

報告番号	甲 第 13357 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 永久磁石同期モータ電流ベクトル制御系の
ためのモデル予測変調に関する研究
(Study on Model Predictive Modulation
for Current Vector Control System of
Permanent Magnet Synchronous Motor)

氏 名 嶋岡 雅浩

論 文 内 容 の 要 旨

モデル予測制御は (MPC : Model Predictive Control), 制御対象の未来の挙動を数学モデルを用いて予測することで最適な操作量を決定する制御手法である。MPC は、最適な操作量を決定する過程で、制御対象における非線形性や制約の考慮が可能である。これらを考慮した上での稼働により、MPC は制御対象の高性能化が可能であり、大規模なプロセス産業やロボット等の機械系に対し MPC の有効性が確認されている。本研究では MPC の適用分野として永久磁石同期モータ (PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor) 駆動システムに注目する。

PMSM 駆動システムは、PMSM、電圧形インバータ、直流電源、制御器、各種センサにより構成される。PMSM は固定子にコイル、回転子に永久磁石を配置した構造である。ブラシ等の機械的接触部が存在しないため機械損が無視可能なほど小さくメンテナンスフリーであるうえ、永久磁石磁束によるトルクと回転子内部の磁気抵抗の差によるトルクを利用可能なため高出力密度化が可能である。こういった特徴から、より高い出力密度の求められる用途に適しており、家電用途や民生用途だけでなく移動体への適用が進められている。電圧形インバータは、交流モータである PMSM に交流電圧を入力するための電力変換器である。直流電源に対し 2 つのパワー半導体デバイスを相補的に動作させ、プラス電圧とマイナス電圧の時間幅を調整することで、交流電圧を生成する。PMSM 駆動システムでは、パルス幅変調 (PWM : Pulse Width Modulation) を用いた PI 制御に基づく電流ベクトル制御系が一般的な制御法として利用される。制御器

はサンプリングした電流値と電流指令の誤差により制御周期間の平均値として電圧指令を計算し、PWMにより三角波キャリアと電圧指令を比較することで電圧形インバータが出力するプラス電圧とマイナス電圧の時間幅を決定する。PWMは電圧指令が正弦波であることを前提とするため、電圧形インバータにおいて、電圧指令と入力電圧の基本波成分が一致し線形の関係となる領域（線形領域）のみ利用され、PMSM駆動システムにおける電圧利用率は最大で78%となる。一方で電圧形インバータには、電圧指令が正弦波ではなく台形波や矩形波状となり、電圧指令と入力電圧基本波成分の関係が非線形となる領域（過変調領域）が存在する。過変調領域は、線形領域と比較し基本波成分の振幅を増大させることでPMSM駆動システムの電圧利用率を100%まで向上可能であるが、低次高調波成分による脈動が発生するというデメリットが存在する。PWMを用いたPI制御では、この低次高調波脈動を抑制するよう制御器が電圧指令を計算するため過変調領域を利用不可能である。そのため、過変調領域の利用には、電流をフィードバックしない電圧位相制御を用意し切り替える手法やPWMを用いたPI制御に基づく電流ベクトル制御系を基にモータモデルやフィルタにより低次高調波脈動を除去する手法などが提案されている。しかしながら、電圧位相制御に対しては切り替えタイミングの設計の手間や切り替えにおける応答性能の劣化が、低次高調波脈動を除去する手法に対しては電圧リミッタやアンチワインドアップ制御といった非線形要素の設計がそれぞれ課題として存在する。

MPCは非線形性を考慮可能であることから、電圧形インバータの線形領域から過変調領域までの全域の利用する手法として、PMSM駆動システムへのMPCの適用に着目する。電圧形インバータの1つの相の状態はプラス電圧とマイナス電圧の2通りであり、電圧形インバータの瞬時状態は8通りの離散状態（瞬時空間電圧ベクトル）となる。MPCでは、PMSMへの入力電圧の時間変化は瞬時空間電圧ベクトルの時系列順列であると考えられる。有限の時系列順列に対し、制御器はPMSMの未来の電流挙動を予測し、電流指令値に最も追従する順列を最適な入力電圧として選択することでPMSMを制御する。MPCは入力電圧を正弦波と前提せず時系列順列と考えることで、台形波や矩形波となる過変調領域まで利用可能であると考えられ、飽和及び非線形性の考慮によるモータ駆動システムの高性能化が見込まれる。しかしながら、多くのMPC適用に関する研究では、評価関数の検討やMPC適用のためのモータモデルの検討が主であるうえ、MPCの長所が生かせる動作点や条件において、直接トルク制御やMPCを比較対象とした性能評価に焦点が当てられてきた。そのため、PWMを用いたPI制御に基づく電流ベクトル制御系と比較した時、動作点によっては定常制御性能で劣り、PMSM駆動システムの制御性能評価には至っていない。定常制御性能改善のために、操作量を拡張する手法も提案されているが、制御周期間の時間平均電圧を制御する既存の変調方式の影響を受け、瞬時空間電圧ベクトルを自由に探索し最適解を探索するというMPC本来の長所を損なっているという懸念が残る。

