

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：53801

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860061

研究課題名（和文） 新しい座標系を用いた永久磁石同期モータの位置センサレス制御

研究課題名（英文） New Reference Frame for Position Sensorless Controls of Permanent Magnet Synchronous Motors

研究代表者

大沼 巧 (OHNUMA TAKUMI)

沼津工業高等専門学校・電子制御工学科・講師

研究者番号：60613007

研究成果の概要（和文）：

永久磁石同期モータの制御に適した新しい座標系である“最大トルク制御座標系”の考え方を用いて、位置センサレス制御を高性能化する手法を検討し、以下の成果を得た。

1. 位置センサレス制御の適用可能な駆動域の拡大

(1) 位置の推定に用いるモータモデルを改良し、停止・低速時を含む全ての速度・トルク領域で位置センサレス制御が可能であることを示した。(2) 最大トルク制御座標系を用いてモータ電流に信号成分を印加し、従来から用いていた拡張誘起電圧方式による位置の推定法が適用可能であることを明らかにした。(3) また、同手法を用いることで、信号電流によるトルク外乱を与えることなく、位置の推定が可能であることを示した。

2. パラメータ変動と信号印加条件の関係

(1) 温度変化や磁気飽和現象によって、抵抗やインダクタンスなどのモータパラメータに変動があった場合に位置推定に生じる誤差を解析的に導出し、その性質を明らかにした。(2) 最大トルク制御座標系を用いてモータ電流に信号成分を加えることで、パラメータ変動による位置推定誤差を抑制できることを示した。(3) 印加する信号の周波数を数百 Hz 帯に設定したときに位置推定のゲインが向上することを実機実験により明らかにした。(4) 信号周波数を低周波化することにより、信号印加に伴う騒音の低減につながることを実験により示した。

速度制御や電流制御の総合的な性能評価については十分な検証ができず、今後の課題と考える。

研究成果の概要（英文）：

Position sensorless controls based on a new reference frame, which is called “maximum torque control reference frame”, were studied for high-performance drives of permanent magnet synchronous motors. The results were as follows,

1. Driving range extension of sensorless controls

(1) A new motor model for sensorless control was derived to extend the driving range including steady state and low-speeds. (2) Signal injection using the maximum torque control reference frame was applied to the position estimation with extended electromotive force methods. (3) The position estimation was realized by signal injection without torque ripples in f-axis of the maximum torque control frame.

2. Relation between parameter variation and the condition of signal injections

(1) Estimation errors caused by motor parameter errors due to temperature changes and magnetic saturations were calculated analytically and the characteristics of the errors were explained. (2) The position estimation errors were suppressed by injecting current signals in the f-axis of the maximum torque control reference frame. (3) Position estimation gain was improved by lower frequency signals such as a few hundred hertz. (4) The lower frequency signals were effective in decreasing sound level of noise due to signal currents.

Evaluations of the performance of speed control and current control have not attained yet.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

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：永久磁石同期モータ、ベクトル制御、位置センサレス制御、拡張誘起電圧モデル、パラメータ誤差、低速域、最大トルク制御座標系

1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギー・環境・資源問題を背景に、モータの高効率利用と適用分野の拡大が進行している。その中で、これまで産業用として広く用いられてきた誘導モータに比べて高効率化が可能な永久磁石同期モータが注目されている。そして、解析技術、制御技術、生産技術などの向上により、小型・高効率・高出力なモータを、用途に合わせて最適設計することが可能となり、用途指向性の高まりに応じて、様々な同期モータが研究・開発され、それに適した制御技術も進化が求められている。

中でも、永久磁石を回転子の内部に埋め込んだ構造を持つ埋込磁石同期モータは、様々な用途に合わせた高性能駆動が実現可能である。そして、小型・高効率・高出力などの利点を活かし、ハイブリッド自動車や電気自動車にも採用されている。埋込磁石同期モータを駆動するためには、回転子位置を検出し、回転磁界を作る固定子電流の振幅と位相を制御することが重要となる。回転子位置を検出する位置センサは、モータ軸に取り付けるため、高い信頼性や耐環境性が要求される。また、位置センサ自体のコストに加えて、配線に伴うコスト増や品質問題は、大きな制約となる。そこで、位置センサを用いずに、推定した位置を用いて制御をおこなう位置センサレス制御が研究され、実用化している。

2. 研究の目的

図1に示すように、埋込磁石同期モータの位置センサレス制御のために利用できる位置情報として、(1) 誘起電圧、(2) 突極性、(3) 磁気飽和特性が知られている。このうち(1) 誘起電圧は、大きさがモータの回転速度に比例するため、中高速域では有効な位置情報を提供できるが、低速域では振幅が低下するため、利用が困難となる。これに対し、(2) 突極性は回転子位置に応じたインダクタンスの変化として捉えることができ、停止時、低速域においても利用可能である。そして、始動時には(3) 磁気飽和特性を利用した磁極の推定を行う。このように、速度や運転状態によって利用できる位置情報が異なるため、現在の埋込磁石同期モータの位置センサレス制御は、複数の推定器をモータの特性や速度などの運転条件に応じて使い分けることにより実現している。

