

報告番号	※ 甲 第 10603 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 新しい数学モデルを用いた永久磁石同期モータの位置センサレス制御系のロバスト化に関する研究

氏 名 松本 純

論 文 内 容 の 要 旨

近年、地球環境保全・エネルギー消費量抑制の観点から動力源の電動化が進んでいる。当初は直流モータによる電動化が進められていたが、パワーエレクトロニクス技術・プロセッサ性能・制御技術の向上により次第に交流モータが可変速駆動の主流となっていった。中でも永久磁石同期モータ (PMSM) は従来の交流モータである誘導モータに比べて小形化・高出力化・高効率化が可能といった特徴から、家電分野・産業分野を中心に普及してきた。このような特徴を有する PMSM ではあるが、このモータにおける高効率駆動の実現には、モータ単体の議論だけでは不十分であり、電力変換器および制御技術を組み合わせたモータ駆動システムとして議論する必要がある。この内、PMSM の駆動システムにおける制御への要求は大きく分けて以下の2点がある。

- (1) 電流に比例して瞬時トルク制御が可能な直流モータに準じた優れたトルク制御の実現
- (2) 高効率化や駆動範囲の拡大等、目的の駆動を達成する電流指令値の生成

(1) の達成には一般的にベクトル制御が用いられる。ベクトル制御は、交流電流を振幅と位相の2つの成分、すなわち、電流ベクトルとして集約することにより、交流モータの瞬時トルク制御を実現する手法である。ただし、この制御法の実装には位置センサが必要となる。しかしながら、位置センサはモータの軸に直接取り付け必要があるため、この設置はモータ駆動システムの大形化・耐環境性の低下に繋がる。このため、位置センサを用いず、推定した値を用いて制御を行う位置センサレスベクトル制御 (以下、位置センサレス制御とする) が研究され、実用化されてきた。

(2) の達成には最大トルク/電流制御および弱め磁束制御が用いられる。最大トルク/電流制御は同一トルクを発生する電流ベクトルのうち、その振幅が最も小さくなる電流位相を電流指令値として採用する手法であり、モータ損失のうち最も大きいとされる銅損の最小化を目的とした高効率制御法である。これに対して、弱め磁束制御は駆動領域拡大を目的とした制御法である。PMSM は回転子に永久磁石を有するため、回転速度に応じた誘起電圧を発生する。この誘起電圧と電源電圧が釣り合うとモータに電流を流すことができなくなるた

め、この速度が最高速度となる。ただし、永久磁石の磁束を弱める方向に磁束を生じさせれば、発生する誘起電圧が抑えられるため、その分、最高速度は上昇する。これを実現する制御法が弱め磁束制御であり、定出力領域の駆動には必須となる制御法である。

一方、近年ではモータに対する省エネルギー化・高トルク化・高出力化・低コスト化といった要求が高まっている。材料・設計・生産技術の向上により、様々な要求仕様を満たす高性能なPMSMが手に入るようになったため、PMSMの適用範囲は自動車分野をはじめ急速に広がっていった。高性能なPMSMは従来のものに比べて高効率化・高トルク化・高出力化・小形化等を実現したが、このようなモータではその性能向上のために材料特性の限界を突き詰めるような設計となるため、適切に制御しなければ、本来の性能を引き出すことが難しい、制御性の点で課題を残すモータとなった。このため、近年ではPMSMの駆動システムにおいて、制御は非常に重要な役割を担うことになった。

高性能なPMSMにおいて特に問題視されているものの一つに磁気飽和現象に起因するインダクタンス（モータパラメータ）変動がある。位置センサレス制御、最大トルク/電流制御および弱め磁束制御はモータモデルに立脚しているため、高精度なモータパラメータが必要とされる。したがって、制御器に用いるパラメータはその変動に対して注意を払う必要がある、これを怠ると制御性能の劣化に繋がる。このため、これまでも事前にオフライン測定する手法、適応制御理論を用いたパラメータを補正する手法等による対策がなされてきた。しかしながら、オフライン測定に基づく手法では測定時との環境変化を考慮できないため、設定誤差の発生は免れず、また適応制御に基づく手法では制御系の大域的な安定性を確保することが難しく、想定外のパラメータ変動およびモデル化誤差に対して制御系が不安定化することが知られている。また、位置センサレス制御では位置情報は推定により得ているため、根本的に位置推定誤差の発生を回避することができない。このため、これらの手法により、精度よくパラメータが得られたとしても、それを適切に参照できるといった保証はない。したがって、位置センサレス制御系における磁気飽和現象への対策としてはロバスト性の向上が必要であると言える。

