

2021 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	成蹊大学 理工学部 理工学科
職 位 または 役 職	助教
氏 名	高橋 翔太郎

1. 研究題目

モータ駆動システムにおける磁気部品を統合した入出力コモンモード電流抑制法

2. 研究目的

本研究は、放射ノイズの抑制のためにモータ駆動システムの入出力双方に設置されるノイズフィルタのインダクタを磁氣的に結合させた新しい構成のフィルタを提案し、フィルタ全体の大幅な小型化の達成を目的とする。

近年、炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)などに基づく、次世代パワー半導体デバイスのモータ駆動システムへの実用化が進んでいる。これらのデバイスの採用によるスイッチング速度の高速化、およびスイッチング周波数の高周波化は、電力変換器が発生する電磁ノイズの高周波化・広帯域化を招く。このため、従来、モータ駆動システムにおいてほとんど検討されていない放射ノイズについて、その発生メカニズムや効果的な抑制法を検討する必要性が高まっている。

図 1 に示すように、モータ駆動システムが発生する放射ノイズは、入出力ケーブルを伝搬する高周波コモンモード(CM)電流が主な発生源である。このため、シールドケーブルの採用により、放射ノイズを大幅に低減できるが、航空機などのアプリケーションでは、シールドケーブルを使用せず、フィルタを使用することがコストや重量の観点から好ましい。この場合、入出力双方のケーブルを伝搬する CM 電流を低減するには、モータ駆動用インバータの入力側と出力側の両方にフィルタを構築する必要がある。しかし、入出力側双方へのフィルタの設置、特に主要なフィルタ素子であるコモンモードインダクタ(CMI)を 2 つ必要とすることは、フィルタのサイズ・重量・コストの増加が問題となる。

本研究では、図 2 に示すように、モータ駆動システムの入出力双方に挿入される CMI を磁氣的に結合させた新しい構成のフィルタを提案する。磁気結合を積極的に活用することで、CMI の個数削減と必要インダクタンスの削減を同時に達成する。提案構成により、モータ駆動システムが発生する入出力 CM 電

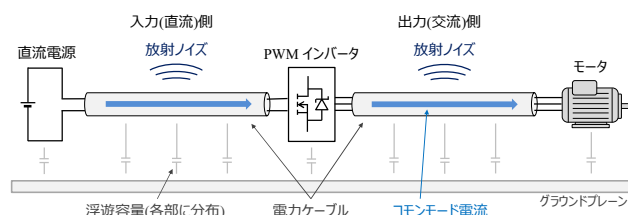


図 1: モータ駆動システムにおける放射ノイズ

流を大きく抑制できること、フィルタの大幅な小型化を実現できることを示し、モータ駆動システムへの次世代パワーデバイスの普及を促進する。

3. 研究内容及び成果

本研究は、大きく以下の項目に沿って実施した。

実験システムの構築

はじめに、本研究の検討対象とするモータドライブシステムを大学研究室にて構築した。構築した実験システムの構成を図 3 に示す。直流電源、三相 PWM インバータ、およびモータはグランドプレーンを模したアルミ板の上に配置した。また、直流電源とインバータは、電源側インピーダンスの安定化のため、LISN を介して接続した。なお、モータとインバータは厚み 5 cm 程度の発泡スチロールを用いてアルミ板上に配置している。モータケース、およびインバータのヒートシンクは 10 cm 程度の接地線を介してアルミ板に接続した。

フィルタ基本原理の確認

次に、実験システムの簡易コモンモード(CM)等価回路を用いて、以下に示す提案フィルタの入出力 CM 電流抑制原理を明確にした。まず、この実験システムにおいて、モータ巻線・モータケース間浮遊容量とパワーデバイス・ヒートシンク間浮遊容量を介して CM 電流が伝搬する。本研究においては、正弦波フィルタの midpoint を、Y コンデンサを介して直流 midpoint に接続し、インバータの出力側のみにコモンモードインダクタ(CMI)を接続する構成を従来構成のパッシブ EMI フィルタ(PEF)としている。従来構成では、前述のモータの浮遊容量を介して伝搬する CM 電流を大きく抑制することができるが、ヒートシンクの浮遊容量を介して伝搬する CM 電流(図 3 における I_{CMh})に対する抑制効果は小さい。結果として、出力側 CM 電流(図 3 における I_{CMo})は大きく抑制できる一方で、入力側 CM 電流(図 3 における I_{CMi})は効果的に抑制できない。

