

上記を踏まえ、本研究では磁気飽和現象に対する対策をロバスト制御に基づくアプローチを検討した。具体的には、以下の2つのアプローチを試みた。

- (1) 未知入力オブザーバを用いた IPMSM の位置センサレス制御を提案し、これを用いることにより、磁気飽和現象にロバストな位置推定を実現する。
- (2) オブザーバ構成の礎となる数学モデルを検討し、磁気飽和現象に対するロバスト性をモデル構築の段階で実現する。

3. 研究の方法

- (1) 未知入力オブザーバを用いたアプローチにおいては、
 - ① 未知オブザーバ導出にあたって、モータの厳密な離散時間状態方程式を導出した。
 - ② 未知入力オブザーバの具体的導出法と、オブザーバの極配置法を明らかにした。
 - ③ 未知入力オブザーバの磁気飽和現象に対するロバスト性を数値解析により評価した。
 - ④ ③と同様の評価を実験的に行った。
- (2) 磁気飽和現象に対してロバスト性を有するモデリングについては
 - ① IPMSM の物理モデルの再考に立ち返り、IPMSM の各軸の同期インピーダンスを仮想的に分離して、その一部を回転子磁束に重ね合わせることにより、磁束モデルを導出した。この一方は、磁気飽和現象がより顕著となる q 軸インダクタンスを用いないため、これに不感なモデリングが可能となる。
 - ② 上記を数学的に証明し、一切の近似を行うことなく導出および変換が可能であることを示した。
 - ③ この磁束モデルにより最大トルク制御座標が近似的に推定できることを明らかにし、かつその近似可能範囲を定量的に評価した。
 - ④ 厳密に最大トルク制御座標を推定する方法として、磁束モデルにより推定された座標の補正法を示した。
 - ⑤ ③、④については実験による評価を行った。

4. 研究成果

本研究では、2つのアプローチを解析と実験により評価し、どちらにおいても磁気飽和現象にロバストな位置センサレス制御が実現可能であることを明らかにした。以下に、それぞれの得失を示す。

(1) 未知入力オブザーバによる方法

- ① d 軸インダクタンスに不感、q 軸インダクタンスに極めてロバストな位置推定が可能である。q 軸インダクタンス変動が、ほぼ全て推定磁束の振幅に影響するため、位置推定のロバスト化が実現される。
- ② 離散時間制御系に立脚するため、計算コストに問題が残る。また、インターサンプリングを用いる関係上、電圧制御周期を意図的に長くする必要があるので、電流制御性能の低下が生じる。

(2) 提案する磁束モデルによる方法

- ① 極めてシンプルなモデル構成であり、拡張誘起電圧モデルよりもさらに計算コストを小さくすることが可能である。
- ② q 軸インダクタンスには不感となるが、d 軸インダクタンスの影響を受ける。したがって、磁気飽和現象に対するロバスト性は、対象となるモータの d 軸特性に依存する。

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 5 件)

- ① M. Hasegawa and K. Matsui, Position Sensorless Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Adaptive Flux Observer with Inductance Identification, The Institution of Engineering and Technology Research Journals on Electric Power Applications, 査読有 3, 2009, pp. 209-217
- ② 長谷川, 吉岡, 松井: 「未知入力オブザーバを用いたインダクタンス変動にロバストな IPMSM の位置センサレス制御」電学論 D, 査読有, 129, 2009, pp. 890-898
- ③ M. Hasegawa and K. Matsui, PMSM Position Sensorless Control Based on Adaptive Flux Observer Using ϵ 1-Modification Approach, 電気学会共通英文論文誌, 査読有, 4, 2009, pp. 450-452
- ④ M. Hasegawa, S. Yoshioka and K. Matsui, Position Sensorless Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Unknown Input Observer

for High-Speed Drives, IEEE Trans. on IA, 査読有, 45, 2009, pp.938-946

- ⑤ M. Hasegawa and K. Matsui, Design of a Robust Current Controller to Position Estimation Error for Position Sensorless Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors under High-Speed Drives, 電気学会共通英文論文誌, 査読有, 3, 2008, pp. 560-568

