

報告番号	甲 第 12775 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 インダクタンス空間分布の正弦波性を前提
としない永久磁石同期モータの位置センサ
レス制御
(A Position Sensorless Control for PMSM
not premised on the Sinusoidal
Characteristic of Inductance Spatial
Distribution)

氏 名 宋 河珉

論 文 内 容 の 要 旨

動力源としてのモータは、内燃機関に比べ、高効率であり、その動作時に直接温室効果ガスを排出しないことから、産業部門・家庭部門において幅広く使用されている。また、運輸部門では未だ普及率が 2.0%であることから、今後その使用は拡大するものと考えられる。中でも埋込磁石同期モータ (IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) は高効率・高出力密度・高速度応答性を有し、今後のモータ使用拡大の中心を担うと期待されている。

IPMSM を制御するためには、回転子の磁束方向である磁極位置を常に把握する必要がある。一般的に高額な位置センサが使用される。一方、コスト・設置スペースの問題やシステムが複雑化されること、そしてセンサ故障時のフェイルセーフの観点から、センサを用いず制御技術で磁極位置を推定する位置センサレス制御技術が注目され、すでに様々な分野において使用されている。

停止・低速域で使用される全ての位置センサレス制御手法は、インダクタンス空間分布が正弦波状に変化することを前提としている。しかし、IPMSM の高出力密度化への要求は強く、その出力密度は向上する傾向にある。高出力密度化の設計が IPMSM に与える影響として、磁気飽和が顕著になり、インダクタンス空間分布が非正弦波状に変化することが報告されている。即ち、高出力密度モータへの要求は、出力を低下させても「インダクタ

ンス空間分布の正弦波性」を確保する位置センサレス制御手法の大前提と相反する。よって、磁気飽和の積極的な利用により更なる高出力密度化を図った IPMSM 利用への道を拓くためには、インダクタンス空間分布の正弦波性を前提としない位置センサレス制御手法を新たに確立することが重要となる。

本論文では、インダクタンス空間分布の正弦波性を前提としない IPMSM の停止・低速域での位置センサレス制御の実現を目的とする。同様な考えに基づき、先行研究においては、パターンマッチング手法に基づく位置センサレス制御の概念が提案され、実機実験により可能性は示された。しかし、様々な課題があることから、インダクタンスの正弦波性を前提としない手法として実用化に向けて、多くの課題を残していた。本研究ではパターンマッチング手法の残存課題を改良し、インダクタンスの正弦波性を前提としない位置センサレス制御の実用化のための技術を確保することに重点を置く。

以下に、本論文の構成と各章での成果を簡潔に示す。

まず、第1章では、本研究の背景および目的について述べた。

第2章では、ベクトル制御に用いられる IPMSM の座標系や座標変換、各座標でのモータモデルを示し、PWM 制御について説明した。次に、インダクタンスの正弦波性を前提とした従来の停止・低速域での位置センサレス制御手法を説明した。さらに、本論文で使用した高出力密度 IPMSM のインダクタンス空間分布が非正弦波状に変化することを示した。最後に、対象 IPMSM を用いた実機実験を通して、インダクタンス空間分布が非正弦波状に変化する IPMSM に正弦波性を前提とする従来の位置センサレス制御法を適用した場合、位置誤差が発生することや制御破綻してしまう可能性があることを示した。

第3章では、インダクタンスの正弦波性を前提としない新たな位置推定手法として、先行研究で提案されたパターンマッチング手法に基づく位置センサレス制御について説明した。パターンマッチング手法は磁極位置に基づいて変化する特徴量のテンプレートデータを事前に用意する。そして、オンラインで測定した特徴量とテンプレートデータをパターンマッチングし、テンプレートデータから特徴量と最も類似する磁極位置を探索することにより位置推定を行う。特徴量として、相インダクタンスと逆比例する電流変化を使用する。テンプレートデータ作成時及びオンラインでの特徴量計測時には測定条件を一定に保つ必要がある。対象 IPMSM にパターンマッチング手法を適用して位置センサレス実機実験を行った結果や、実験結果には以下の課題が残存することを示した。

