

報告番号	甲 第 1287 号
------	--------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 定電圧振幅楕円に着目した新しい座標系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
(A Study on High Performance Permanent Magnet Synchronous Motor Control Based on a New Coordinate System That Focused on the Constant Voltage Amplitude Ellipse)

氏 名 松木 洋介

論 文 内 容 の 要 旨

人類文化の持続可能な発展に向けては、エネルギー消費に伴う環境影響を低減させる必要があり、これにはエネルギー消費の高効率化が求められる。電力は貯蔵・運搬・安全性に優れることから、最終消費に電力が占める割合は年々増加している。全世界の電力消費のうちモータは約半分を占めるため、エネルギー消費の高効率化を実現するにはモータの高効率化が必要である。

様々なモータの中で永久磁石同期モータ (PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor) が最も効率が高く、加えて小型軽量といった優れた特徴を有する。本論文ではエネルギー消費高効率化の実現に向けた、PMSM の適用拡大についての研究を行うものである。

PMSM 駆動システムは PMSM の特徴である高効率・小型軽量に加え、高信頼・高速応答の特徴を有する。高信頼はハードウェアを構成するインバータによって、高速応答は PMSM 制御法として一般に使用されるベクトル制御によって主に実現されている。

ベクトル制御は 3 相交流電圧・電流を直交 2 軸回転座標系である d-q 座標系に投影、操作量と状態量の厳密な線形化を実現させた上で電流制御を行う方法である。ベクトル制御は瞬時トルク制御、すなわち過渡状態における高速応答・高安定なトルク制御を実現したものである。一方でベクトル制御以外の PMSM 制御法は、コスト制約への対応能力は高いも

のベクトル制御のような高速応答性は実現できない。このため PMSM 制御法としてはベクトル制御が広く用いられる。

PMSM 制御法にて用いられる座標系は d-q 座標系以外にもいくつか存在している。座標系は PMSM 制御法に不随するものとして捉えられる。座標系を変更することで PMSM の数式モデルが変化、これにより制御性能の変化が引き起こされる。d-q 以外の座標系は局所性能の実現を目的として用途指向で提案されたものである。ベクトル制御を含む PMSM 制御法にこれら座標系を用いることで、制御アルゴリズムの複雑化や制御設計の複雑化を回避しつつ局所性能を実現可能である。しかしながら汎用性に欠けるため d-q 座標系ほど広くは用いられていない。

本研究の目的である PMSM 駆動システムの適用拡大に向けては、高性能化と低コスト化を平行して進めることが課題である。本論文では PMSM 駆動システムの適用拡大を、PMSM 制御法によって実現することを目標とする。このときの PMSM 制御法における課題は高性能化と低コスト化の両立である。

ベクトル制御を用いることでの課題解決は、ベクトル制御のコスト制約対応能力が低いことを原因として、用いる座標系によらず低コスト化を実現できない問題があった。コスト制約対応能力の高い、ベクトル制御以外の PMSM 制御法を用いることでの課題解決は、座標系の変更を行わずに高性能化を実現した場合は制御アルゴリズムの複雑化に伴ってコスト増加する問題があった。このため既存の PMSM 制御法には課題を解決したものが存在しない。

本論文では PMSM 制御法の課題解決に向けて、課題解決に適した用途志向の新しい座標系の提案を行う。提案する新しい座標系は、その用途をベクトル制御以外の PMSM 制御法の高速度応答化・高安定化に定めたもので、定電圧振幅楕円に着目した n-t 座標系である。

ベクトル制御以外の PMSM 制御法に共通した特徴として、電圧ベクトルを d-q 座標系ではなく極座標に基づいて振幅・位相を操作することが挙げられる。定電圧振幅楕円は電圧振幅一定の条件下において、電圧位相を変化させた場合に電流ベクトルが d-q 座標系平面に描く軌跡である。電圧位相が微小変化した場合、電流ベクトル変化は定電圧振幅楕円の接線方向に生じる特徴がある。

n-t 座標系は n 軸が定電圧振幅楕円の法線方向、t 軸が定電圧振幅楕円の接線方向にそれぞれ対応する。n-t 座標系に電流ベクトルを投影することで、ベクトル制御以外の PMSM 制御法において操作量が変化した場合に起こる過渡現象に着目した状態量 (n 軸電流, t 軸電流) を得ることができる。本論文ではこれら状態量をベクトル制御以外の PMSM 制御法に用いることで過渡特性の向上、すなわち高速応答・高安定を実現する。用途指向の n-t 座標系を用いることで制御アルゴリズムの複雑化や制御設計の複雑化を回避、これに伴うコスト増加が抑えられるため PMSM 制御法の課題解決が期待できる。

本論文では n-t 座標系を提案するに当たって、PMSM 制御法の定性的、定量的な比較・整理、および各 PMSM 制御法における課題の明確化を実施した。加えて、PMSM 制御法にて

用いられる既存の座標系の比較・整理を行った。これら比較・整理を通して、本論文における n-t 座標系を用いた課題解決アプローチの妥当性を示した。その上で n-t 座標系に基づく PMSM 制御法の効果検証をシミュレーションおよび実機によって実施、下記の結果を得た。

■ 電圧位相制御+電圧振幅制御への n-t 座標系の適用

本制御法にて高速応答・高安定を実現するには、パラメータ変動時におけるトルク振動抑制法の確立、およびアルゴリズムを複雑化せずに相互干渉ループを抑制する方法の確立が求められた。解決に向けては所望の特性（電圧位相を入力とする伝達関数 $\Delta P_{x2}(s) \approx 0$ 、分子多項式の s^1 項の極性が電圧位相によらず一定）を満たす状態量を明確にする必要があった。

n 軸電流は上記所望の特性を満たした状態量である。このため電圧振幅制御の状態量、および振動抑制のために追加した状態 FB 制御の状態量として用いることでトルク振動・相互干渉ループを抑圧する。その結果として高速応答・高安定を実現できることをシミュレーションおよび実機結果より示した。

■ 簡易位置センサレス制御への n-t 座標系の適用

本制御法にて高安定を実現するには、低速時における制御システム不安定化の対策方法を確立することが求められた。解決に向けては所望の特性（速度条件によらず電圧位相 δ 変化に対して感度が高い状態量を明らかにする必要）を満たす状態量を明らかにする必要があった。

t 軸電流は上記所望の特性を満たした状態量である。このため状態 FB 制御の状態量として用いることで制御システム不安定化を解決する。結果として高安定を実現できることをシミュレーションおよび実機結果より示した。

本論文にて提案する n-t 座標系を PMSM 制御法に用いることで、既存の PMSM 制御法では実現が困難であった PMSM 駆動システムの高性能化と低コスト化の両立が実現可能となる。このため PMSM 駆動システムの適用範囲を拡大、ひいてはエネルギー消費量の削減に貢献するものである。