

2023年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	秋田大学 大学院理工学研究科
職位または役職	講師
氏名	高橋 翔太郎

1. 研究題目

モータドライブシステムにおける放射ノイズを抑制可能な入出力結合パッシブ EMI フィルタの開発

2. 研究目的

本研究では、伝導および放射ノイズ規制帯域(150 k~300 MHz)において、所望の減衰特性を実現する入出力結合パッシブ EMI フィルタ設計法の確立を目指す。

モータドライブシステムにおいて、インバータの入出力ケーブルは、コモンモード(CM)電流に起因する放射ノイズのアンテナとして機能する(図 1)。従って、放射ノイズの抑制には、シールドケーブルの使用や、インバータの入出力双方に EMI(電磁障害)フィルタを接続し、ケーブルを伝搬する CM 電流を抑制するなどの対策が採用される。しかし、これらの対策は、システム全体の体積・重量・コストを増加させる。

報告者は前年度までに、磁気結合を活用し、インバータの入出力に接続したコモンモードインダクタ(CMI)を単一の磁気部品に統合し、EMI フィルタの体積削減を実現できる入出力結合パッシブ EMI フィルタ(図 2)を提案した。また、提案フィルタが、モータ

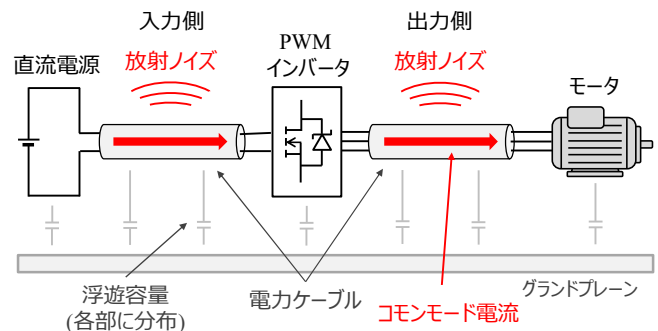


図 1: モータドライブシステムにおける放射ノイズ

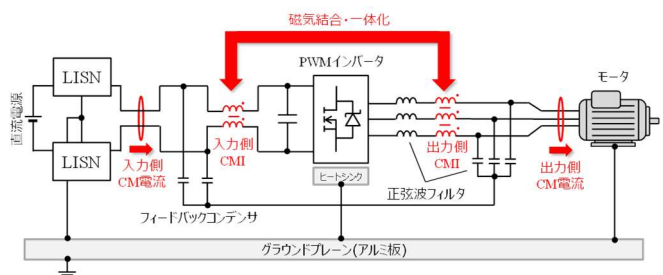


図 2: 入出力結合パッシブ EMI フィルタを接続した実験用モータドライブシステムの構成

ドライブシステムの入出力ケーブルを伝搬する CM 電流を効果的に抑制できることを実証した。一方で、提案フィルタの放射ノイズ規制帯域(30 M~300 MHz)における CM 電流抑制効果は評価されておらず、この帯域において所望の減衰特性を有するフィルタ設計法も確立されていない。

一般に、CMI は複雑な周波数特性を示し、EMI フィルタの高周波帯域における減衰性能を制限する素子である。このため、数十 MHz 以上の帯域では、CMI の周波数特性を考慮したフィルタ設計が重要となる。そこで、本研究において、報告者がこれまでに提案したインダクタの浮遊容量推定法と広帯域シミュレーションモデルを CMI の設計に導入する。前年度までに確立した CMI の最小体積設計法と組み合わせ、放射ノイズ規制帯域まで所望の CM 電流減衰特性を有する入出力結合パッシブ EMI フィルタの最小体積設計法を確立する。本研究により、伝導・放射ノイズ規制を満たすためのフィルタ部品点数の削減と、非シールドケーブルの採用を可能とし、モータドライブシステムの体積・重量・コスト削減に大きく寄与する。

