

称号及び氏名	博士（工学） 井上 征則
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 31 日
論文名	「回転子位置センサレス駆動される 永久磁石同期モータの高性能制御」
論文審査委員	主査 森本 茂雄 副査 川本 俊治 副査 小西 啓治

## 論文要旨

回転子に永久磁石を使用する永久磁石同期モータは、高効率で可変速範囲の広いモータ駆動システムを実現できる。そのため、エアコンやハイブリッド自動車をはじめとした製品で幅広く使用されており、省エネルギー化や低コスト化の要求がある一方で、高性能・高機能化や信頼性の向上なども求められるため、現在も研究が盛んに行われている。低コスト化のために、回転子の位置や速度を検出するセンサ、電流センサなど、各種センサを極力除去する傾向にある。同期モータでは、原理上必要となる回転子位置情報を用いてモータ制御を行うが、位置センサを必要としない制御（回転子位置センサレス制御）が研究されており、既に実用化もされている。回転子位置センサレス制御では、停止状態から高速領域に渡る幅広い運転速度範囲や、モータパラメータ変動に対するロバスト性といった制御特性を簡潔な制御則で実現できることが求められている。

位置センサレス制御に限らず、永久磁石同期モータの駆動システムでは、回転子に同期した座標（ $d$ - $q$  座標）上での電流制御方式を用いることが一般的であるが、磁束の制御によりモータを駆動することも可能である。その一つとして、直接トルク制御があり、誘導モータの制御のために提案された方式であるが、モータの種類を問わず適用できるため同期モータへの適用も行われている。この制御法では、回転子位置情報が不要であるため、回転子位置センサレス制御が行われる。しかし、電流制御方式と比較して、非線形要素が多く、制御システムの解析的な検討が困難である。また、高効率運転や広範囲可変速運転のための制御則は、 $d$ - $q$  座標上で理論展開が行われてきた。このため、永久磁石同期モータには直接トルク

制御が積極的に利用されていなかった。

家庭用電化機器での永久磁石同期モータの普及により、高効率化に加え、低振動・低騒音化などの要求も多い。近年では、モータ効率の向上と製造コストの削減のため、電機子巻線を従来用いられていた分布巻ではなく、集中巻にすることが多い。しかし、集中巻の電機子巻線の場合、電機子に鎖交する磁束分布は正弦波状では無いことから、トルクリプルが生じやすく、モータの振動と騒音が大きいという問題がある。

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設置しない永久磁石同期モータ駆動システムにおいて、パラメータ変動にロバストであり、可変速範囲の広いモータ駆動システムを実現するための方法を提案する。d,q 軸上の電流制御方式に関する検討では、回転子位置センサレス制御システムにおいて、従来では困難であった低速度領域での運転を可能にする方法を提案する。これにより、運転速度範囲を拡大でき、負荷や環境の変化に起因するパラメータ変動に影響されない運転が実現できる。直接トルク制御に関する検討では、これまでにトルク制御系に関する詳細な解析が行われていなかったため、トルク制御系のモデリングを行い、制御器のゲイン設計法をはじめとした制御系の安定化と特性改善の方法について提案する。そして、高効率運転と広範囲可変速運転を実現するために、直接トルク制御に適したトルクと磁束の制御法を提案する。提案法は簡潔な制御則であり、d-q 座標上でのモータモデルを使用しないため、磁石磁束やインダクタンスといったモータパラメータが不要である。また、直接トルク制御の特徴を生かしたモータ駆動システムの応用として、永久磁石とインダクタンス分布に存在する高調波に起因するトルクリプルを低減できる制御法に関する検討と、永久磁石同期発電機を用いた風力発電システムの提案を行う。

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、回転子速度と位置のセンサレス制御システムにおいて、運転速度範囲の拡大や位置推定精度の向上のための方法について検討する。拡張誘起電圧を用いた回転子位置推定法について、モータパラメータの変動とインバータで生じる電圧誤差が推定精度に与える影響を明らかにする。この結果を基にして、推定精度の向上により運転速度範囲を拡大するための方法を提案する。一つはインバータで生じる電圧誤差を補償することであり、電圧補償により、位置推定精度が向上することを示す。もう一つは最小二乗法によるオンラインパラメータ同定を用いて、運転中のモータパラメータを得る方法である。位置推定誤差が生じる推定座標上において、パラメータを正確に取得できる同定モデルを明らかに示し、オンラインパラメータ同定により位置推定精度が向上できることを実機実験により確認する。位置推定精度の向上により低速での運転を可能にし、長時間運転時にも安定した特性が得られることを示す。

第 3 章では、トルク制御に比例・積分制御器を使用する直接トルク制御を用いたモータ駆動システムにおいて、制御器のゲインとトルク応答特性の関係に注目して、トルク制御特性について検討する。所望の制御特性を得るためには制御器のゲイン調整が必要であるが、これまで、シミュレーションや実験による試行錯誤的な方法で制御器のゲインが設定されており、解析的な検討が行われていなかった。はじめに、トルク制御系の伝達関数を新たに導出し、これを基にして制御器のゲインとトルク応答特性との関係を明らかにする。そして、トルク制御系の減衰係数と固有角周波数を決めると制御器のゲインを算出でき、異なるパラメータのモータに対しても同等のトルク制御特性を実現できることを示す。さらに、トルク制御系の解析結果を基にして、トルク応答特性の改善法と制御器のアンチwindアップ手法を提案する。