〔学会発表〕(計 36 件)

- ① 富田睦雄, IPMSMセンサレス制御のための同一次元拡張誘起電圧オブザーバの極配置, 電気学会全国大会, 2010年3月19日, 明治大学(東京)
- ② 松本純, IPMSM位置センサレス制御のための新しい磁束モデルに基づく最大トルク制御軸の高精度推定, 電気学会全国大会, 2010年3月19日, 明治大学(東京)
- ③ 小島研太, IPMSMの位置センサレス制御における数学モデルの選択に関する実験的検討, 電気学会全国大会, 2010年3月19日, 明治大学(東京)
- ④ M. Tomita, A Design Method of Full-Order Extended Electromotive Force Observer for Sensorless Control of IPMSM, IEEE-AMC, 2010年3月23日, Nagaoka (Japan)
- ⑤ 田中一, 並列フィードフォワード補償器を用いたIPMSM位置センサレスベクトル制御の速度推定応答改善, 電気学会全国大会, 2010年3月19日, 明治大学(東京)
- ⑥ 今枝幸嗣, 拡張磁束外乱オブザーバを用いた速度推定誤差にロバストな PMSM の位置センサレス制御, 電気学会全国大会, 2010年3月19日, 明治大学(東京)
- ⑦ 源馬崇文, 磁気飽和現象を考慮した無駄時間補償によるシンクロナスリラクタンスモータの電流制御, 電気学会全国大会, 2010年3月17日, 明治大学(東京)
- ⑧ 山内太喜, 直接形適応同定を用いた IPMSM 位置センサレス制御における速度制御の応答改善, 電気学会半導体電力変換研究会, 2010年3月5日, 福岡工業大学(福岡)
- ⑨ 吉見真彦, 未知入力オブザーバに基づく IPMSM のパラメータ同定, 電気学会半導体電力変換研究会, 2010年3月5日, 福岡工業大学(福岡)
- ⑩ 松本純, IPMSM位置センサレス制御のための最大トルク制御軸を推定する磁束モデルおよび同一次元磁束オブザーバの代数設計, 電気学会半導体電力変換研究会, 2010年3月5日, 福岡工業大学(福岡)
- ⑪ 今枝幸嗣, 拡張磁束外乱オブザーバを用いたPMSMの位置センサレス制御における位

置推定過渡特性の評価, 電気関係学会東海支部連合大会, 2009年9月10日, 愛知工業大学(愛知)

- ⑫ M. Hasegawa, Robustness Analyses and Improvement for Position Sensorless Control of IPMSMs to Inductance Variation due to Magnetic Saturation, European Conference on Power Electronics and Applications, 2009年9月9日 Barcelona (Spain)
- ⑬ 長谷川勝, 同期モータ位置センサレス制御用同一次元磁束オブザーバの代数設計, 電気学会産業応用部門大会, 2009年9月2日, 三重大学(津)
- ⑭ 小島研太, 集中巻IPMSMにも適用可能な最小次元磁束オブザーバによる位置センサレス制御, 電気学会産業応用部門大会, 2009年8月31日, 三重大学(津)
- ⑮ 山内太喜, IPMSM位置センサレス制御時の直接形適応同定法による低速運転性能の改善, 電気学会産業応用部門大会, 2009年8月31日, 三重大学(津)
- ⑯ 富田睦雄, IPMSMセンサレス制御のための同一次元拡張誘起電圧オブザーバの設計法, 電気学会産業応用部門大会, 2009年8月31日, 三重大学(津)
- ⑰ 新家惇, 同一次元磁束オブザーバを用いた同期リラクタンスモータのトルク推定, 電気学会産業応用部門大会, 2009年8月31日, 三重大学(津)
- ⑱ 北原寛貴, 磁界解析を利用した同期リラクタンスモータのシミュレーション, 電気学会産業応用部門大会, 2009年8月31日, 三重大学(津)
- ⑲ 吉見真彦, 線形行列不等式を用いたIPMSM位置センサレス制御用未知入力オブザーバの数値設計, 電気学会産業応用部門大会, 2009年8月31日, 三重大学(津)
- ⑳ 松本純, 最大トルク制御軸が推定可能な新しいIPMSM磁束モデルの提案, 電気学会産業応用部門大会, 2009年8月31日, 三重大学(津)
- ㉑ A. Shinke, Torque Estimation for Synchronous Reluctance Motors Using Robust Flux Observer to Magnetic Saturation, IEEE-ISIE, 2009年7月7日, Olympic Parktel (Seoul)
- ㉒ 新家惇, 同一次元磁束オブザーバを用いた同期リラクタンスモータのトルク推定, 電気学会全国大会, 2009年3月19日, 北海道大学(北海道)
- ㉓ 長谷川勝, 集中巻IPMSMにも利用可能な位置センサレス制御用最小次元磁束オブザーバ, 電気学会全国大会, 2009年3月18日, 北海道大学(北海道)

