

# 主論文の要約

論文題目 過変調領域まで動作可能な永久磁石同期モータベクトル制御系におけるフィルタ設計法  
(A Filter Design for Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control Operable also in Overmodulation Region of Inverter)

氏名 中山 陽介

## 論文内容の要約

モータは重要な動力源として運輸用途、産業用途、家電民生用途などの幅広い用途で広く普及している。モータは現在に至るまで、制御方式やパワーエレクトロニクス技術の発達に促されながら、より高性能なものへと発展してきた。昨今では特にモータの回転子に永久磁石を設置した永久磁石同期モータ(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)に注目が集まっている。PMSMは、機械的な接触部が存在しないことに加え、永久磁石の磁束や磁気異方性を活用してトルクを発生させるため、摩擦損や回転子銅損はほとんど発生せず、従来の直流モータや誘導モータと比較して高効率な駆動が可能である。このため、PMSMのさらなる普及拡大が強く要求されている。

しかしながら、PMSMを駆動させるためには可変周波数制御を可能とするインバータが不可欠である。また、PMSMの高効率駆動には、回転子位置に対して適切な位相差を持った電流を流す必要があるため、回転子位置センサおよび電流センサを用いた電流フィードバック制御系を構築する必要がある。このように、PMSMの性能を十分に発揮するためにはインバータや各種センサを伴う駆動装置が必要となる。このため、PMSMを設置する際、駆動装置の増設による設置スペース・コストの増大が問題となる。この問題を原因とし、既存のアプリケーションで使用されているモータを単純にPMSMに置き換えることは困難であり、PMSMの普及拡大が妨げられている。

以上を背景として、PMSM の普及拡大に向けて、PMSM および駆動装置から構成される PMSM 駆動システムの高出力密度化が強く要求されている。

PMSM 駆動システムの高出力密度向上には、PMSM の高速駆動が効果的である。これにより、同一体積の PMSM でもより高出力での駆動が可能となる。また、モータの出力密度向上に伴うモータ体積の縮小により、材料費分のコスト低下も期待できる。しかしながら、PMSM は回転子に永久磁石が含まれており、高速回転時に誘起電圧が高くなるといった特徴があるため、高速回転する PMSM を力行駆動させる際には、インバータの各相電圧がモータ端子電圧を上回るように、高電圧を出力できる大規模な電源装置が必要となる。

バッテリーを電源装置としたモータ駆動システムにおいては、バッテリーセル数を増加させることによって電源電圧を向上させることは可能であるが、バッテリー重量や体積、コストの増大等が問題となる。また、電力網から受電した電力を利用して動作するモータ駆動システムでは商用電源の制約の下での駆動が要求されるため、電源電圧による制約はいっそう厳しいものとなる。

ゆえに PMSM 駆動システムの高出力密度向上には電源電圧による制約を緩和する必要がある。中でも電源電圧利用率を向上させる制御に注目が集まっている。電源電圧利用率を向上するためにはインバータの変調領域に着目した制御が必要となる。インバータには電圧指令値の振幅が搬送波の振幅を下回る線形領域と、電圧指令値の振幅が搬送波の振幅を上回る過変調領域との 2 つの変調領域が存在する。過変調領域ではインバータが非線形なプラントとして振る舞い、コントローラの指令通りの電圧で制御することが不能となることに加え、インバータ出力電圧に大きな低次高調波成分が重畳するといったデメリットがある。しかしながら、過変調領域を用いることにより、同一の電源装置であっても線形領域利用時の約 27%高い基本波電圧でモータを駆動させることができ、モータの高速駆動ならびにモータ駆動システムの高出力密度化を実現できる。

インバータ過変調領域を利用してモータ制御を行うためには、過変調領域において出力電圧に重畳される低次高調波成分への対策が必要となる。これらの低次高調波成分に対して適切な対策を施していない場合、電流制御ループ内で非線形な外乱応答が繰り返し発生し、電流制御性能の劣化や不安定化問題が発生する可能性がある。このため、インバータ過変調領域において出力電圧に重畳される低次高調波成分に対する感度を低減した制御設計が要求される。これを実現する制御系設計として、大きく分けて以下の 2 種類の手法が提案されている。

- (1) 電流フィードバックを停止したフィードフォワード的なトルク制御系を構築する手法
- (2) 低次高調波成分に対する感度を低減した過変調領域まで動作可能な電流制御系を構築する手法

(1) の手法は、制御系から電流フィードバックループを廃することにより、上述の低次高調波成分に起因した非線形な外乱応答に対する感度をなくす手法である。しかしながら、(1)

の手法では、いずれの手法においても電流制御機能を有していないため、電流制約の厳しいアプリケーションに適用することは困難である。

(2)の手法は過変調領域において重畳する外乱成分に対する電流制御系の感度を低減することにより、過変調領域利用時の制御性能劣化を防止する手法である。この手法を用いることにより、過変調領域においても電流制御機能を有する制御系設計が可能となるため、電流制約の厳しいアプリケーションにおいても過変調領域を積極的に活用できるようになる。(2)の手法には、さらに、モデルを用いた手法とフィルタを用いた手法の2つのアプローチが存在する。

