

氏 名（本 籍）	やまぐち たかし 山 口 崇（東京都）
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	甲第 870 号
学位授与の日付	平成 27 年 3 月 20 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学 位 論 文 題 目	永久磁石同期モータドライブシステムにおける 周期外乱オブザーバを適用したトルクリプル抑制技術の応用と展開

論 文 審 査 委 員	（主査）教授 星 伸一
	教授 小越 澄雄 教授 木村 真一
	教授 溝口 博 准教授 加藤 清敬

## 論文内容の要旨

本論文は永久磁石同期モータドライブ装置の出力トルクに含まれるトルクリプルの抑制を目的とし、周期外乱オブザーバを発展させた成果をまとめたものである。本論文では永久磁石型同期モータとトルクリプルについて述べた後、トルクリプル抑制に係る近年の手法を解説、比較する。その後、トルクリプル抑制として優位な手法である周期外乱オブザーバの解説とその課題を明らかとした後、これを解決する新たな手法を提案する。

トルクリプルは機械振動および騒音、電動車両などにおける乗り心地の悪化、機械共振と合致した際のこれら影響の拡大、などの問題を引き起こす。この解決にはまず、設計や構造面の工夫からこれを抑制する手段が取られる。しかし、設計限界やコスト増加の懸念がある。一方、制御によるアプローチとして、トルクリプルを打ち消す補償指令をトルク指令や電流指令に重畳して抑制を行う手法も多く検討されている。抑制に係る手法を大別すれば、FF（フィードフォワード）方式と FB（フィードバック）方式に分けられる。電磁界解析によるトルク近似式やモータモデルを用いた補償値を生成する FF 方式では、高応答性・低演算負荷が見込めるが近似・解析誤差が補償誤差となる。FB 方式では高い抑制性能が期待できる一方、各々の方式により異なるが、高周波帯域の制限、制御パラメータの煩雑さ、高次制御モデルの扱い、共振点付近での制御性能、などが課題としてあげられる。

FB 方式の中で優位な制御手法として周期外乱オブザーバ補償法が提案されている。これ

は主要なトルクリプルが回転数に同期した特定周波数成分に発生することから、この特定周波数のみを抑制対象とする抑制方式である。対象とする周波数成分を複素数の形で抽出してこれに対して一般的な外乱オブザーバを構成した手法である。外乱オブザーバではシステムを数式モデルとして表し、出力値にシステムの逆数を乗算して入力値と差し引くことで外乱を推定する。本手法では特定周波数成分のみを対象とするため、システムを複素数モデルとして表して適用する。システムモデルは事前の同定試験などで取得する必要があるが、これにより制御パラメータが簡略化される。比較的単純な制御構成であるにもかかわらず、対象とした周波数に対して高周波帯域でも高い抑制効果を得ることができ、先のFB方式の課題を概ね解決しているといえる。ただし、この制御手法の課題と展開を以下にあげることができる。

- ① 大きなシステムモデル誤差に対する安定性の向上が必要である。
- ② 永久磁石同期モータドライブに適用する際、軸トルクを観測する必要がある。
- ③ 基礎的な制御手法のためトルクリプル抑制以外への応用展開が期待できる。

そこで、この周期外乱オブザーバの課題を解決し発展させることでより優れたトルクリプル抑制効果を獲得することを目的として研究を行った。

本論文では第1章において、論文の概要及びトルクリプル抑制に係る近年の手法を解説、比較する。第2章では本論文で基本とする振動抑制制御手法の周期外乱オブザーバについて解説とその課題・問題点を明らかとする。続く第3章、第4章、第5章の主文においてはこれら周期外乱オブザーバにおける課題を解決し、より高性能・パフォーマンスに優れた提案手法をまとめる。最後に第6章で結論を述べる。以下に本研究の成果概要を述べる。

### 第3章 モデル誤差補正による安定性向上手法の提案

周期外乱オブザーバにおけるシステムモデルについて、ある程度の誤差であればオブザーバのロバスト性により安定性を確保できる。しかし、大幅なモデル誤差についてはこの限りではない。例えば、経年劣化による特性の大きな変化やモータ負荷構成の変更といったシステム特性変化や、初期システム同定の大きな誤差に対してそのロバスト性に懸念がある。この抑制制御系の場合、システムモデルの誤差は抑制完了までの収束時間を増加させ、位相反転している場合は抑制制御自身により振動を増幅し、制御全体を不安定にさせる。