そこで本研究では、PMSM 電流ベクトル制御系の動作範囲全域での制御性能評価が可能な MPC に基づく電流ベクトル制御系について検討する。検討にあたり、モータ駆動システムにおける操作量に注目する。モータ駆動システムへの MPC の適用は、最適な瞬時空間電圧ベクトルの時系列順列を探索することから、電圧パルスの時間幅を最適化により調整していると考え、PMSM 電流ベクトル制御系における変調を MPC により行う。MPC により最適なスイッチングタイミングの探索問題を解く新たな変調方式の構築を図る。本研究で提案する新たな変調方式をモデル予測変調 (Model Predictive Modulation : MPM) と呼称する。平均値制御を前提としハードウェアにより実装される PWM などの既存の変調方式と比較し、瞬時電流応答の予測を行いソフトウェア実装される MPM により、PWM と同等の定常電流制御性能を実現したうえで、既存の変調方式では実現できなかった、単一変調方式での過渡応答の高速化、駆動範囲拡大の可能性を探る。

MPM に基づく PMSM 電流ベクトル制御系の構築にあたり、初めに MPM の探索問題としての定式化を行い、MPM における探索空間について説明する。そして、最適なスイッチングタイミングを解く際の探索空間設定と探索における計算量の削減の 2 点に取り組む。

- I. MPM により探索的な最適な入力電圧を求めるにあたり、探索空間の広さと密度が与える影響について議論する。PWM を用いた PI 制御に基づく PMSM 電流ベクトル制御の入力電圧や過変調領域の入力電圧を探索空間内に包含するには、どのように MPM の探索空間を設定すべきかについて考える。そして探索空間の設計法を提案する。さらに PMSM 電流ベクトル制御系において MPM により探索する際の評価関数設定法についても述べる。
- II. 提案する MPM と計算量の関係について説明する。計算量削減のアプローチとして探索空間の制限について述べる。そしてベクトル空間上で提案する MPM で最適解が存在すると想定される領域を、現在の動作状況をもとに PMSM 逆モデルを用いて推定する。また、事前定義される MPM の探索空間内の取り得る入力電圧をベクトル空間上で分類する。これらの情報を用いて、MPM の探索空間を動的に制限する手法を提案する。

以上の取り組みにより、PMSM 電流ベクトル制御系のためのモデル予測変調 (MPM) という新しい変調方式の構築を図る。そして提案する MPM に基づく制御系の性能を実機実験により確認する。

本論文の構成を以下に示す。

第 1 章では、モデル予測制御の基本と適用例、モータ駆動システムと制御法の発展の歴史、MPC 適用における他研究の動向について述べる。

第 2 章では、PMSM 駆動システムの電流ベクトル制御に対する MPC の適用について述べるにあたり、基本となる PMSM のモデル、電圧形インバータのモデル、一般的

な構成である PI 制御に基づく電流制御系とその動作について説明する。

第 3 章では、はじめに PMSM 電流ベクトル制御系に MPC を適用する上での基本事項について説明する。つづいて、PMSM 電流ベクトル制御系に対する MPC の適用においてその動作を述べ、特徴をまとめる。そして、MPC に基づく PMSM 電流ベクトル制御系に対しその性能をシミュレーションにより確認し、課題点を述べる

第 4 章では、提案する MPM について、探索問題としての定式化を行い、MPM の探索空間について説明する。MPM の探索空間の広さと詳細さを決定する設計パラメータについて、PWM を用いた PI 制御に基づく PMSM 電流ベクトル制御系や過変調領域における入力電圧と比較しながら確認し、それぞれの設計法を提案する。また、MPM の探索空間で PMSM 電流ベクトル制御を行う際の電流に対する評価関数設定法を提案する。最後に、PMSM の駆動において最も広かつ詳細な探索空間が必要となる矩形波駆動での電圧利用率の評価により提案する探索空間設定法の有効性をシミュレーションにより確認する。

第 5 章では、提案する MPM の問題点である計算量に対し、PMSM 電流ベクトル制御の特徴を利用した計算量の削減つまりは探索空間制限法について提案する。PMSM 逆モデルを用いた最適解の存在領域の推定可能であること、MPM における探索空間が事前に分類可能であることを確認する。そして駆動状況に基づき動的に探索空間を制限する手法を提案する。そして、提案する動的探索空間制限法の有効性について、シミュレーション上で定常電流制御性能、過渡応答性能、計算時間の観点で確認する。

第 6 章では、実機実験により提案するモデル予測変調に基づく電流ベクトル制御系の有効性について確認する。まず実機実験にあたり、提案する MPC の実装法と実装する上での考慮点について説明する。つづいて、第 4 章、第 5 章で提案した内容を評価する条件設定のもとで実験を行い提案法の有効性を確認する。そして、PMSM 電流ベクトル制御系における種々の駆動条件に対し提案法での性能を確認し、本研究により PMSM 電流ベクトル制御系の高性能化で実現できた事項をまとめる。

最後に、第 7 章において本研究のまとめおよび今後の課題について述べる。

本研究で提案するモデル予測変調は、PWM 等の従来の変調手法とは異なるソフトウェアによる変調方式であり、PMSM の瞬時電流応答を考慮した制御系の構築が可能となる。そして、単一変調方式で PMSM 駆動システムの電圧利用率向上を実現でき、PMSM 駆動システムの過渡応答性能の向上、駆動範囲の拡大に貢献するものとする。