第 4 章では、直接トルク制御による永久磁石同期モータ駆動システムにおける広範囲可変速運転のためのトルクと磁束の制御法を提案する。永久磁石同期モータを高効率かつ、幅広い速度範囲で運転するために、銅損を最小化する最大トルク／電流制御、鉄損を最小化する最大トルク／磁束制御、高速領域での運転を可能にする弱め磁束制御が主に用いられる。ま

た、モータやインバータの容量に応じた電流制限が必要となる。これまで、これらの制御則は  $d, q$  軸上での電流制御方式への適用を想定していたため、 $d, q$  軸電流の関係で与えられることが多かった。直接トルク制御での利用に適した制御則として、電機子鎖交磁束を用いた関係式を導出し、計算が簡潔であり、モータパラメータの変動による影響を受けにくいことを明らかにする。さらに、回転子に永久磁石を使用しないリラクタンスモータを制御する場合に適用できる最大トルク／電流制御と最大トルク／磁束制御の新しい方法を提案する。

第 5 章では、磁石磁束とインダクタンス分布の両方に高調波成分が存在する永久磁石同期モータを駆動する場合において、トルクリプル低減に適した制御法について検討を行う。これまで、永久磁石による電機子鎖交磁束分布に存在する高調波によって生じるトルクリプルに関する検討が多く、インダクタンス分布の高調波成分によるトルクリプルの低減法に関する検討が無かった。トルク制御系を構成したモータ駆動システムにおけるトルクリプル低減効果について検討を行い、トルクリプル低減に有効な制御法を明らかにする。回転速度の変化がトルクリプル低減効果に及ぼす影響についても考察する。高調波を考慮した永久磁石同期モータの駆動システムをシミュレーションモデルにより構築し、瞬時トルク特性をはじめとした各種特性により、効果を評価する。

第 6 章では、永久磁石同期発電機と直接トルク制御を組み合わせた可変速の風力発電システムを提案する。永久磁石同期発電機では、永久磁石同期モータと同様に、回転子位置の情報が原理上必要となるが、直接トルク制御を用いることにより、位置センサレス化を達成する。また、トルク制御を基にした最大電力点追従制御を適用することにより、風速センサレス化による低コスト化と信頼性向上が期待できる。任意の風速パターンでの実験が可能な風車エミュレータを用いて、永久磁石同期発電機に機械エネルギーを与えることにより得られる発電特性について検討を行う。回転子位置センサレス、かつ風速センサレスの提案システムにおいても、風速に応じた発電電力が得られ、風力エネルギーの有効利用が可能であることを確認する。また、発電機の電機子抵抗は温度によって値が変化するため、抵抗値の変化が発電特性に及ぼす影響についても考察を行う。

第 7 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、回転子位置センサを使用しない永久磁石同期モータ駆動システムにおいて、パラメータ変動にロバストで、可変速範囲の広いモータ駆動システムを実現する制御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) 拡張誘起電圧を用いた回転子位置推定法について、モータパラメータの変動とインバータで生じる電圧誤差が推定精度に与える影響を明らかにした。この結果を基にして、インバータで生じる電圧誤差を補償する方法と運転中に変化するモータパラメータを最小二乗法によるオンライン同定で得る方法を提案し、実機実験より位置推定精度が向上できることや低速域での運転が可能であることなど提案手法の有効性を示した。
- (2) トルク制御に比例・積分制御器を使用する直接トルク制御を用いたモータ駆動システムにおいて、トルク制御系の線形化モデルを新たに導出し、これを基にして制御器のゲイン設計法を明らかにした。さらに、ゲインスケジューリングによるトルク応答特性の改善法と制御器のアンチwindアップ手法を提案し、実機実験でその有効性を示した。
- (3) 直接トルク制御による永久磁石同期モータ駆動システムにおける広範囲可変速運転を実現するために、電機子鎖交磁束を用いた関係式を導出し、計算が簡潔で、モータパラメータの変動にロバストな制御則を明らかにした。さらに、回転子に永久磁石を使用しないリラクタンسモータを制御する場合に適用できる最大トルク／電流制御と最大トルク／磁束制御の新しい方法を提案し、実験でその有効性を示した。
- (4) 磁石磁束とインダクタンス分布に高調波が存在する永久磁石同期モータの駆動に直接トルク制御を用いることで、簡潔な制御系の構成で大きなトルクリプル低減効果が得られることを明らかにした。
- (5) 埋込磁石同期発電機を直接トルク制御で制御する風力発電システムを提案し、速度・位置センサレス発電機制御と推定速度を用いた風速センサレス最大電力点追従制御が可能であることを示した。

以上の研究成果は、回転子位置センサレス制御される永久磁石同期モータ駆動システムの高性能化を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、信頼性の向上および応用範囲の拡大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。