これに対し、本研究では拡張誘起電圧モデルを用いることにより、全速度域での位置推定を可能とする方法を検討した。拡張誘起電圧モデルは、位置センサレス制御に利用可能な位置情報のうち、(1) 誘起電圧と(2) 突極性を統合することができるモータの数学モデルである。これまでの研究により、以下の研究成果を得ていた。

- ・新しい座標系を用いたトルク外乱を発生させない信号電流印加法

低速域において位置推定を行うためには、外部からモータに信号を印加する必要がある。しかし、その信号電流によるトルク外乱が問題となり、低速域では拡張誘起電圧による位置推定が困難であった。そこで、最大トルク制御座標系の考え方を導入することにより、外部信号によるトルク外乱を発生させない信号電流印加法を提案した。

- ・拡張誘起電圧オブザーバによる位置センサレス制御の低速駆動域拡大



図1: 利用できる位置情報

信号電流を印加して得られる位置情報を、オブザーバの持つフィルタ特性を利用して抽出することにより、零速を含む全速度域における位置センサレス制御を実現した。

このように、これまでの研究成果により、拡張誘起電圧による位置センサレスが有効な運転領域を、零速を含む全速度域に拡大することが可能となった。しかしながら、低速かつ軽負荷領域においては、ある程度のトルク外乱を許容せざるを得ない領域が一部存在していた。この範囲が、従来の拡張誘起電圧モデルの限界であり、更なる性能向上には、モデル構造から見直す必要があった。

そこで、本研究では、新しい座標系を利用した信号電流印加法によって得られる位置情報を活かすために、位置推定に用いる数学モデルの検討に着手し、全速度・全負荷領域にわたるシームレスな位置センサレス制御を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

位置推定のためのモータモデルとして、従来の拡張誘起電圧モデルを用いた場合、新しい座標系による信号電流印加法を適用したとしても、低速軽負荷のある限定された運転領域においては、トルク外乱を発生させずに位置情報を得ることはできなかった。

このような運転領域における位置センサレス制御では、信号電流の印加方法と、それにより得られる位置情報の抽出方法の二つを、どのように組み合わせるかが重要である。そこで、本研究ではまず、これまで用いていた拡張誘起電圧モデルの数学的な変形により、位置情報の抽出しやすい新たなモータモデルを導出した。そして、モデルを変更したことによる推定特性の違いを解析的に調べ、シミュレーションによる原理の確認を行った。さらに、実験装置として埋込磁石同期モータの負荷試験ベンチを製作し、これを用いて実機評価を行った。

4. 研究成果

永久磁石同期モータの制御に適した新しい座標系である“最大トルク制御座標系”の考え方をを用いて、位置センサレス制御を高性能化する手法を検討し、以下の成果を得た。

(1) 位置センサレス制御の適用可能な駆動領域の拡大

モータの停止時・低速駆動時において位置推定を行うためには、モータ電流への信号重畳が必要となる。このとき、最大トルク制御座標系を用いることにより、信号電流によるトルク外乱を与えずに位置の情報を得ることができるが、従来から位置の推定に用いている拡張誘起電圧モデルでは、その位置情報を十分に取り出すことができなかった。そこで、この最大トルク制御座標系を用いた信号

重畳法に適した新たな拡張誘起電圧モデルを導出し、これを用いて全駆動領域における位置センサレス制御を実現する方法を提案した。本研究の成果を、平成23年度電気学会産業応用部門大会にて発表した。また、電気学会英文論文誌に投稿し掲載されている。

(2) パラメータ変動と信号印加条件の関係

温度変化や磁気飽和現象によって、抵抗やインダクタンスなどのモータパラメータに変動があった場合に位置推定に生じる誤差を解析的に導出し、その性質を明らかにした。解析の結果から、低速域において信号電流を重畳することによって、パラメータ誤差の影響が低減することを確認した。特に抵抗誤差に対しては、信号重畳の効果が顕著であることを示した。この解析結果は、今後の位置センサレス制御のロバスト性向上に繋がる重要な成果である。パラメータ誤差の影響は実機実験によっても確認しており、その結果の一例を図2に示した。

