

称号及び氏名	博士（工学） 松山 哲也
学位授与の日付	2018年3月31日
論文名	「直接トルク制御を用いた永久磁石同期モータ 駆動システムの高性能化に関する研究」
論文審査委員	主査 森本 茂雄 副査 小西 啓治 副査 森澤 和子

論文要旨

近年、地球環境問題が大きく取り上げられており、特に気候変動に関する問題は全世界で取り組むべき喫緊の課題となっている。このような背景により、2015年気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）において、パリ協定が採択された。パリ協定とは、京都議定書に代わる、2020年以降の温室効果ガス排出削減の新たな国際枠組みであり、気候変動の脅威への対応を強化することを目的としている。わが国でも、温室効果ガスの主要因である二酸化炭素の排出削減に向け、様々な検討がされている。その中でもボイラなど化石燃料を燃焼する機器からヒートポンプ機器への代替による効果が大きいと期待されている。ヒートポンプ機器は冷凍サイクルを備えた装置であり、高圧冷媒の生成には圧縮機が用いられる。ターボ式の圧縮機を駆動するモータとしては、大型で高速用途となるために従来では誘導モータ（IM: Induction Motor）が主流であったが、近年は界磁磁束に永久磁石を利用した永久磁石同期モータ（PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor）も普及しつつある。家庭用エアコンは、国内ではトップランナー方式による高効率化の観点から PMSM が一般的となった。ヒートポンプ機器のさらなる普及には、今後の冷媒規制を踏まえ、圧縮機の高効率化や高速化が必要である。モータ制御の観点からみると、高効率化の実現はモータの性能を十分に引き出すことが重要となり、高速化の実現においてはその制御方法がシンプルであるほうが望ましい。さらに、コストダウンのニーズにも対応するためには、永久磁石を用いることで高コストとなる PMSM だけでなく IM への対応に加え、位置センサや速度センサを設置せずに駆動できることが望ましい。

以上のことから、以下の三つの要求を満たすモータドライブシステムが必要であると考えられる。まず、高速領域での安定駆動と高効率駆動を実現する。次に、速度・位置センサの

ないシンプルなシステムで構成する。最後に、永久磁石同期モータを前提としつつ、モータの種類を問わず制御できることである。

本要求に対して、PMSMを用いる従来のモータドライブシステムについての課題を説明する。従来の位置センサを持たないシステムにおいて、PMSMを高負荷領域で駆動した場合、モータの磁気飽和特性によって位置推定精度が低下し、モータモデルの d , q 軸間の干渉により不安定化する課題がある。さらに、高速領域で駆動した場合も同様に、制御応答性が相対的に低下することで、 d , q 軸間に干渉が生じて不安化する課題がある。これらの課題を完全に補償することはできず、根本的な解決には至っていない。すなわち、位置センサを用いない PMSM の高速化や安定駆動には依然課題があることが分かる。一方、IM においては電流ベクトル制御における制御の複雑さにより、高速領域では V/f 制御が一般的になってはいるが、制御応答性や高効率化の観点で課題がある。

そこで、本論文では、PMSM の駆動方式の一つである直接トルク制御 (DTC: Direct Torque Control) を研究の対象とした。直接トルク制御は、電圧と電流情報を用いてトルクと電機子鎖交磁束を推定し、両者が指令値と一致するように制御することで、IM のみならず PMSM の駆動も可能となる。そして、指令磁束と推定磁束から指令電圧を生成するため、高負荷時や高速駆動時での課題となる d , q 軸間の干渉を考慮する必要がないことや、電機子鎖交磁束を利用することで原理的に位置センサレス駆動が可能といったメリットがある。

一方で、PMSM の高効率な運転方法として知られる最大トルク/電流 (MTPA: Maximum Torque Per Ampere) 制御や広範囲運転法として知られる弱め磁束 (FW: Flux-weakening) 制御は、指令トルクに応じた最適な指令磁束を与えることで原理的に実現できることから、従来の d , q 軸上での電流ベクトル制御と同等の制御性能を達成することは可能であると考えられる。しかし、電機子鎖交磁束の推定や指令磁束の生成には、モータパラメータや電圧情報が必要となり、その精度が直接トルク制御の制御性能である効率に大きく影響を与える。具体的には、インバータに起因する指令電圧と実電圧との間の電圧誤差や電機子抵抗のパラメータ誤差により、電機子鎖交磁束の推定精度が低下する。さらに、上位コントローラから与えられた指令トルクに応じて生成される MTPA 制御を実現するための指令磁束は、事前に準備された参照テーブルが用いられるが、テーブルの生成にはモータパラメータである永久磁石による鎖交磁束 (以降、永久磁石磁束と略記) と d , q 軸インダクタンスが用いられる。しかし、永久磁石磁束は着磁バラツキや温度減磁などの影響を受け、 q 軸インダクタンスは磁気飽和によって値が大きく変動するため最適な指令磁束振幅を生成することは難しい。そこで、本研究では、モータパラメータ誤差と電圧誤差の影響を受けずに MTPA 制御を実現する、最適な指令磁束を生成可能な電機子反作用磁束制御を提案した。本制御は永久磁石磁束と電流の位相差情報に着眼しており、両者が直交するように指令磁束を修正することで MTPA 制御を実現している。次に、広範囲運転を目的とした弱め磁束制御領域で駆動するためには、モータ電圧をインバータ電圧に基づく制限電圧以下とする必要がある。しかし、この実現には磁束振幅を調整するための磁束制限部の追加が必要となることから、新たな機能の追加に伴うシステムの煩雑さや、MTPA 制御と弱め磁束制御の制御手法の切替えに伴う処理の煩わしさが増加する。そこで、本研究では、電機子反作用磁束制御を利用した新たな弱め磁束制御法について提案した。本制御は、電機子反作用磁束制御で算出する永久磁石磁束と電機子電流との内積が無効電力成分に依存することに着眼している。さらに、直接トルク制御は制御システムがシンプルであることから高速領域での駆動も検討されている。しかし、高速運転時には指令磁束に対して電機子鎖交磁束が大きくなり、両者は一致しないことが分かっている。すなわち、所望の指令磁束で運転できないことから、効率と間接的には安定性が低下する。さらに、高速運転時において指令トルクに実トルクが一致するといった検討はされていない。本研究では、電機子鎖交磁束とトルクをそれぞれの指令値に一致させる離散化誤差補償法を提案した。本補償法は、PWM インバータに起因する離散化誤差を考慮して導出した電機子鎖交磁束とトルクの離散化モデルにより、両者を指令値に一致させる条件を