そこで第3章ではモデル誤差補正による安定性向上手法を新たに提案しこの解決を図る。回転数・トルク一定状態において、抑制動作中の補償指令値と振動成分検出値を用いて周期外乱オブザーバにシステムモデル誤差補正機能を付加することで、上記の誤差による問題を解決し、ロバスト性の向上を図る手法を提案する。本件については2手法の研究を行い、①ベクトル軌跡を用いた手法、②簡易システム同定を用いた手法、をそれぞれ提案する。両案ともシミュレーションおよび実機検証では良好にシステムモデル誤差を補正

し、ロバスト性の向上を可能としている。また、①のベクトル軌跡を用いた手法では不十分な補正精度を、②の手法により補正精度向上を達成している。この補正機能の有用性は、システムモデルを有しない場合においても周期外乱オブザーバを適用可能な点であり、システム同定の難しい環境などで有用と考えられる。また、事前システム同定の手間を省くことができる。システム同定は試験や結果の解析などに時間を要するため、作業時間短縮は実運用時において有用である。

#### 第 4 章 周期外乱オブザーバの適用環境拡大に対する提案

永久磁石同期モータドライブへ適用した周期外乱オブザーバによるトルクリプル抑制では、軸トルクをトルクメータにより高精度に計測することがシステム構成上求められる。しかし、一般的な電動機の環境として例えば、近年モータが積極的に用いられる EV/HEV など車両用途ではモータ出力トルクを高精度に計測する必要が低く、設置スペースの都合から高精度トルクメータの設置は稀である。その他用途でもコスト面や設置場所の都合からトルクメータが使用される永久磁石同期モータドライブ用途は少ないと言える。これら汎用的な環境に対しては周期外乱オブザーバの適用条件を満たさないため、手法改善が求められる。

そこで第 4 章では機器コストを増加させ適用環境を限定する要因であるトルクメータを不要とする周期外乱オブザーバの適用環境拡大に関する提案を行う。具体的には、トルクセンサを用いずに、一般環境でも検出されていることの多い速度情報を用いてトルクを推定し、これを周期外乱オブザーバの抑制対象とする手法を提案する。シミュレーションおよび実機の結果から、トルクセンサ時と同程度の抑制効果を確認できた。これによりトルクセンサが用いられない環境においてもトルクリプル抑制が可能となり、周期外乱オブザーバの適用範囲を拡大した。

#### 第 5 章 電流センサ誤差のオンライン補正手法の提案

一般的なインバータ機器では永久磁石同期モータなどの高性能な制御のため、交流出力部に電流センサを設置して、得られた電流値をフィードバックして電流制御を行っている。この電流センサは一般的にセンサ本体と電子回路部で構成され、直線性・ヒステリシス・温度ドリフト・ノイズなどのセンサ本体性能や周辺回路の精度によっては検出値にオフセット誤差とゲイン誤差を生じる。オフセット誤差により電気角周波数と同周波数の高調波電流が  $dq$  軸電流に発生し、ゲイン誤差からは 2 倍周波数の高調波電流を生じる。高調波電流により電流制御性能は劣化し、高調波電流によってトルクに電氣的回転周波数の 1, 2 倍とさらに高次のトルクリプルを引き起こす。これまでセンサ誤差を補正するにはオフライン調整が主な手法であり、ゲイン誤差や動的に変動する誤差への対応は難しかった。

そこで第 5 章では電流センサ誤差により特定次数の高調波電流が発生することに着目し、この高調波を周期外乱オブザーバにより抑制するように検出電流を補正する、電流セ

ンサ誤差のオンライン補正手法を新たに提案する。オフセットとゲイン誤差の同時補正を可能とし、オンラインで誤差補正を行うことで動的な誤差変動にも対応可能である。これらをシミュレーションおよび実機により検証し、提案手法の有効性を示した。また、トルクリプル抑制との併用効果についても検証を行った。本手法により、オンラインで電流センサ誤差補正を行う有用な手法を提案することができた。

## まとめ

本論文では永久磁石同期モータドライブにおけるトルクリプルの抑制を目的とし、周期外乱オブザーバを用いた振動抑制制御系の課題・問題点を対象にこれを解決し、さらに応用を計った新たな制御手法を提案した。これらの新たな手法により、周期外乱オブザーバを適用可能な永久磁石同期モータドライブ用途をよりいっそう広げることが可能となった。このことにより振動やセンサ誤差の無い、高性能な永久磁石同期モータドライブ装置の発展に寄与することができた。