モデルを用いたアプローチではインバータモデルとモータパラメータを利用して低次高調波成分の推定・除去を行うことにより、低次高調波成分に対する電流制御系の感度低減が図られる。しかしながら、低次高調波成分の推定精度が各種パラメータに強く依存するため、各種パラメータの把握と高調波成分推定のロバスト性が懸念される。

これに対して、フィルタを用いたアプローチではフィルタによって低次高調波成分を除去する原理上、モータパラメータに依存しない汎用性に優れた手法であり、幅広い用途のモータに容易に適用可能と考えられる。しかしながら、フィルタを用いた手法ではフィルタ係数の設計が重要となるものの、過変調領域を利用したPMSMベクトル制御系ではインバータの非線形性に起因した多くの非線形現象が複合的に発生するため、フィルタ係数の最適化が難しく、フィルタ係数の理想解を導出することを目標としたフィルタ設計法を確立することは極めて困難である。さらに、電流フィードバックループ内にフィルタを設けることによって過渡応答が劣化する問題も発生することから、PMSMベクトル制御系を過変調領域まで動作可能とするためのフィルタ設計法の確立が試みられた事例はなかった。

そこで、本研究では(2)の手法のフィルタを用いたアプローチを基盤とし、フィルタ遮断特性の決定法およびフィルタ適用時における過渡応答の劣化問題を解消するフィルタ設計法を提案することにより、幅広い用途のPMSM駆動システムの高出力密度化を実現する制御手法の確立を図る。

本研究では具体的に以下のような検討を行い、PMSMベクトル制御系を過変調領域まで動作可能とするフィルタ設計法を提案する。

- (a) 過変調領域で除去すべき低次高調波成分の周波数を明らかとする。また、過変調領域では定常状態においても初期値応答が繰り返し発生することに着目した解析を行う。これらの結果を基に、過変調領域を利用するPMSMベクトル制御系に適したフィルタの設計指針を示し、この設計指針に基づきフィルタの遮断特性を決定する。
- (b) モータの回転速度および指令電圧の情報を利用し、電流フィードバックループ内にフィルタを設置した際の過渡応答劣化を緩和する制御系構成を提案する。さらに、本制御構成に(a)で定めたフィルタを適用することにより、PMSMベクトル制御系を過変調領域まで動作可能とするフィルタ設計法を提案する。

以上の検討により、モータパラメータを利用することなく過変調領域で安定な電流制御を可能とし、幅広い用途のモータ駆動システムの高出力密度化に貢献することを目指す。

本論文の構成を以下に示す。

第 1 章では現在に至るまでのモータの発展の歴史と、各部門におけるエネルギー消費量削減に向けたモータ駆動システムへの要求について述べる。

第 2 章では、PMSM の制御に用いられる座標系および PMSM の数式モデルを示す。PMSM を制御するためのベクトル制御と制御システムの構成を示した後、ベクトル制御で過変調領域を利用するために必要となる非線形要素について述べる。

第 3 章では、くし形フィルタを利用した過変調領域まで動作可能なベクトル制御系を提案する。まず、過変調領域で重畳する低次高調波成分の周波数特性を確認し、これを除去するために用いるくし形フィルタの動作原理および実装方法について述べ、実機実験によりその有効性を述べる。また、本手法では制御器を広帯域な設計にした場合に制御性能が大きく劣化する問題が発生することを示す。

第 4 章では、帯域除去フィルタを利用した過変調領域まで動作可能なベクトル制御系を提案する。帯域除去フィルタの伝達関数について述べた後、広帯域なベクトル制御系に帯域除去フィルタを設けて過変調領域を利用した制御を行った場合の制御特性を実験で確認し、フィルタ設計によってはくし形フィルタと同様に制御性能が大きく劣化する条件が存在することを示す。続いて、帯域除去フィルタを設けたベクトル制御系の特性を解析し、制御性能が劣化する原因について述べる。その後、過変調領域利用時における制御性能の劣化を抑えたフィルタ設計法について述べる。最後に、シミュレーションおよび実機実験によりフィルタ設計法の妥当性を確認する。

第 5 章では、フィルタ適用時の電流応答を考慮した制御系構成法および、この構成を利用したフィルタ設計法を提案する。まず、帯域除去フィルタの設置位置を変更することにより電流応答の改善を図った後、加重平均を利用してフィルタ有効度を調節する制御系構成を提案する。さらに、提案した制御系構成と第 2 章または第 4 章で提案したフィルタとを組み合わせることにより、PMSM ベクトル制御を過変調領域まで動作可能とするフィルタ設計法を提案し、シミュレーションおよび実機実験により提案するフィルタ設計法による電流制御性能の改善効果を示す。

最後に、第 6 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。

本研究で提案するフィルタ設計法は、モータパラメータを利用しない汎用性の高い手法であり、幅広い用途における PMSM 駆動システムの出力量を向上でき、PMSM の用途拡大、ひいては各部門におけるエネルギー消費量の削減に貢献するものと考えられる。