対して、図 4 に示す提案フィルタでは、インバータの入力側と出力側に接続した CMI を磁気的に結合している。これにより、従来構成と磁気部品の点数は変化させずに、実験システムにおける全ての CM 電流伝搬経路に CMI が配置される。結果として、提案する入出力結合 PEF は、実験システムにおける入出力 CM 電流を効果的に抑制できる。

フィルタの CM 電流抑制性能の評価

従来構成および提案構成の PEF を製作し、それぞれ実験システムに接続した際の入出力 CM 電流に対する抑制性能を実験的に評価した。図 5 に、提案 PEF を実験システムに接続した際の外観を示す。本研究では、出力側 CM 電流、入力側 CM 電流、およびヒートシンク CM 電流を広帯域電流プローブで測定し、評価対象とした。なお、実験ではインバータの直流入力電圧を 200 V、スイッチング周波数を 100 kHz、出力周波数を 50 Hz、変調率を 0.5 に設定した。

図 6~8 に測定した各 CM 電流の周波数スペクトルを示す。まず、従来構成の PEF では、出力

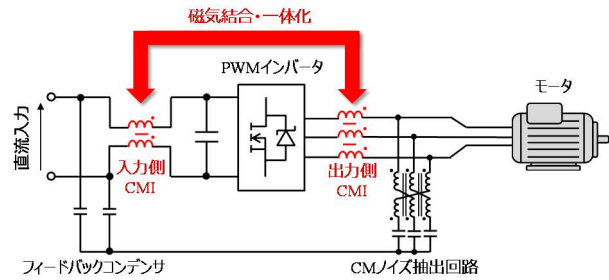


図 2: 磁気結合した CMI に基づく提案フィルタの構成

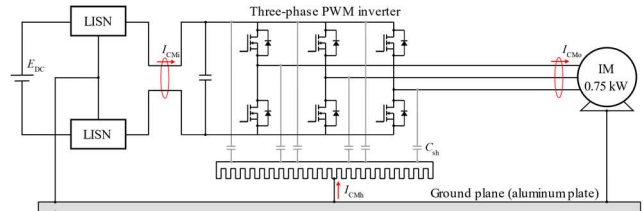


図 3: 実験システムの構成

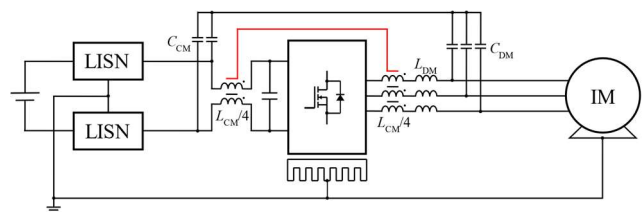


図 4: 実験システムに接続した提案フィルタ

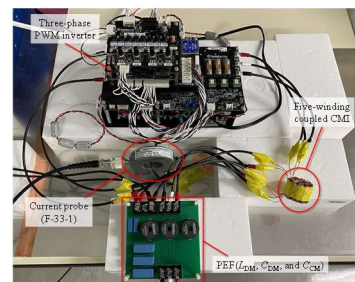


図 5: 実験システムに接続した提案フィルタの外観

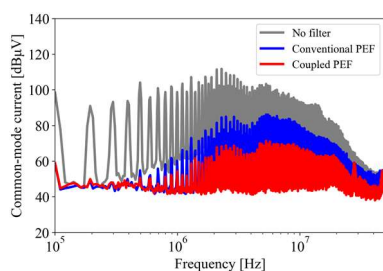


図 6: 出力側 CM 電流

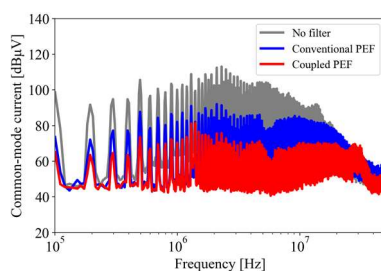


図 7: 入力側 CM 電流

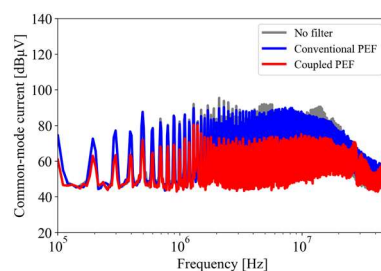


図 8: ヒートシンク CM 電流

側 CM 電流を 100 kHz から 40 MHz 程度までの広帯域に渡り大きく抑制していることが図 6 よりわかる。一方で、図 7 に示すように、入力側 CM 電流に対する減衰量は、特に 2 MHz 程度までの帯域において、出力側 CM 電流に対する減衰量と比較して小さい。このことは、図 8 に示すヒートシンク CM 電流を従来構成の PEF がほとんど抑制できていないことに起因する。

提案構成の PEF は、従来構成と比較して、広帯域に渡り入出力双方の CM 電流をさらに大きく抑制している。この結果は、図 8 から確認できるように、提案構成ではインバータの入出力双方に CMI が接続されることで、ヒートシンク CM 電流を大きく抑制していることに起因する。