## 論文審査の結果の要旨

永久磁石同期モータは、小型・高出力密度・高効率などモータとして優れた特性を有していることから、その用途が急速に拡大している。この永久磁石同期モータの出力するトルクには、トルクリプルと呼ばれる振動成分が含まれ、機械振動及び騒音などの問題の一因になっている。本論文は、永久磁石同期モータとその駆動装置から構成されるモータドライブ装置の出力トルクに含まれるトルクリプルを抑制する手法の一つである周期外乱オブザーバを用いた振動抑制法を発展させた成果をまとめたものである。

周期外乱オブザーバを用いた方式は、主要なトルクリプルが回転数に同期した特定周波数成分に発生することから、この特定周波数のみを抑制対象とする抑制方式であり、対象とする周波数成分を複素数の形で抽出し、これに対して一般的な外乱オブザーバを構成した手法である。本手法では、システムモデルを事前の同定試験などで取得する必要はあるが、その一方で制御パラメータが簡略化される。周期外乱オブザーバを用いた方式は、比較的単純な制御構成であるにもかかわらず、対象とした周波数に対して高周波帯域でも高い抑制効果を得ることができる。しかし、本論文以前に、次の課題があった。①大きなシステムモデル誤差に対する安定性の向上が必要である。②モータドライブに適用する際、軸トルクを観測する必要がある。そこで、本論文では、この周期外乱オブザーバの課題の解決法を示している。また、周期外乱オブザーバを用いた制御法は、基礎的な制御手法であるためトルクリプル抑制以外への応用展開が期待できることから、本論文ではこの手法を発展させることでより優れたトルクリプル抑制効果の獲得を目的として行われた研究の成果も示されている。

本論文は6章から構成されている。

第1章は序論であり、永久磁石同期モータの分類、制御法、及び基本的な利用手段について述べた後、トルクリプル抑制の必要性、これまでに提案されているトルクリプルの抑制手法の比較を述べることで、本研究の必要性が明らかにされている。

第2章では、本論文の基本となる振動抑制制御手法の周期外乱オブザーバに関する解説が行われ、その課題・問題点が明らかにされている。

第3章では、明らかにされた課題解決のため、回転数・トルク一定状態において、抑制動作中の補償指令値



と振動成分検出値を用いて周期外乱オブザーバにシステムモデル誤差補正機能を付加することでロバスト性の向上を図る2つの手法が提案され、シミュレーションおよび実機検証により、良好にシステムモデル誤差を補正し、ロバスト性の向上が可能であることが示されている。この補正機能の有用性は、システムモデルを有しない場合においても周期外乱オブザーバを適用可能な点にあり、システム同定の難しい環境などでこの機能は有用であると考えられる。また、時間及び手間の掛かる事前システム同定を省くことができるなどの利点もある。

第4章では、これまでシステム構成上求められていたトルクセンサを用いずに、一般環境でも検出されていることの多い速度情報を用いてトルクを推定し、これを周期外乱オブザーバの抑制対象とする手法が提案されている。提案手法の有効性は、シミュレーションおよび実機を用いた実験結果により、トルクセンサ使用時と同程度の抑制効果が得られることにより確認されている。提案手法により、トルクセンサが用いられない環境においてもトルクリプル抑制が可能となり、周期外乱オブザーバの適用範囲の拡大が期待できる。

第5章では、永久磁石同期モータの駆動に用いるインバータに取り付けられている電流センサの誤差により特定次数の高調波電流が発生することに着目し、この高調波を周期外乱オブザーバにより抑制することで検出電流を補正する、電流センサ誤差のオンライン補正手法を新たに提案している。提案手法では、オフセットとゲイン誤差の同時補正を可能とし、オンラインで誤差補正を行うことで動的な誤差変動にも対応可能である。この提案手法についても、シミュレーションおよび実機実験により検証され、提案手法の有効性が示されている。また、前章までに示されているトルクリプル抑制手法との併用効果についても検証が行われている。

第6章では、結論として、本研究による成果の概要が述べられている。

本論文で得られた成果は、近年、利用が拡大している永久磁石同期モータドライブシステムのトルクリプルを抑制する手法の一つである周期外乱オブザーバを用いた手法における課題を、モデル誤差補正による安定性向上手法、及びトルクセンサを不要とする制御手法の提案により解決したほか、この手法を電流センサ誤差のオンライン補正手法へ発展させたことである。このことは、高性能なモータドライブ装置の発展に寄与するものである。よって、博士（工学）の論文として合格と認める。