

2022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

コモンモードノイズ抽出回路を用いた入出力結合パッシブ EMI フィルタの小型化

2. 研究目的

本研究は、ノイズ電流に対してのみ低インピーダンスの伝搬経路となるコモンモードノイズ抽出回路を用いて、前年度に提案したモータ駆動システムにおける入出力結合パッシブ EMI(電磁障害)フィルタの小型化を目的とする。

モータ駆動システムでは、インバータとモータ、および電源を接続するケーブルをコモンモード (CM)電流が伝搬する。また、これらのケーブルは、放射ノイズのアンテナとしても機能する。このため、ケーブルを伝搬する CM 電流を抑制することで、伝導ノイズおよび放射ノイズに起因する EMI を防ぐことができる。このとき、インバータの入出力に EMI フィルタを接続することが最も簡易な対策と考えられるが、システム全体の体積・重量の増大を招く。

一般に、EMI フィルタ構成素子の内、コモンモードインダクタ(CMI)が最も体積を占める構成部品となる。インバータ入出力双方に EMI フィルタを接続することで、CMI が 2 つ必要となる。これらの CMI を磁氣的に結合させ、1 つの磁気部品に統合することで、CMI の個数削減と EMI フィルタ全体の体積削減を達成できる入出力結合パッシブ EMI フィルタ(図 1)を前年度に提案した。また、実験により提案フィルタが、モータ駆動システムの入出力双方の CM 電流を効果的に抑制できることを示した。一方で、この方式では図 1 に示すように、三相インバータの線間に接続したコンデンサの中性点を CM 電流還流経路として使用していた。このため、インバータの出力に過大な循環電流が流れるのを防ぐため、インバータ各相にリアクトルを接続している。これらのリアクトルは、インバータ出力電流が流れても磁気飽

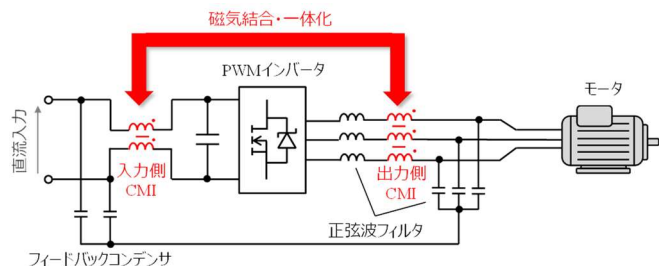


図 1: 前年度提案した
入出力結合パッシブ EMI フィルタの構成

和を避ける設計のため、モータ定格とともに体積が大型化する。このため、前年度提案したフィルタは、大容量のモータ駆動システムへの適用が困難であった。

本研究では、図 2 に示すように、リアクトルの代替として CM 抽出回路を用いることで、入出力結合パッシブ EMI フィルタの小型化を目指す。CM ノイズ抽出回路は、3 組のトランスから構成され、インバータ電流には高インピーダンス、CM 電流には低インピーダンスの素子としてふるまう。このため、CM 抽出回路を流れる電流はほぼ CM 成分が支配的となり、インバータ出力に接続するリアクトルを用いる方式と比較して、フィルタを小型化できる。提案構成により、入出力結合パッシブ EMI フィルタのより広範な対象への適用を実現する。

