

報告番号	甲 第 14703 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **ベクトル空間分解に基づく
二重三相永久磁石同期モータの
位置センサレス制御
(Position Sensorless Control Methods for
Dual Three-phase Permanent Magnet
Synchronous Motor Based on Vector
Space Decomposition)**

氏 名 **今井 幸司**

論 文 内 容 の 要 旨

永久磁石同期モータ (Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM) 駆動システムの高出力化を背景に、三相よりも多い相数の固定子巻線を持つ多相 PMSM 駆動システムの利用が期待されている。多相 PMSM は高出力化に加えて、高信頼性、効率の改善、制御自由度の増加の特徴を持ち、巻線構造の観点から、対称多相 PMSM と非対称多相 PMSM の二種類に分類される。非対称多相 PMSM は複数の三相巻線の系統を持つことから多重三相 PMSM とも呼ばれ、多相 PMSM でありながら、三相 PMSM で確立されてきた技術を継承することが可能である。すなわち、多相 PMSM と三相 PMSM の利点が共存するため、非対称多相 PMSM は産業分野における実用化が進んでいる。このような非対称多相 PMSM を最小の要素で実現する、二重三相 PMSM (Dual Three-phase PMSM : DTP-PMSM) を対象に本論文では検討を行う。

三相 PMSM の高性能な瞬時トルク制御であるベクトル制御は、DTP-PMSM に対しても拡張されている。DTP-PMSM のベクトル制御は、利用するモデルの観点から 2 つのアプローチに大別される。第一のアプローチは、三相 PMSM の手法に基づき、DTP-PMSM を物理的な二系統巻線にモデル化する二重巻線モデルの利用である。二組の三相巻線それぞれを直交 2 軸固定子巻線に変換して制御を行うことで、交流量を直流量に変換し、ベクトル制御を可能にする。しかし、DTP-PMSM の固定子では二組の三相巻線が磁氣的に結合しているため、系統間干渉が発生し、制御性能の悪化や不安定化を引き起こす。この解決策として、非干渉化制御が提案されているものの、固定子巻線抵抗の影響を無視し近似して非干渉化制御を行うため、完

全に非干渉化することはできない。

一方、DTP-PMSM のベクトル制御の第二のアプローチでは、ベクトル空間分解に基づく座標変換を行い、二組の系統を磁気的に独立した仮想的な二系統巻線にモデル化する系統間非干渉化モデルを利用する。ベクトル空間分解で三相座標の特定の高調波成分を異なる直交座標に写像することで、自己インダクタンスと相互インダクタンスの和に相当するインダクタンスを持つ和系統と、自己インダクタンスと相互インダクタンスの差に相当するインダクタンスを持つ差系統を得ることができる。和系統と差系統の間には系統間干渉が発生しないため、二重巻線モデルのように、近似を伴う非干渉化制御が不要となり、良好な制御性能を持つベクトル制御を行うことが可能となる。現在の DTP-PMSM の研究では、系統間非干渉化モデルに基づくアプローチが主流となっている。

三相 PMSM 駆動システムで培われてきた様々な制御技術は、DTP-PMSM 駆動システムにおいてもその実現が期待されている。例えば、位置センサを用いず状態推定技術を用いて駆動に必要な回転子位置情報を推定する位置センサレス制御や、インバータの電源電圧利用率を向上させる過変調駆動である。しかし、これらの研究は、三相 PMSM 駆動システムを対象としたものに比べると、DTP-PMSM 駆動システムを対象としたものは少なく、検討は限定的である。特に、DTP-PMSM では、二重巻線モデルと系統間非干渉化モデルのふたつのアプローチが存在し、いずれのアプローチに対して、様々な制御技術を構築していくべきかについて、十分に議論されていない。そこで本論文では、ベクトル空間分解に基づく系統間非干渉化モデルを利用した DTP-PMSM の位置センサレス制御の確立を目的とする。

位置センサレス制御は三相 PMSM を対象に精力的に研究が行われており、主に低速域と中高速域に対して異なる原理の手法が検討されてきた。低速域では、インダクタンスの突極性に起因する位置情報を、高周波電圧を印加することで励起される高周波電流から推定する、高周波電圧重畳法が検討されてきた。中高速域では、速度起因の誘起電圧に起因する位置情報を、電圧・電流とモータモデルから推定する拡張誘起電圧オブザーバが検討されてきた。そして、これらの手法を速度に応じ切り替え、組み合わせて用いることで全速域における位置センサレス制御が可能になる。しかしながら、こうした位置センサレス制御には次の2点の課題が存在する。

1. 高周波電圧重畳法において位置推定に必須の高周波電流は電流制御系に対する外乱として悪影響を及ぼす。

基本波と異なる周波数を持つ高周波電流は、電流制御器が基本波成分を制御する上で、所望の電流制御を妨げる外乱として作用する。こうした高周波電流をフィードバック電流から除去するために、フィルタの利用が三相 PMSM では報告されてきたが、フィルタは電流制御系の過渡応答の悪化を引き起こしてしまう。電流制御系の問題に加えて、高周波電流により騒音・振動の原因となるトルク脈動も発生する。

2. 拡張誘起電圧オブザーバでは、過変調駆動を行う高速時において、高調波成分が位置誤差の原因となる。

インバータ過変調領域においては、インバータ印加電圧とモータ出力電流に高調波成分が含有される。こうした高調波成分は推定拡張誘起電圧が指向する位相を楕円状に回転させ、振動的な位置誤差を発生させる。