これに対し、最大トルク/電流制御時の電流ベクトルと一致する軸（これを最大トルク制御軸と定義）を推定し、この軸に基づく位置センサレス制御を行う手法が提案されている。この手法は位置センサレス制御時の最大トルク/電流制御に限れば位置推定および電流位相設計を一括して実現するものと捉えることができる。すなわち、銅損を最小化する電流位相を直接的に推定するため、従来法では必要であった電流指令値の生成が不要となる。また、最大トルク制御軸推定に用いる仮想インダクタンスは磁気飽和現象に対して高いロバスト性を有することが実験的に示されている。しかしながら、仮想インダクタンスの物理的解釈は示されていないため、その具体的な設計法は明らかになっていない。このため、最大トルク制御軸に基づく手法により、結果的に最大トルク/電流制御の簡易化、ロバスト化は図れるものの、数学モデルが不明瞭であるがために、弱め磁束制御および電流制御性能に対する検討は難しい。

一方、位置センサレス制御を行う上では位置推定性能向上が最大の課題となる。したがって、ロバスト性の高い数学モデルが得られても、これに基づく位置推定器の性能が低ければ、位置センサレス制御系の性能は向上しない。このことは既存研究においても指摘されており、その結果、様々な位置推定器およびその設計法が検討されてきた。中でも、同次元オブ

ザーバによる位置推定法は設計の自由度の高さから様々な手法が提案されてきた。同次元オブザーバにおいてはシステムの安定性および外乱に対するロバスト性はオブザーバゲインによって定まるため、ゲイン設計は非常に重要な課題となる。しかしながら、その目的に応じた設計法は未だ検討段階にあると言える。

既提案の手法はいずれも位置センサレス制御時のロバスト性に対する感度解析およびロバスト設計はなされていない。同次元オブザーバにおいて、精度の良いパラメータを用いても避けることのできない課題として、速度推定誤差に起因する位置推定性能の劣化がある。位置センサレス制御では位置情報と同様に、速度情報は推定により得ているため、可変速時に生じる速度推定遅れ、または、パラメータミスマッチの影響に起因する速度推定誤差の発生は回避することができない。したがって、速度推定誤差に対するロバスト性向上はオブザーバおよび位置センサレス制御系の安定性向上へ繋がる、重要な課題であると言える。

これらを踏まえ、本研究では高性能化と引き換えに制御性の点で課題を残す PMSM においてもその性能を引き出せる位置センサレス制御系の確立を目指す。具体的には、近年の PMSM の高性能化と引き換えに一般化しつつある磁気飽和現象に起因するインダクタンス変動への対策、位置センサレス制御における最大の課題である位置推定性能向上に向けて、新たな位置センサレス制御法を提案し、性能向上を実現する。本研究では以下の3つを提案する。

1. 磁気飽和現象に対してロバストな位置推定を実現する PMSM の新しい数学モデル
2. 提案モデルに基づく磁気飽和現象に対してロバストな位置センサレス制御法
3. 提案モデルに基づく同次元オブザーバを用いた速度推定誤差に対してロバストな位置センサレス制御法

1. では PMSM の新しい数学モデルを導出することで、磁気飽和現象に対する位置推定のロバスト化を図る。まず、従来の PMSM の数学モデルでは磁気飽和現象への対応が困難であることから、ロバスト性を向上させるため、PMSM の物理的性質から価値のある新しい数学モデルを導出し、このモデルの特性について最大トルク/電流制御の観点から述べる。この結果、提案モデルを用いることで磁気飽和現象にロバストな最大トルク/電流制御を実現できる可能性があることを示す。

2. では 1. の結果に基づいて、位置センサレス制御系全体を磁気飽和現象に対してロバスト化する。まず、提案モデルを用いた、磁気飽和現象に対してロバストな最大トルク/電流制御を位置センサレスで実現する手法を提案する。さらに、提案モデルのもつ磁気飽和現象に対するロバスト性を活かすべく、弱め磁束制御および非干渉化制御を提案モデルに適した形で実現する手法を提案する。これらにより、位置センサレス制御系全体の性能改善を図る。本論文では実機実験により、これらの有効性を示す。

3. では提案する位置センサレス制御系の根底となる位置推定法を位置センサレス制御時には避けることのできない速度推定誤差に対してロバスト化する。オブザーバゲインの設計問題を極配置問題に帰着させ、ロバスト制御理論では代表的な H_∞ 制御に基づいて、速度推定誤差から位置推定誤差までの伝達関数の H_∞ ノルムを最小化する極配置指針を提案する。本論文では実機実験により、その有効性を示す。

本提案は従来法の基礎となっていた数学モデルを見直し、磁気飽和現象に対してロバストな新しい数学モデルを導出したこと、このモデルに基づいて制御系を再構築したことに新規性がある。提案モデルを用いることで、磁気飽和現象および速度推定誤差に対してロバストな制御系の構築が可能となり、今後の一層の高性能化が進むであろう PMSM の性能を発揮させることに貢献するものである。