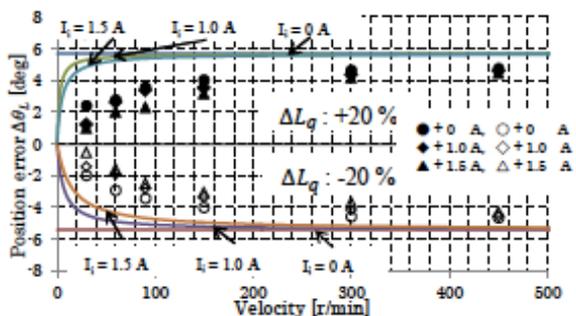


図2. インダクタンス誤差による位置推定誤差

次に、信号印加に基づくセンサレス制御法では、信号印加時の応答信号から得られるインダクタンスが位置情報を与えることとなるため、信号の振幅、周波数を様々に変更していき、そのときの回転子位置に対するインダクタンスの変化を実機実験により調べた。その結果、信号の振幅に対してインダクタンスの変化が最大になる点が存在すること、また周波数に対しては低周波域にその最大値が存在することを明らかにした。結果を図3

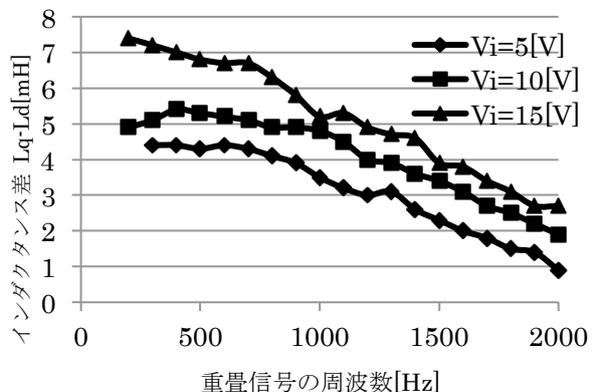


図3. 信号重畳時のインダクタンスの周波数依存性

に示す。縦軸は回転子位置に対するインダクタンスの変化の大きさを表しており、値が大きい程位置推定ゲインが高いことを表している。これによって最大トルク制御座標系を用いた信号印加法による低周波信号の有効性を確認することができた。また、信号周波数を低周波化することにより、信号印加に伴う騒音の低減につながることを実験により示した。これらの成果は、電気学会モータドライブ研究会、および平成24年度電気学会産業応用部門大会、平成25年度全国大会にて発表した。

速度制御や電流制御の総合的な性能評価については十分な検証ができず、今後の課題と考える。

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1件)

- ① Takumi Ohnuma, Shinji Doki, Shigeru Okuma: "Signal Injection Method without Torque Ripple Based on Maximum Torque Control Frame", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.8, 2013, pp.87-93
DOI:10.1002/tee.21795

[学会発表] (計7件)

- ① 大沼巧:「位置センサレス制御のための信号重畳に適した拡張誘起電圧モデルの提案」、電気学会産業応用部門大会、2011年9月8日、琉球大学(沖縄)
- ② 小俣克之、大沼巧:「位置センサレス制御に適した永久磁石同期モータの数学モデル」、富士山麓アカデミック&サイエンスフェア、2011年12月13日、ふじさんメッセ(静岡)
- ③ 塚本優、大沼巧:「位置センサレス制御のための信号重畳に適した拡張誘起電圧モデルにおける信号解析とパラメータ誤差」、電気学会モータドライブ/リニアドライブ合同研究会、2011年12月15日、静岡大学(浜松)
- ④ 塚本優、大沼巧:「位置センサレス制御のための信号重畳に適した拡張誘起電圧モデルにおける抵抗誤差による影響の解析」、電気学会モータドライブ/家電・民生合同研究会、2012年3月8日、電気学会(東京)
- ⑤ 馬飼野祐貴、大沼巧:「全域駆動可能な拡張誘起電圧モデルを用いた位置センサレス制御におけるパラメータ誤差の解析」、電気学会産業応用部門大会、2012年8月21日~2012年8月23日、千葉工業大学(千葉)
- ⑥ 久保田圭一、大沼巧:「永久磁石同期モ-

ータの位置センサレス制御」、富士山麓アカデミック&サイエンスフェア、2012年12月10日、ふじさんメッセ(静岡)

- ⑦ 馬飼野祐貴、伊藤彩花、大沼巧:「トルク脈動を発生させない信号重畳法を用いた位置センサレス制御におけるパラメータ誤差の影響」、電気学会全国大会、2013年3月20日~2013年3月22日、名古屋大学(愛知)

[図書] (計0件)

なし

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)

なし

- 取得状況 (計0件)

なし

[その他]

ホームページ等

沼津工業高等専門学校 電子制御工学科 大沼研究室

<http://www2.denshi.numazu-ct.ac.jp/~ohnuma/Top.html>

6. 研究組織

- (1)研究代表者

大沼 巧 (OHNUMA TAKUMI)

沼津工業高等専門学校・電子制御工学科・講師

研究者番号: 60613007

- (2)研究分担者

なし

- (3)連携研究者

なし