算出し、電機子鎖交磁束の位相を修正するものである。

本論文は、以上に示したように、直接トルク制御を用いた PMSM 駆動システムにおいて、高効率化、広範囲運転、高速化に関する研究をまとめたものである。本論文は、緒論、結論を含め全 5 章で構成される。

第 2 章では、直接トルク制御を用いた PMSM 駆動システムにおいて、モータパラメータ誤差と電圧誤差に影響を受けずに MTPA 制御を実現する、最適な指令磁束の生成方法を提案した。そこで、まず一般的な直接トルク制御とその動作原理を説明し、本論文で対象とした電圧指令を生成する直接トルク制御の構成を示した。そして、本章での提案手法を磁気突極性の有無に関係なく適用するために必要な最大トルク制御軸について説明した。次に、パラメータ誤差と電圧誤差により電機子反作用磁束が MTPA 制御を実現するためのベクトルからずれることを明らかにした後に、パラメータ誤差と電圧誤差にロバストとなる指令磁束生成手法である電機子反作用磁束制御を提案した。最後に、圧縮機用モータと高速ファン用モータを用いた実験により、パラメータ誤差と電圧誤差に対してロバストであることを確認するとともに、磁気突極性を有するモータでは磁気飽和にもロバストであることを確認した。

第 3 章では、第 2 章で提案した電機子反作用磁束制御を利用し、広範囲運転を実現するための弱め磁束制御法について提案した。提案法は、電機子反作用磁束制御で算出する内積演算結果を利用し、モータ電圧が所望となるように指令磁束を修正する電圧調整手法である。本提案法の効果として、圧縮機用モータを用いた実験により、モータ電圧をインバータ電圧以下に制限できることを確認した。また、MTPA 制御から弱め磁束制御までを切替え処理なしで実現できることも確認した。さらに、モータ電圧をインバータ電圧以上とする過変調領域での駆動も確認でき、インバータの電圧利用率を向上させることができた。

第 4 章では、直接トルク制御を用いた PMSM 駆動システムを高速運転させた場合に、電機子鎖交磁束とトルクをそれぞれの指令値に一致させる離散化誤差補償法を提案した。本章ではまず、制御周期当りの回転子の移動量が大きくなる高速運転時では、PWM インバータに起因した離散化誤差の影響により電機子鎖交磁束とトルクがそれぞれ指令値に一致しないことを明らかにした。そして、電機子鎖交磁束とトルクをそれぞれの指令値に一致させるために、電機子鎖交磁束の位相に着眼した補償法を提案し、その補償量についても明らかにした。次に、圧縮機用モータを用いたシミュレーションと実験により、電機子鎖交磁束とトルクが両者の指令値と一致することを確認した。さらに、高速ファン用モータを用いた実験により 4 万回転領域での良好な駆動を確認できた。

最後に、第 5 章では、結論として本論文についての総括をしている。

審査結果の要旨

本論文は、直接トルク制御を用いた永久磁石同期モータ駆動システムにおいて、高効率化、広範囲運転、高速化について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 直接トルク制御を用いた永久磁石同期モータ (PMSM) 駆動システムにおいて、モータパラメータ誤差と電圧誤差に影響を受けずに最大トルク/電流 (MTPA) 制御を実現するために、最適な指令磁束の生成方法として電機子反作用磁束制御を新規に提案した。圧縮機用モータと高速ファン用モータを用いた実験により、提案した電機子反作用磁束制御がパラメータ誤差と電圧誤差に対してロバストであることを確認するとともに、磁気突極性を有するモータでは磁気飽和にもロバストであることを確認した。
- (2) 電機子反作用磁束制御を利用し、広範囲運転を実現するための弱め磁束制御法として、モータ電圧が所望となるように指令磁束を修正する電圧調整手法を提案した。本提案法の効果を、圧縮機用モータを用いた実験により確認した。また、MTPA 制御から弱め磁束制御までを切替え処理なしで実現できることも確認した。さらに、モータ電圧をインバータ電圧以上とする過変調領域での駆動も確認でき、インバータの電圧利用率を向上させることができた。
- (3) 直接トルク制御を用いた PMSM 駆動システムを高速運転させた場合に、電機子鎖交磁束とトルクをそれぞれの指令値に一致させるために、電機子鎖交磁束の位相に着眼した離散化誤差補償法を提案した。圧縮機用モータを用いたシミュレーションと実験により、提案補償法を用いることで電機子鎖交磁束とトルクが両者の指令値と一致することを確認した。さらに、高速ファン用モータを用いた実験により 4 万回転領域での良好な駆動を確認した。

以上の諸成果は、永久磁石同期モータ駆動システムにおいて、高速領域での安定駆動と高効率駆動、速度・位置センサのないシンプルなセンサレス駆動を実現するもので、モータ駆動される圧縮機の高効率化や高速化に繋がり、ヒートポンプ機器のさらなる普及により二酸化炭素の排出削減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。