3. 研究内容及び成果

今年度はまず、前年度までに構築した実験システム(図 3)の各部インピーダンスを、ネットワークアナライザを用いて測定した。測定結果に基づき、システム各部のコモンモード(CM)等価回路モデルを同定し、それらを組み合わせることで、実験システム全体の CM 等価回路モデルを構築した。加えて、入出力パッシブ EMI フィルタ(PEF)を構成するコモンモードインダクタ(CMI)を、パーミアンス-キャパシタンスアナロジに基づきモデリングした。CMI のモデルについては、使用する磁性コアの複素透磁率の周波数依存性を、ネットワークアナライザを用いて測定し、測定結果に対してカーブフィッティングを施すことで、広帯域にわたる周波数依存性を再現した複素パーミアンスを導入した。これにより、放射性 EMI 帯域に渡す CMI のインピーダンスを再現した。

実験システムの CM 等価回路モデルに、CMI のモデルに基づく入出力結合 PEF のモデルを導入することで、フィルタの減衰量をシミュレーションできる環境を整えた。シミュレーションに基づき、所望の減衰特性を有する入出力結合 PEF を設計・試作し、実験システムに接続した際のインバータ入出力の CM 電流を、広帯域カレントモニタプローブとスペクトラムアナライザを用いて、測定した。測定は、磁気結合により、入出力の CMI を単一の磁気部品に統合した条件、磁気結合を活用せずに、入出力にディスクリット構成の CMI を接続した条件において実施し、フィルタを接続しない条件における測定結果と比較することで、フィルタが有する入出力 CM 電流減衰性能を評価した。測定結果より、MHz 帯域において、磁気結合を活用した条件がディスクリット構成よりも減衰量が低下することが明らかとなった。このことは、放射性 EMI 規制帯域にわたる高周波領域における入出力結合 PEF の減衰性能の劣化を示唆している。そこで本年度は、入出力結合 PEF の高周波領域における減衰特性の劣化要因に関する検討をおこなった。

まず、図 4 に示す簡易 CM 等価回路モデルを用いた検討を実施した。モデルは、実験システムに入出力結合 PEF を接続した条件を再現している。このモデルを、汎用回路シミュレータ LTspice

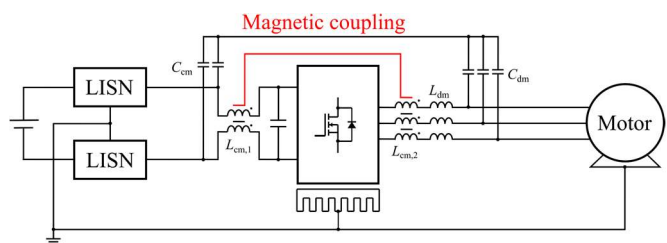


図 3: 実験システムの構成

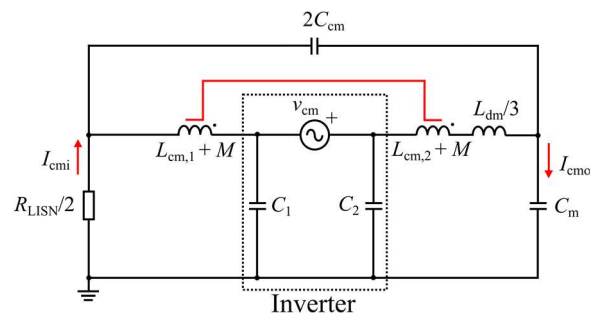


図 4: 実験システムの簡易 CM 等価回路

上に構築し、シミュレーションをおこなった。シミュレーション結果から、インバータの入出力に分布する浮遊容量、またはインバータ入出力に接続するフィルタインダクタのインダクタンスの値が不平衡である条件において、入出力結合 PEF の高周波減衰特性が大きく劣化することが明らかとなった。また、インバータの入出力に接続する CMI の結合率を低くすることで、回路不平衡条件における高周波特性を改善できることを確認した。

