

称号及び氏名 博士（工学） 松下 元士

学位授与の日付 平成 22 年 9 月 30 日

論文名 「永久磁石同期モータのセンサレス電圧／電流位相差制御」

論文審査委員 主査 森本 茂雄

副査 石亀 篤司

副査 小西 啓治

論文要旨

近年、地球温暖化への取り組みとして、インバータ駆動される交流電動機でも一層の省エネルギー化が求められてきている。中でも永久磁石同期モータ（PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor）は効率がよくメンテナンスフリーであることから、エネルギー消費量の多い白物家電といわれるエアコン、冷蔵庫、洗濯機などでもその利用範囲が拡大している。高効率運転など PMSM の高性能特性を得るためには回転子位置に応じた電流位相、あるいは振幅の制御が必要であり、通常は回転子軸上に設けられた位置センサの情報により電流制御を行う。しかし、この位置センサはモータの寸法、耐環境性やコストで不利となる。また、コンプレッサなどでは設置環境や寸法的に位置センサを設けることが困難な状況もある。一方、位置センサではなく、位置推定を用いる方式では、モータシステムの小型化、信頼性と対ノイズ性の向上が期待できるため、位置センサレスの研究が行われている。一般的に永久磁石同期モータのセンサレスベクトル制御法では駆動用電圧・電流を利用して回転子位置を推定する必要があり、正確なモータパラメータが必要となる。さらに、位置推定演算のため制御装置が高コスト化するという課題がある。

一方、モータパラメータや位置推定を必要としないセンサレス制御方式として、モータ相電圧とモータ相電流の位相差（電圧／電流位相差）を推定し、位相差をモータ相電圧振幅で制御する「電圧／電流位相差制御」が検討されている。しかしながら、電流位相、電圧／電流位相差、トルク、回転数の相関関係について詳細な解析がなされていなかった。また、モータパラメータによる運転特性の変化、安定性の解析に関しては検討がなされていなかった。

本論文では、「電圧／電流位相差制御」において、電流位相、電圧／電流位相差、トルク、回転数についてそれぞれの相関関係を解析し、明らかにするとともに、電圧／電流位相差制御で求められるモータ特性について検討する。さらに、その結果から電圧／電流位相差制御で要求されるモータ特性に必要なモータパラメータ条件を示す。また、電圧／電流位相差制御において電流センサレス化について検討し、電圧／電流位相差の推定技術、高効率制御、安定化制御について検討する。最後にこれらの成果を、エアコン室外機インバータ制御に応用して、その効果を確認する。

本論文で提案するセンサレス電圧／電流位相差制御は、電圧／電流位相差を制御する方式であり、閉ループ電流制御も位置推定も行わない V/f 制御をベースとするものである。電圧／電流位相差の指令値と検出値の偏差を入力としてモータ相電圧の振幅を比例・積分制御する。電圧／電流位相差をモータ相電圧振幅値のみで制御することにより、モータ相電流の位相を間接的に制御する点が特徴であり、制御系がシンプルで汎用性が高く、安価なマイコンで信頼性が高い正弦波駆動を実現できる。また、電圧／電流位相差制御では、一般的なベクトル制御と異なり 3 相全てのモータ相電流を推定する必要はなく、1 相分のモータ相電流から電圧／電流位相差を推定してモータ相電圧振幅でこれを制御する点も特徴である。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、研究の背景や目的とともに、本論文の概要について述べる。

第 2 章では、永久磁石同期モータのモータモデルを示し、モータ相電流位相と電圧／電流位相差の関係、モータ相電流位相とモータ相電圧振幅との関係について検討する。また、モータ相電圧振幅により電圧／電流位相差を制御することでモータ相電流位相を間接的に制御できることを示し、電圧／電流位相差制御の原理を説明する。電圧／電流位相差制御では電流位相と電圧／電流位相差の関係が非常に重要となるため、電流位相を電圧／電流位相差で制御するために要求されるモータ特性について明らかにし、必要なモータパラメータ条件について示す。

第 3 章では、電圧／電流位相差をモータ相電流積算値の比から推定する手法を提案する。電圧／電流位相差をモータ相電流の積算値の比から推定することで、モータ相電流の絶対値が不要となり、電流センサ等の特性変動などに対してロバストとなる。

高効率駆動については、一般的なベクトル制御においてモータ相電流の位相を制御する場合と同様にして、モータ相電流に対して最も効率的にトルクを発生させ、銅損を最小化できる最適な電圧／電流位相差で運転することにより、高効率な正弦波駆動が可能であることを示す。

