

審査の結果の要旨

氏名 兼松 正人

本論文は、「周波数特徴に基づいたモータドライブシステムにおける振動抑制制御に関する研究(Study on Vibration Suppression Control in Motor Drive System Based on Frequency Domain Characteristics)」と題し、車載モータ及び精密位置決め機器の高性能化・静音化のための制御技術を取り扱ったものである。そのために周波数特徴に基づく永久磁石同期電動機 (Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM) の半径方向電磁加振力 (ラジアル力) のモデル化及びそのモデルに基づく制御手法、また周波数特徴に基づく一般化 KYP 補題 (Generalized Kalman-Yakubovich-Popov Lemma) を拡張及び応用した広帯域な振動抑制制御手法を提案し、その有効性を実証したもので、日本語で記述された全 10 章と付録により構成されている。

第 1 章「序論」では、メカトロ機器における音振動現象及びその対策法に関して振り返り、周波数特徴に基づく制御理論が音振動抑制に大きな可能性があることを明らかにし、本研究の位置づけを行っている。

第 2 章「GKYP 補題と GKYP 補題に基づく制御器設計法」では、まず GKYP 補題に関して説明を行っている。また、GKYP 補題をどのように制御器設計問題に適用可能であるかについて、開ループ整形問題と繰返し設計問題の設計例を用いて説明している。

第 3 章「Parametric GKYP 補題と Parametric GKYP 補題に基づく制御器設計法」では、B-スプレインを用いた Parametric LMI (Linear Matrix Inequality) 緩和手法を用いることで Parametric GKYP 補題に基づく制御器設計手法を提案している。特に、応用上重要なパラメータ変動にロバストな開ループ整形手法、ゲインスケジュールド開ループ整形手法及び一般化繰返し制御のトレードオフ曲線という問題を統一的に解く枠組みを構築している。

第 4 章「永久磁石同期電動機のラジアル力モデル化のための予備知識」ではモータ内部の電磁加振力起因で発生する音振動現象に関する先行研究及びモータの基礎理論について述べており、永久磁石同期電動機の音振動現象に関する先行研究を詳細に分類し、先行研究の立ち位置と本研究の立ち位置を明確化している。

第 5 章「空間磁束分布に基づいた電気角 2 次ラジアル力のモデル化及び制御理論」では、半径方向電磁加振力 (ラジアル力) の主成分である電気角 2 次ラジアル力の数理モデルを導出している。導出に際し、空間の磁束分布に基づきラジアル力の簡易な数式モデルを構築する。数式モデルはシミュレーションによって詳細に妥当性の検証がなされている。

第6章「鎖交磁束に基づいた電気角6次ラジアル力のモデル化及び制御理論」では、ラジアル力の高調波成分として支配的な電気角6次ラジアル力成分の数理モデル及びその制御手法を提案している。鎖交磁束に着目して電磁石を解析する際に用いる近似式を適用することで簡易な数理モデル及びそのモデルに基づく制御理論を実現している。

第7章「HDD位置決め制御における応用～HDD位置決め制御のGKYP設計法～」ではGKYP設計法を応用することで低振動・高性能なHDD(Hard Disk Drive)位置決め制御器を構築している。まずHDD位置決め制御ではノッチフィルタと位相進み補償器の干渉が制御器の広帯域化を阻害していることを述べ、GKYP設計法を応用しノッチフィルタと位相進み補償器の同時最適化を行うことでシステムを不安定化することなく広帯域な制御器を実現している。

第8章「PMSMドライブシステムにおける応用～高調波電流制御のGKYP設計法～」ではPMSMモータドライブシステムにおいてGKYP設計法を応用することで高調波電流脈動を低減する高調波電流制御器設計手法を提案している。ロバスト安定性のための高周波数域での低ゲイン化と外乱抑圧周波数での高ゲイン化の両立をGKYP補題を用いて実現しており、実機検証にて本手法の有効性を検証している。

第9章「PMSMドライブシステムにおける応用～モデルに基づくラジアル力抑制制御～」ではラジアル力のモデル化に基づくラジアル力制御の効果を実機にて検証している。まず、2次のラジアル力制御の効果検証を行い2次のラジアル力に起因する振動が低減することを示している。次にdq軸高調波電流を注入することで6次のラジアル力に起因する振動の大幅な低減を実現している。更に回転数を上げた際には第8章で検討を行った一般化繰返し制御を用いて電流制御器の帯域向上を行い、中速域での6次ラジアル力制御を実現している。最後に2次及び6次ラジアル力の同時制御に関して検討を行い有効性を検証している。

第10章は結論であり、本研究の成果と今後の展望をまとめている。最後に付録として、提案手法の有効性を実験及び解析において検証するために開発した実験環境及び解析環境の詳細を記している。

以上これを要するに、本論文は、モータドライブシステムにおける周波数特徴に基づき、ラジアル力のモデル化及びその制御法、GKYP補題、Parametric GKYP補題に基づき理論上達成可能な性能を実現する制御器設計理論、及びHDD位置決め制御や高調波電流制御、ラジアル力制御などの産業上重要かつ複雑な問題への応用法を確立することにより、本手法が大学研究の枠組みにとどまるものではなく産業界においても大いに有用であることを実証したものであって、電気工学、制御工学、電気機器学、振動工学への貢献が少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。