

称号及び氏名	博士（工学） 篠原 篤志
学位授与の日付	平成 29 年 3 月 31 日
論文名	「直接トルク制御を用いた IPMSM 駆動システムにおける 最大トルク／電流制御に関する研究」
論文審査委員	主査 森本 茂雄 副査 森澤 和子 副査 小西 啓治 副査 井上 征則

## 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（PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor）はモータの中でも出力密度や効率がよく、小型化、高出力化、高効率化の要求を満足するモータとして様々な分野で普及が進んでいる。磁気的な突極性を有しリラクタンストルクが利用できる埋込磁石同期モータ（IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor）は、PMSM の中でも高効率かつ可変速範囲が広いモータであるため、様々な製品で幅広く使用されている。IPMSM の更なる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等も求められるため、現在も研究が盛んに行われている。

IPMSM の高効率化や高出力化を実現する制御法の 1 つに、一定電流に対してトルクを最大にする最大トルク／電流（MTPA: Maximum Torque Per Ampere）制御がある。これは出力に対する銅損を最小にすることを目的とする制御法である。IPMSM において MTPA 制御を達成しようとする場合、トルクと電流との関係が非線形になる。特に今日では、IPMSM の出力密度の向上を目的として IPMSM に用いられている電磁鋼板の磁束密度を磁気飽和領域まで大きくするため、磁束と電流との関係が非線形になり、インダクタンスが運転中に変化する。インダクタンスの変化を電流に起因するものと見なすと、これまで用いられてきた高効率制御法をそのまま適用するのは必ずしも適切ではない。そのためインダクタンスの変化にも対応できる制御法が必要とされ、広く研究されている。

交流モータの制御方式に着目すると、電機子電流を正弦波状に制御する電流制御方式が一般的であり、モータの回転子磁束に同期して回転する座標系（d-q 座標系）を用いると正弦波交流を直流量として扱えるため、MTPA 制御をはじめとする様々な制御法が d-q 座標系の電

流制御方式で提案されてきた。一方で、モータの電機子鎖交磁束と瞬時トルクがそれぞれの目標値に対して一定の範囲内に収まるように電圧を調整してモータを制御する方式もある。この制御方式はトルクを制御量として直接的に制御するため、直接トルク制御 (DTC: Direct Torque Control) と呼ばれる。DTC は従来の d-q 座標系ではなく二相静止座標系で操作量の演算を行えるため、電流制御方式と比較して制御における演算量が少なく、また回転子位置情報の不要な制御方式であることから、PMSM の制御方式としても研究されている。

電機子鎖交磁束の測定は困難なため、DTC では電機子鎖交磁束を推定する必要がある。電機子鎖交磁束は原理的に電圧の積分により計算できるが、積分器の持つ初期値誤差や電圧に含まれる直流成分によるドリフトの問題が顕著になる。そのため DTC 特有の課題に電機子鎖交磁束の正確な推定がある。この背景のもと、これまでに様々な電機子鎖交磁束推定法が提案されてきたが、推定法同士の比較を行った文献は少ない。また積分値が小さくなる低速域での推定精度向上を課題として取り扱ったものが多いが、電機子鎖交磁束推定法を指令値への影響の観点から取り扱った文献はほとんど無い。

加えて DTC を用いた IPMSM 駆動システムにおいて高効率制御を実現しようとする場合、DTC は制御量としてトルクと電機子鎖交磁束を用いており、それらが電圧や電流に対し非線形性を持つため、電流制御方式と比べて解析的な検討が困難である。DTC はトルクと電機子鎖交磁束を指令値とするため、その電圧や電流に対する非線形性から、これまで電流制御方式において提案されてきた MTPA 制御などの様々な高効率制御則をそのまま適用できない。そのため参照テーブルがしばしば用いられるが、モータ毎に参照テーブルを設計しなければならないのが問題である。モータ駆動システムの汎用化や堅牢性を考えるとモータ毎に持つ定数は少ない方が良く、モータにより特性が大きく変わる参照テーブルを用いるのは得策ではない。加えて電流制御方式との対比として見ると、現在用いられている磁石磁束やインダクタンスの値をそのまま用いて指令値を計算できる方が良い。

以上に述べた課題から、本論文では DTC を用いた IPMSM 駆動システムにおいて MTPA 制御を実現する複数の方法について検討する。モータ制御の分野では広く用いられている数学モデルを用いて指令値の関係を検討するのが一般的であるため、本論文では DTC を用いた IPMSM 駆動システムにおいて数学モデルを用いた高効率制御の検討を行うための前提条件を示し、その上で数学モデルを用いて MTPA 制御を実現する指令磁束の計算方法を検討する。またその前提条件が成り立たない場合でも局所探索法により簡易的に MTPA 制御を実現する方法についても検討する。