低コスト化かつ信頼性の向上を目的として、電圧／電流位相差の推定に必要な相電流を電流センサで直接検出する代わりに、インバータの負側 DC バスに接続されたシャント抵抗から検出したインバータ母線電流から推定し、電圧／電流位相差を推定する手法を提案する。提案する電圧／電流位相差の推定手法では、モータ相電流の推定が容易となる区間でのみインバータ母線電流からモータ相電流を検出するだけでよい。

第 4 章では、まず電圧／電流位相差制御においてはロータ位置の検出や推定を行っていないため、本質的に不安定なシステムであることを示す。そこで、電圧位相の脈動を検出してインバータ出力角速度を補正することにより、システムを安定化する方式を提案する。しかし、電圧位相の変動を検出するためには位置センサが必要となるため、電圧／電流位相差制御では電圧位相の変動を電圧／電流位相差の変動、或いは有効電流の変動から間接的に検出することを検討する。電圧／電流位相差、有効電流の変動を検出し、インバータ出力角速度を補正することでシステムを安定化できることを示し、実験により確認する。

第 5 章では、エアコン室外機圧縮機のインバータ制御に電圧／電流位相差制御を適用することについて検討する。エアコン圧縮機モータには低負荷から高負荷、低回転から高回転までの幅広い運転範囲が求められている。商品の特性として、エアコンでは冷暖房の起動時には非常に高い出力が要求される。その後、室温が設定温度に到達した後は比較的出力の低い

条件で長時間運転されるため、起動時の高速駆動と低速領域での高効率駆動の両立を低コストで実現することが要求される。この要求を満たすため、弱め磁束制御による高速領域の拡大に効果を発揮する「電圧／電流位相差制御による 180 度通電正弦波駆動」と低速領域での省エネルギー化に効果を発揮する「120 度通電矩形波駆動」の異なる二つの駆動方式を組み合わせ、エアコンの運転条件により切換えることで、常に最適な圧縮機モータ駆動となるようなシステムを提案する。

第 6 章では、結論として以上の章の総括を行う。

審査結果の要旨

本論文は、永久磁石同期モータの駆動システムにおいて、モータパラメータや位置推定を必要としないセンサレス制御方式として、モータ電圧とモータ電流の位相差を推定し、その位相差をモータ電圧で制御する電圧／電流位相差制御について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) モータ電圧振幅により電圧／電流位相差を制御することで電流位相を間接的に制御でき、永久磁石同期モータをセンサレス制御できるところを示した。また、電流位相を電圧／電流位相差で制御するために要求されるモータ特性を明らかにし、必要なモータパラメータ条件を示した。
- (2) 電圧／電流位相差をモータ電流の積算値の比から推定する手法を提案し、電流絶対値が不要となるため電流センサ等の特性変動に対してロバストであることを示した。さらに、モータ電流を電流センサで直接検出する代わりに、インバータ母線電流から推定し、電圧／電流位相差を推定する手法を提案した。
- (3) 提案した電圧／電流位相差制御システムにおいて、モータ電流に対して最も効率的にトルクを発生させ、銅損を最小化できる最適な電圧／電流位相差で運転することにより、高効率な正弦波駆動が可能であることを実機実験で確認した。
- (4) 電圧／電流位相差制御システムの安定化手法として、電圧位相の変動を検出してインバータ出力角速度を補正する方式を検討し、電圧位相の変動を電圧／電流位相差の変動、あるいは有効電流の変動から間接的に検出できることを明らかにした。電圧／電流位相差あるいは有効電流の変動を検出してインバータ出力角速度を補正することでシステムを安定化できることを明らかにし、実験により提案安定化手法の有効性を確認した。
- (5) 電圧／電流位相差制御をエアコン圧縮機の制御に適用し、低速領域での矩形波駆動と高速領域での電圧／電流位相差制御による正弦波駆動を組み合わせることで、常に最適な圧縮機モータ駆動となるシステムを提案し、エアコン起動時の高速駆動と低速領域での高効率駆動の両立を低コストで実現した。

以上の研究成果は、永久磁石同期モータの高効率運転をモータパラメータが不要で計算負荷が小さいセンサレス制御方式で実現するものであり、永久磁石同期モータ駆動システムの小型化、低コスト化、信頼性の向上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。

学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。