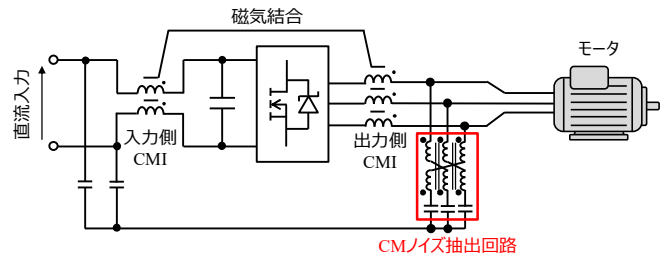


図 2: CM ノイズ抽出回路を用いた入出力結合パッシブ EMI フィルタ

3. 研究内容及び成果

本研究では、下記の項目に従い、モータ駆動システムにおける CM ノイズ抽出回路を用いた入出力パッシブ EMI フィルタの設計法の確立、および入出力 CM 電流に対する減衰特性の評価を実施した。前年度に構築したモータ駆動システムを対象とし、そのシミュレーションモデルを回路シミュレータ上に構築する。シミュレーションに基づき、フィルタの基本原理を確認し、設計法を確立した。確立した設計法に基づき試作したフィルタをモータ駆動システムに実装し、フィルタの入出力 CM 電流に対する減衰特性を評価した。

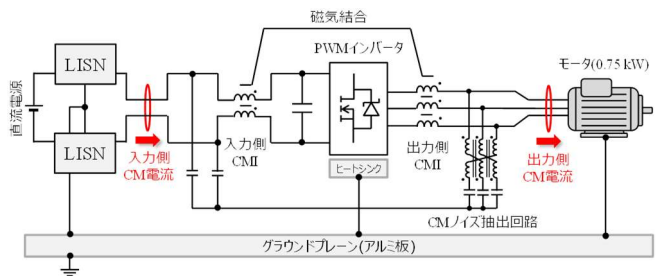


図 3: 検討対象のモータ駆動システム

項目 1: シミュレーションモデルの構築

本研究は、図 3 に示す前年度構築したモータ駆動システムに基づき、検討をおこなった。システムは、直流電源、擬似電源回路網(LISN、電源側のインピーダンスを安定化させるために必要)、PWM インバータ、0.75 kW 誘導モータから構成される。また、構成機器はすべて、木製の机にアルミ板を敷いたグラウンドプレーン上に配置した。インピーダンスアナライザを用いて、各構成要素の周波数特性を測定し、回路シミュレータ PSIM 上にシミュレーションモデルを構築した。

項目 2: シミュレーションに基づくフィルタ設計法の確立

シミュレーションに基づき、提案フィルタの入出力 CM 電流の抑制原理を明確にした。また、CM ノイズ抽出回路に流入するインバータ出力電流および CM 電流をシミュレーションによって得た。シミュレーション結果から、CM ノイズ抽出回路を構成する各トランスに要求される仕様を明確化し、CMI を含むフィルタ全体の設計手順を確立した。

項目 3: 提案フィルタの入出力 CM 電流減衰特性の評価

項目 2 で確立した設計手順に基づき試作したフィルタをモータ駆動システムに実装した。高周波電流プローブとスペクトラムアナライザを用いて、図 3 に示す測定点を伝搬する入出力 CM 電流を測定した。磁気結合を活用せず、入出力双方に CMI を接続した構成のフィルタ(ディスクリットフィルタ)と減衰特性を比較し、提案フィルタの性能を評価した。図 4 に製作した各 CMI の写真を、図 5 に製作した CM ノイズ抽出回路の写真を、図 6 に測定した入出力 CM 電流をそれぞれ示す。

図 6 より、ディスクリットフィルタは 2 MHz 付近に共振点を有しているものの、100 kHz~50 MHz の帯域で各 CM 電流を大きく抑制していることが分かる。これは、実験システムに構成されるすべての CM 電流ループに CMI が配置されることに起因する。提案する入出力結合パッシブ EMI フィ

ルタは、2 MHz 程度まではディスクリットフィルタと同等の減衰特性を有している。しかし、以降の帯域では大きな減衰特性は得られていない。従って、提案フィルタの基本原則(フィルタ点数・体積を削減しつつ同等の減衰特性を達成)は確認できたが、高周波領域での減衰特性悪化要因については、今後の検討課題である。

4. 今後の研究の見通し

本研究において、提案フィルタの入出力 CM 電流抑制効果が高周波領域で悪化した要因について、現状では以下の 2 つが考えられる。

・入出力結合 CMI の結合

LTspice における簡易シミュレーションにより、インバータの浮遊容量と入出力結合 CMI の結合率が、減衰性能に密接に関係していることをこれまでに明らかにしている。今後は、CMI の結合率についても考慮に入れた設計法について検討をおこなう。

