

称号及び氏名	博士（工学） 比田 一
学位授与の日付	平成 24 年 3 月 31 日
論文名	「最大トルク制御座標系に基づく回転子位置センサレス制御による永久磁石同期モータの高性能化」
論文審査委員	主査 森本 茂雄 副査 石亀 篤司 副査 小西 啓治

## 論文要旨

今日、モータはエアコンや冷蔵庫を始めとする家庭用電化製品、ロボットなどの産業機械や電気自動車などの駆動源等に至るまで様々な機器に搭載され、省エネルギー化のみならず、利便性や快適性の向上などを実現するキーコンポーネントと位置付けられている。なかでも回転子内部に磁石を埋め込んだ埋込磁石同期モータ (IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) は、磁気的な突極性を有するため、永久磁石によるマグネットトルクに加えて、リラクタンストルクが利用でき、高効率かつ可変速範囲が広いモータである。そのため、埋込磁石同期モータの高性能化に向けた研究が現在も盛んに行われている。

永久磁石同期モータを高性能に制御するためには、電流ベクトルを適切に制御することが必要であり、回転子に同期した座標である  $d$ - $q$  座標上でのモータ駆動システムが一般的に用いられている。この  $d$ - $q$  座標系への座標変換に必要な回転子位置情報を得るため、一般的には回転子軸上に設けられたエンコーダやホール素子などの回転子位置センサが用いられる。しかし、回転子位置センサの設置はモータのコスト、体格や耐環境性に不利となることから、低コスト化、小型化に向けて、回転子位置情報を取得する回転子位置センサを用いない制御、いわゆる回転子位置センサレス制御の検討が行われている。この回転子位置センサレス制御では、回転子位置推定の演算に正確なモータパラメータの把握が必要である。また、リラクタンストルクを利用し、同一電流でトルクが最大となる電流位相で運転する最大トルク制御法を行う場合の  $d$  軸電流計算にもモータパラメータが必要となる。しかしながら、どちらの計算式にもインダクタンスなどの磁気飽和の影響を受けやすいモータパラメータが含まれており、磁気飽和の影響も含めた正確なパラメータが得られない場合、制御性能の低下につながってしまう。

一方で、家庭用電化機器への永久磁石同期モータの普及及び生活スタイルの多様性により、

高効率化に加え、低振動・低騒音化の要求も多い。近年では、モータ効率の向上と製造コストの削減のため、従来、電機子コアに分布させて巻いていた電機子巻線（分布巻）を集中させて巻くこと（集中巻）が多くなってきている。しかし、集中巻の場合、電機子巻線を鎖交する磁束分布は正弦波状では無くなり、構造上トルクリプルが生じやすく、このトルクリプルがモータの振動と騒音の原因となる。

以上に述べた課題や問題点を考慮し、本論文では、回転子位置センサを用いない永久磁石同期モータの駆動システムにおいて、磁気飽和によるモータパラメータ変動に対して、ロバストなモータ駆動システムを実現するための方法を提案する。本論文で提案する最大トルク制御座標系（ $dm$ - $qm$  座標系）に基づく制御手法は、従来（ $d$ - $q$  座標系）の制御方式よりも磁気飽和の影響によるモータパラメータ変動に対してロバストな制御を実現できる。回転子位置及び速度の推定に用いるパラメータ  $L_{qm}$  が、従来用いていたパラメータ  $L_q$  よりも磁気飽和の影響を受けにくく、 $L_{qm}$  を一定値で近似した場合でも良好な最大トルク制御が可能となる。そのため、従来必要であった  $d$  軸電流の計算やそれに代わるテーブル参照が不要となる実用的な方式である。また、提案する最大トルク制御座標系（ $dm$ - $qm$  座標系）に基づく回転子位置センサレス制御手法では、 $L_q$  のパラメータ誤差に対する定常的な回転子位置推定誤差が、 $d$ - $q$  座標系に基づく回転子位置センサレス制御手法よりも小さくでき、高速運転領域における電流制御系の制御安定性の向上が図れる。さらに、低振動・低騒音化に向け、トルクリプルを低減するための永久磁石同期モータの空間高調波を考慮した瞬時トルク推定方法の提案を行う。本手法は、リアルタイムに計算が行え、トルクの変動分を含めたトルク推定が可能であることが特徴である。最後に、瞬時トルク推定方法を用いた最大トルク制御座標系に基づく回転子位置センサレス制御におけるトルクリプル低減手法を提案する。