DTP-PMSM の三相固定子巻線を物理的な関係に基づいてモデル化した二重巻線モデルでは、これらの位置センサレス制御の課題は三相 PMSM と同様に発生する。そこで本研究ではこれらの課題を解決するために、DTP-PMSM の特徴である、ベクトル空間分解に基づく系統間非干渉化モデルに着目する。前述したようにベクトル空間分解は、三相座標の高調波成分を異なる直交座標に分離して写像する特徴を有している。これは換言すると、ベクトル空間分解は、特定の位相関係にある A 系統と B 系統のベクトルの成分を、異なる直交座標系に分離し写像していると言える。この周波数分離の特徴は、高調波成分のみならず、高周波電流についても成立するため、位置センサレス制御における高周波電流・高調波電流の課題の解決にベクトル空間分解は適している。

本論文では、ベクトル空間分解に基づく系統間非干渉化モデルを利用した DTP-PMSM の位置センサレス制御の確立を目的として、ベクトル空間分解で得られる和差系統を利用する以下の 2 点の提案を行う。

1. 低速域の位置センサレス制御のための差系統高周波電圧重畳法の提案

系統間非干渉化モデルにおいて、差系統はトルクに寄与しないことから、差系統に高周波電圧を重畳することによって、トルク脈動を抑制しつつ位置推定が可能になる。加えて、高周波電圧を重畳する差系統は和系統と独立し系統間干渉が発生しないため、トルクを管理する電流基本波成分を制御する和系統電流制御系には高周波電流の問題は発生しない。これにより、和系統電流制御系のフィードバックループにはフィルタが不要となり、その過渡応答劣化を回避することが可能になる。

2. 中高速域の位置センサレス制御のための和系統拡張誘起電圧オブザーバの提案

和系統には 6 次高調波成分が写像されないことから、和系統拡張誘起電圧オブザーバの入力から 6 次高調波成分を除去することが可能になる。これにより、オブザーバが推定する拡張誘起電圧中の 6 次高調波成分を低減することで、位置推定誤差を低減することが可能になる。

以上の提案を通じて、ベクトル空間分解に基づく系統間非干渉化モデルを利用した DTP-PMSM の位置センサレス制御を確立する。これにより、系統間非干渉化モデルで利用されているベクトル空間分解が、位置センサレス制御のような高性能化のための要素技術においても有効であることを示す。

本論文は全 5 章で構成される。

第 1 章では、本研究の背景を整理し、研究目的について述べる。モータの歴史を踏まえて、多相化の潮流を説明し、研究対象である DTP-PMSM 駆動システムを説明する。その後、DTP-PMSM 駆動システムの制御で主に用いられるベクトル空間分解とその技術展望について述べ、ベクトル空間分解に基づく位置センサレス制御の検討の必要性を説明する。本論文の

目的と独自性を述べ、最後に本論文の構成を示す。

第2章ではDTP-PMSM駆動システムについて整理する。座標系を定義し、各座標の変換行列を整理した上で、三相二相変換と回転変換に基づく二重巻線モデルとベクトル空間分解に基づく系統間非干渉化モデルの数式モデリングを説明する。その後、両モデルのベクトル制御系の設計を示し、過変調駆動の制御系設計を説明する。最後に位置センサレス制御の技術課題について述べる。

第3章ではDTP-PMSMの低速域位置センサレス制御について検討する。高周波電圧重畳法は、高周波信号重畳を伴う電流制御系として構成されるため、まず、高周波信号重畳を伴う電流制御系一般について考察する。この考察に基づき、トルク脈動の抑制と良好な過渡応答を実現可能な、信号重畳を伴う系統間非干渉化モデル電流制御系を提案する。その後、提案した電流制御系に基づき、系統間非干渉化モデルに基づく低速域位置センサレス制御として、差系統高周波電圧重畳法を提案する。最後に、提案した高周波信号を伴う電流制御系と位置センサレス制御の有効性をトルク脈動、電流制御の過渡応答、位置推定性能の観点から、実機実験で検証する。

第4章ではDTP-PMSMの中高速位置センサレス制御について検討する。まず、二重巻線モデル上の拡張誘起電圧オブザーバについて述べ、過変調駆動による拡張誘起電圧オブザーバの課題を明確化する。次に、その課題を解決するために、系統間非干渉化モデル上の拡張誘起電圧オブザーバとして、和系統拡張誘起電圧オブザーバを提案し、その有効性を実機実験で示す。拡張誘起電圧オブザーバはモータパラメータを利用する手法であるため、最後に二重巻線モデルに基づく手法と系統間非干渉化モデルに基づく提案法におけるパラメータ変動に対する推定性能を比較解析し、実機実験で解析の妥当性を検証する。

第5章では本研究の成果をまとめ、提案法定期養生の注意点を説明しつつ、今後の課題を示す。位置センサレス制御の残課題である、全速域位置センサレス制御におけるDTP-PMSMの優位性について、本論文の提案法の適用可能性について議論する。これに加えて、パラメータ変動に対する中高速域位置センサレス制御のロバスト設計や低速域位置センサレス制御のために検討した高周波信号重畳法を用いた制御の高付加価値化などの今後の課題についても説明する。

本論文は、高出力かつ高信頼性なモータ駆動システムを実現するDTP-PMSMの普及拡大に不可欠な位置センサレス化の確立に向け、ベクトル空間分解の特徴を活かした新たな位置センサレス制御手法を提案するものであり、DTP-PMSM駆動システムの位置センサレス制御の高性能化に貢献する。更に、高性能な多相PMSMの位置センサレス制御はその駆動システムの低コスト化に寄与するため、本論文は動力源の電動化の加速という点で人類社会に対して貢献するものでもある。