- (1) 大きな位置誤差が発生する
- (2) 位置誤差の原因が明確にされていない
- (3) モータを設計して制御を行わない限り位置誤差を見積もることができない
- (4) 高周波重畳信号による電流脈動が問題となる

本論文ではインダクタンス空間分布の正弦波性を前提としない位置センサレス制御法の実用化のために、先行研究の課題の改善を行うことを本研究の目的としている。

第4章では、(1)、(2)、(3)の課題に対し検討を行った。まず、位置誤差が発生するメカ

ニズムを明確にした。軸誤差発生時には、特徴量の測定条件の中で電流位相を一定に保つことができないため、位置誤差が発生することを示した。そして、特異点が存在する磁極位置があり、磁極位置によって位置誤差の出方が異なることや、位置誤差が発生する条件を明確にした。さらに、事前に様々な電流位相のテンプレートデータを用意し、提案した評価関数を繰り返し計算することにより、実機実験を行わなくても位置誤差を再現することができる「位置誤差事前評価法」を提案した。位置誤差事前評価法を使用して再現した位置誤差が、実機実験で発生する位置誤差と概ね一致することから、妥当性を示した。

第5章では、(1)の課題を解決するために、異なる特性を持つ位置誤差改善法Ⅰ・Ⅱ・Ⅲを提案した。位置誤差改善法Ⅰは、オンラインで発生する様々な電流位相のテンプレートデータを用意しパターンマッチングを行う「複数のテンプレートデータを用いる位置誤差改善法」である。位置誤差改善法Ⅰは必要とするメモリや演算時間が増加するものの、最も優れた性能を得ることができる手法である。位置誤差改善法Ⅱでは、パターンマッチング手法の位置誤差が遅れ位相方向に発生しやすいことから、進み位相に位置誤差が発生させるようにテンプレートデータの位相を調節する「代表的な一つのテンプレートデータを作成する手法」を提案した。位置誤差改善法Ⅱは、全ての磁極位置で同じ位相方向に位置誤差が発生するIPMSMにおいては、メモリ・演算時間を増加することなく位置誤差が改善できる手法である。位置誤差改善法Ⅲとして、テンプレートデータと間違っている情報を持つ特徴量を除外してパターンマッチングする手法を提案した。位置誤差事前評価法を利用して様々な評価関数の性能評価を行い、各磁極位置で良い性能を持つ評価関数を切り替える手法である。位置誤差改善法Ⅲは位置誤差を発生させる特徴量を除外する手法であるため、使用環境の変化にロバストな手法である。明確にした三つの提案法の特徴を、シミュレーションや実機実験を通して検証した。

第6章では、(4)の課題である電流脈動を減らすために、重畳信号の低減法を提案した。まず、重畳信号の大きさと特徴量抽出可能条件の関係を示した。そして、特徴量の数を減らし特徴量を計測する電圧ベクトルを切り替えることにより、重畳信号を低減する手法を提案した。次に、特徴量の数を減らした上で、重畳信号の印加方向を切り替えることにより、重畳信号を低減する手法を提案した。実機実験を通して、特徴量の数を減らすことや信号重畳方向を切り替えても、重負荷時でも位置センサレス制御ができることを示した。

第7章では、本論文のまとめと今後の課題を示した。

付録Aでは、実験装置の構成を説明した。さらに、本論文で使用した様々なテンプレートデータを高速かつ精度よく作成することために考案した「テンプレートデータ自動作成法」について示した。

付録Bでは、本手法のカギとなるテンプレートデータの作成に関する諸事について述べた。まず、電源電圧の変動が特徴量に及ぼす影響について示した。電圧変動時における特徴量の変化を示した。そして、電源電圧が変動する条件で、位置誤差改善法Ⅰ・Ⅱ・Ⅲを利用して実機実験を行い、電圧変動による位置推定性能への影響を示した。また、電流分解能を

設定するために、負荷電流を変化させながら実機実験を行った。その結果、全ての条件においてパターンマッチング手法を適用するために必要とするテンプレートデータの数と演算時間を明確にした。

以上のように、本研究では、インダクタンスの正弦波性を前提としない位置センサレス制御の実用化に向けた重要な課題を解決した。これにより、磁気飽和まで積極的な利用により更なる高出力密度化を図ったIPMSM利用への道を拓いたといえる。