本論文の構成は次の通りである。

第 1 章では、研究の背景や目的とともに、本論文の概要について述べる。

第 2 章では、回転子位置と速度のセンサレス制御システムにおいて、磁気飽和によるモータパラメータ変動に対してロバストな制御手法について提案する。提案する手法は、最大トルク制御時の電流ベクトルと一致する軸を  $qm$  軸とする最大トルク制御座標系（ $dm$ - $qm$  座標系）を新たに定義し、この座標系を直接推定する手法である。この最大トルク制御座標系に基づく拡張誘起電圧モデルの導出および最大トルク制御座標系を推定するために用いる推定用パラメータ  $L_{qm}$  の導出を行い、推定用パラメータの磁気飽和の影響に対するロバスト性について述べる。さらに、推定用パラメータを一定値で近似した場合でも良好な最大トルク制御が可能であることを示す。

第 3 章では、最大トルク制御座標系に基づく回転子位置センサレス制御手法において、モータパラメータ誤差で生じる回転子位置推定誤差に対する電流制御系の安定性について検討する。安定性の検討に必要となるモータパラメータ誤差に対する回転子位置推定誤差への影響に関して、 $d$ - $q$  座標系と最大トルク制御座標系（ $dm$ - $qm$  座標系）における違いについて検討し、最大トルク制御座標系に基づく回転子位置センサレス制御手法では、モータパラメータ誤差で生じる回転子位置推定誤差が小さくできることを示す。次に、 $d$ - $q$  座標系における軸誤差を考慮した電流制御系の閉ループ伝達関数について説明し、最大トルク制御座標系における軸誤差を考慮した電流制御系の閉ループ伝達関数を導出する。そして、モータパラメータ誤差によって発生した回転子位置推定誤差に対する電流制御系の極配置について調査し、最大トルク制御座標系に基づく回転子位置センサレス制御手法の方が、回転子位置推定誤差が生じた場合の極の変化が小さく、安定であることを示す。

第 4 章では、モータ制御によるトルクリプル低減に向けて、正確なモータ瞬時トルクを推定するために、永久磁石同期モータの空間高調波を考慮した新しいトルク推定方法について提案する。回転子回転角に対する空間高調波の変化に起因するトルクリプル成分を考慮したトルク推定式の導出に関して、磁気随伴エネルギーを用いて検討を行う。トルク制御系を有する電流制御方式において、トルクリプルに含まれる周波数成分が異なる 2 つの IPMSM に

対して、トルク推定特性及びトルクリプル低減効果について、シミュレーション及び実機実験の両方から提案法の有効性を確認する。本手法は、リアルタイムに計算が行え、トルクの変動分を含めたトルク推定が可能であることが特徴である。

第5章では、第4章で提案した瞬時トルク推定方法の最大トルク制御座標系に基づく回転子位置センサレス制御システムへの適用について検討し、最大トルク制御座標系に基づく回転子位置センサレス制御下でのトルクリプル低減手法を提案する。まず、最大トルク制御座標系に基づく回転子位置センサレス制御におけるトルクリプルについて説明し、トルク制御系を有しない最大トルク制御座標系に基づく回転子位置センサレス制御への瞬時トルク推定方法の適用方法について述べる。次に、瞬時トルク推定方法で推定したトルクから算出したトルクリプルを補償する電流成分を最大トルク制御座標系に基づく回転子位置センサレス制御に適用することにより、トルクリプル低減が実現できることについてシミュレーション及び実機実験の両方から有効性を確認する。

第6章では、結論として以上の章の総括を行う。

## 審査結果の要旨

本論文は、永久磁石同期モータ駆動システムの高性能のために、モータパラメータ変動に対してロバストな回転子位置センサレス制御およびトルクリプル低減法について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 最大トルク制御座標系に基づく拡張誘起電圧モデルを用いた回転子位置センサレス制御システムを提案し、磁気飽和によるモータパラメータ変動に対してロバストであり、良好な最大トルク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に基づく回転子位置センサレス制御手法において、モータパラメータ誤差で生じる回転子位置推定誤差に対する電流制御系の安定性について検討し、従来の  $d$ - $q$  座標系に基づく回転子位置センサレス制御手法に比べてモータパラメータ誤差の影響が少なく、より安定であることを示した。
- (3) 永久磁石同期モータの空間高調波を考慮し、リアルタイムにトルクの変動分を推定可能な瞬時トルク推定方法を提案し、シミュレーションおよび実機実験により、提案手法によりトルクリプル成分を含めた瞬時トルクが推定できること、推定トルクをトルク制御に用いることで、トルクリプルに起因する振動加速度が抑制できることを示した。
- (4) 本論文で提案した瞬時トルク推定方法を最大トルク制御座標系に基づく回転子位置センサレス制御システムに適用する手法を提案し、トルクリプルに起因する振動加速度が抑制できることを実機実験により示した。

以上の諸成果は、永久磁石同期モータの高効率運転をモータパラメータが不要で計算負荷が小さいセンサレス制御方式で実現するものであり、永久磁石同期モータ駆動システムの小型化、低コスト化、信頼性の向上に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。

学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。