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共に、本論文の概要について述べる。

第 2 章では、直接トルク制御の電機子鎖交磁束推定法に着目し、簡便な方法として広く用いられる不完全積分器を利用した場合の推定誤差および最適指令磁束の変動について検討し、またこれまで提案されてきた電機子鎖交磁束推定法のうち、PWM (Pulse-width modulation) 制御を用いた DTC による PMSM 駆動システムに適用可能なものをまとめる。PWM 制御によりインバータに入力する電圧指令値を連続量とするシステムでは電機子鎖交磁束の高精度な推定が必要であり、また PMSM 駆動システムでは電機子鎖交磁束の初期情報を零に固定できないという観点から、現状の電機子鎖交磁束推定法の中で高精度な推定情報を用いる DTC システムに耐えうるものについて、推定法の構造およびシミュレーション、実機実験結果の比較により検討する。電機子鎖交磁束の推定系が非線形系であり、必要なモータパラメータの数が少ないという観点から、推定磁束と誘起電圧との内積を用いて推定磁束を補正する方法が最も適していることを示す。

第 3 章では、電流制御方式において確立された MTPA 制御の関係式を用いて、直接トルク制御の指令値であるトルクと電機子鎖交磁束との関係を定式化し、その関係式に 4 次方程式の代数解を用いることで MTPA 制御が達成できることを示す。この定式化により従来用いられてきた参照テーブルが不要になり、モータ毎の参照テーブルの設計が不要になる。またこ

の方法では中間変数から電流を推定できるため、インダクタンスや磁石磁束が電流の関数としてモデル化されていれば反復計算を行うことでそれらの推定が可能になる。本論文では一例として、磁気飽和により最も変化しやすい  $q$  軸インダクタンスを電流の関数でモデル化した場合について示す。正確なモータパラメータが得られていれば本章で提案する定式化を用いることで MTPA 制御が実現できることを、シミュレーションおよび実機実験により示す。

第 4 章では、4 次方程式が代数解を持つことを利用し、電機子鎖交磁束に同期した座標系を用いて MTPA 制御が実現できることを示す。電機子鎖交磁束に同期した座標系 (M-T 座標系) では一定トルク条件下で T 軸電流と電機子鎖交磁束の大きさが反比例になることから、トルク一定に対する MTPA 制御の原義を用いて指令値の関係式を導く。この時 M 軸電流と電機子鎖交磁束との関係を線形近似すれば第 3 章と同様の 4 次方程式に帰着できるため、代数解を利用できる。またこの方法では磁気飽和による変化が最も顕著な  $q$  軸インダクタンスの値を他のパラメータと運転状態で代用できるため、 $q$  軸インダクタンスの変動に不感である。第 3 章で提案した手法と比較してより良い運転特性が得られることをシミュレーションおよび実機実験により示す。

第 5 章では電機子電流を用いた局所探索法により MTPA 制御が達成できることを示す。指令磁束の生成に局所探索法を用いることで、第 2 章で扱った磁束推定誤差による最適指令値の変動や、第 3 章や第 4 章で提案した手法では考慮しきれない誤差が存在する状況下でも MTPA 制御が達成できる。局所探索法を用いた MTPA 制御の方法について示し、様々な誤差が存在する状況下でも本章で提案する手法により MTPA 制御が達成できることを、シミュレーションおよび実機実験により示す。

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、直接トルク制御を用いた埋込磁石同期モータ (IPMSM) 駆動システムにおいて、高効率化や高出力化を実現する最大トルク/電流 (MTPA) 制御について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 電流制御方式において確立されている MTPA 制御の関係式を用いて、直接トルク制御の指令値であるトルクと電機子鎖交磁束との関係を定式化し、その関係式に 4 次方程式の代数解を用いることで MTPA 制御が達成できることを明らかにした。提案手法により MTPA 制御が実現できることをシミュレーションおよび実機実験により確認した。
- (2) 電機子鎖交磁束に同期した座標系 (M-T 座標系) において、MTPA 制御を実現する T 軸電流と電機子鎖交磁束の大きさの関係式を導出した。この関係を線形近似することで 4 次方程式に帰着でき、代数解を利用できること、提案手法は磁気飽和による変化が最も顕著な  $q$  軸インダクタンスの変動に不感であることを示した。提案手法の有効性をシミュレーションおよび実機実験により確認した。
- (3) 直接トルク制御システムにおいて生じる磁束推定誤差の影響やモデル化誤差がある場合でも MTPA 制御を実現する方法として局所探索法に基づく手法を提案した。様々な誤差が存在する状況下においても提案した局所探索法を用いることで MTPA 制御を実現できることをシミュレーションおよび実機実験により確認した。

以上の諸成果は、直接トルク制御を用いた埋込磁石同期モータ駆動システムにおいて、高効率化や高出力化を実現するものであり、埋込磁石同期モータを使用した機器の省エネルギー化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。