そこで、ディスクリット条件、密結合条件、疎結合条件の CMI を用いた PEF をそれぞれ実験システムに接続した条件において、入出力 CM 電流の再測定をおこなった。測定結果(図 5,6)より、インバータの入出力に接続した CMI の結合を疎にすることで、高周波領域の減衰特性がディスクリット条件に近づくことが明らかになった。

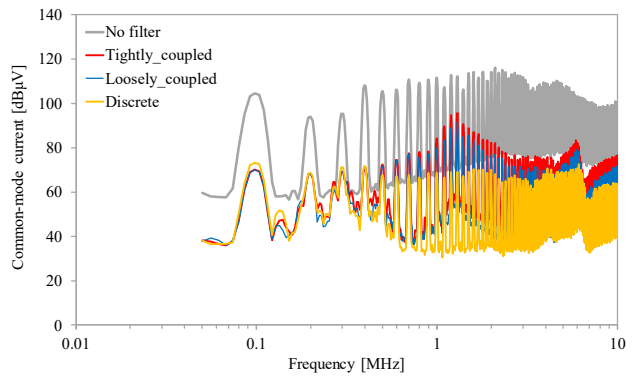


図 5: 入力側 CM 電流測定結果

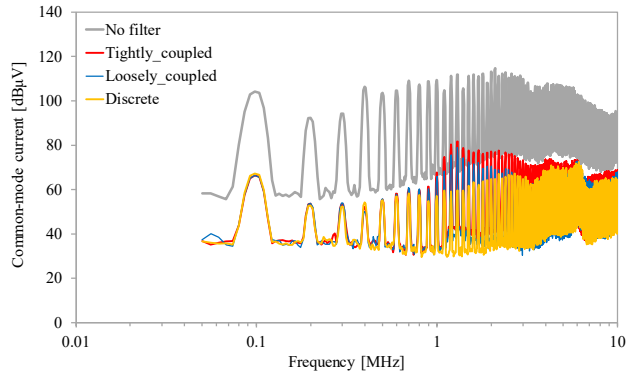


図 6: 出力側 CM 電流測定結果

4. 今後の研究の見通し

今年度実施した検討により、磁気結合を活用した CMI において、入出力 CMI の結合率を疎にすることで、高周波特性が改善することが明らかとなった。今後は、コア形状、磁性材料などを様々に変更し、入出力結合 PEF に適切な CMI の設計について検討をおこなう。磁気結合を疎とすることで、CMI に正弦波フィルタの各相リアクトルを統合できる可能性が示唆される。各相リアクトルと CMI の統合についても今後の重要な研究テーマとなりうる。また、入出力の磁気部品を結合する本方式を、モータ駆動システムのみならず、DC-DC コンバータなど、他のアプリケーションへ展開することについても今後、検討をおこなう予定である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読付)

電気学会産業応用部門英文論文誌へ投稿予定

国際会議(査読付)

1. S. Takahashi, and K. Wada, "Permeance-Capacitance Analogy-Based Wideband Small-Signal Model of Three-Phase Common-Mode Inductors," The 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) 2023, IECON23-001162, 2023.
2. S. Takahashi, "Input/Output Coupling Passive EMI Filter in Motor Drive Systems Using the Non-Zero Sequence Inductor," The 2024 IEEE Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity: EMC Japan/Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Japan/APEMC Okinawa), #1570981432, 2024.

国内会議(査読無)

1. 高橋翔太郎:「回路不平衡が入出力結合パッシブ EMI フィルタの減衰特性へ与える影響についての検討」, 令和 6 年電気学会産業応用部門大会, 1-80, 水戸, 2024 年 8 月.
2. 高田洋平, 高橋翔太郎:「非絶縁型コンバータにおける磁気結合を活用した入出力コモンモードノイズ抑制法」, 令和 6 年電気学会産業応用部門大会, Y-2, 水戸, 2024 年 8 月.

受賞

1. 高橋翔太郎, 電気学会産業応用部門 若手論文発表奨励賞, 2024 年 3 月.