・非零相インダクタの設計

前年度提案したフィルタ構成では、非零相インダクタではなく、正弦波フィルタを使用し、その中性点をインバータ入力中点へフィードバックしていた。従って、非零相インダクタが正常に機能せず、CM 電流の低インピーダンス経路を高周波領域において確保できていない可能性がある。従って、非零相インダクタの各伝搬モードに対応した伝達特性の測定や、設計の見直しも含めた、再検討が必要である。

また、提案フィルタの放射ノイズ抑制効果についても評価をおこなう。モータ駆動システムでは、入出力ケーブルが放射ノイズのアンテナとして機能する。このため、CM 電流の入出力ケーブルへの伝搬を抑制することで、モータ駆動システムが発生する放射ノイズを効果的に抑制できることが期待できる。従って、30 MHz 以上の放射ノイズ規制帯域における入出力結合パッシブ EMI フィルタの入出力 CM 電流抑制効果の評価、および電波暗室における放射ノイズ抑制効果の評価を今後実施する予定である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読付)

オープンアクセスジャーナル IEEE Access へ投稿を予定。

国内会議(査読無)

高橋翔太郎, 前川佐理:「非零相インダクタを用いた入出力結合パッシブ EMI フィルタ」, 令和 4 年電気学会半導体電力変換研究会, EMC-21-039, SPC-22-210, 名古屋工業大学, 2022 年 12 月.

受賞

高橋翔太郎, 電気学会 優秀論文発表賞(産業応用部門), 2023 年 9 月.

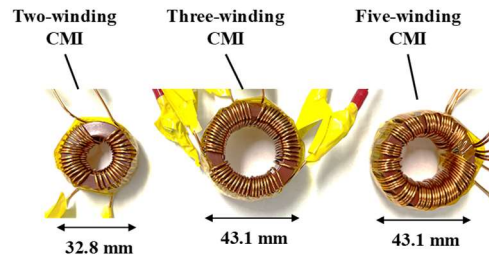


図 4: 製作した CMI の外観

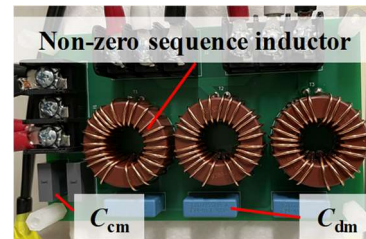
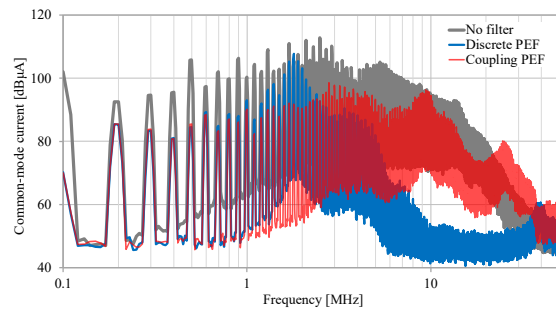
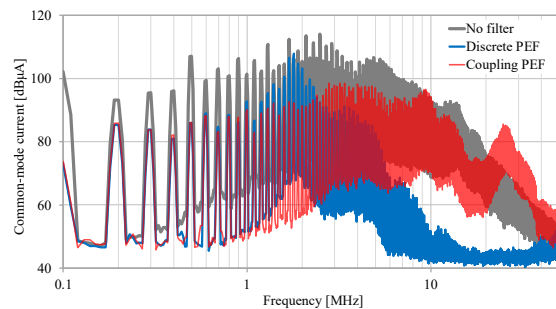


図 5: CM ノイズ抽出回路の外観



(a)



(b)

図 6: CM 電流測定結果
(a)出力側 (b)入力側