②4 H. Yamauchi, Performance Improvements of IPMSM Position Sensorless Control for Low-speed Operation Using ϵ 1-Modification Approach, IEEE- PECON, 2008年12月1日, Johor Baru, Malaysia

②5 吉岡諭, PMSM位置センサレス制御用未知入力オブザーバのインダクタンス変動に対するロバスト性, 電気学会半導体電力変換/産業電力電気応用合同研究会, 2008年11月21日, 宇都宮大学 (栃木県)

②6 新家惇, 同期リラクタンスモータのオンラインインダクタンス同定, 電気関係学会東海支部連合大会, 2008年9月19日, 愛知県立大学 (愛知県)

②7 山内太喜, IPMSM のセンサレス制御における速度推定の高応答化, 電気関係学会東海支部連合大会, 2008年9月19日, 愛知県立大学 (愛知県)

②8 大橋雄, 空間高調波を考慮した集中巻 IPMSM のインダクタンス同定, 電気関係学会東海支部連合大会, 2008年9月19日, 愛知県立大学 (愛知県)

②9 吉岡諭, 磁束オブザーバによる IPMSM センサレス制御のインダクタンス変動に対する感度解析, 電気関係学会東海支部連合大会, 2008年9月19日, 愛知県立大学 (愛知県)

③0 長谷川勝, 磁気飽和現象にロバストな同期モータの状態推定と位置センサレス制御, 第69回応用物理学会, 2008年9月4日, 中部大学 (愛知県)

③1 吉岡諭, 未知入力オブザーバによる IPMSM のインダクタンス変動にロバストなセンサレス制御法, 電気学会産業応用部門大会, 2008年8月28日, 高知市文化プラザ (高知県)

③2 新家惇, 適応電流制御系を用いた同期リラクタンスモータのオンラインインダクタンス同定, 電気学会産業応用部門大会, 2008年8月27日, 高知市文化プラザ (高知県)

③3 大橋雄, 適応電流制御系を用いた集中巻 IPMSM のインダクタンス同定, 電気学会産業応用部門大会, 2008年8月27日, 高知市文化プラザ (高知県)

③4 山内太喜, ロバスト適応則を用いた IPMSM 位置センサレス制御の低速運転性能改善, 電気学会産業応用部門大会, 2008年8月27日, 高知市文化プラザ (高知県)

③5 M. Hasegawa, Online Inductance Identification of Position Sensorless Controlled IPMSM in Consideration of Magnetic Saturation, ICEE, 2008年7月8日, 沖縄コンベンションセンター (沖縄)

③6 S. Yoshioka, Robustness Evaluation of IPMSM Sensorless Control to Magnetic Saturation Using Un-known Input Observer,

SPEEDAM, 2008年6月12日, Ischia (Italy)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 勝 (HASEGAWA MASARU)

中部大学・工学部・准教授

研究者番号: 70340198