以上、本研究成果により、提案する磁気結合を活用した PEF が、従来構成の PEF に対して CMI の体積・個数を増加させる変化させることなく、モータドライブシステムの入出力 CM 電流を効果的に抑制できることを実証した。

4. 今後の研究の見通し

本研究にて提案した PEF では、CM 電流のバイパス経路を設けるために正弦波フィルタを採用している(図 4)。一般に、正弦波フィルタを構成する交流リアクトルは、システムの大容量化とともに大型化する。このため、インバータの入出力双方の CM 電流が厳しく制限される電動航空機などのアプリケーションにおいては、交流リアクトルのサイズがボトルネックとなり、本研究で提案した PEF の適用が難しいと考えられる。このため、図 9 に示す非零相インダクタを用いた PEF を提案する。非零相インダクタは、インバータの相間を伝搬する電流に対してのみハイインピーダンス素子としてふるまう。このため、正弦波フィルタを採用する方式と比較して、PEF の小型化が期待できる。今後は、非零相インダクタを採用した PEF の入出力 CM 電流抑制性能の評価、大容量システムに適用した際の体積・重量評価などの検討をおこなう。

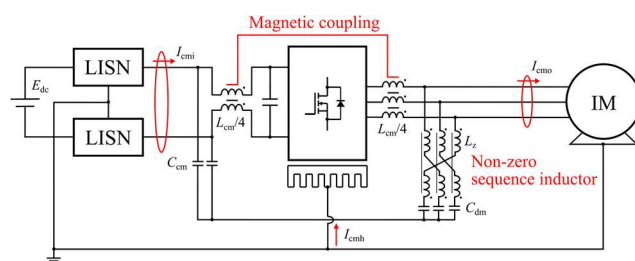


図 9: 非零相インダクタを採用したフィルタ構成

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読あり)

1. S. Takahashi, S. Maekawa, "Attenuation Characteristics of the Input/Output Coupling Passive EMI Filter on Conducted Emission in Motor Drive Systems," *IEEE Journal of Industry Applications*, vol. 11, no. 5, pp. 709-710, 2022.

加えて、IEEE Transactions on Industry Applications へ投稿予定。

国際会議(査読あり)

1. S. Takahashi, and S. Maekawa, "Reduction of input- and output-side common-mode currents based on a coupled common-mode inductor in DC-fed three-phase motor drive systems," *The 2022 International Power Electronics Conference (IPEC2022-ECCE Asia)*, Himeji, Japan, pp. 2529-2534, May 15-19, 2022.

国内学会(査読なし)

1. 高橋翔太郎, 前川佐理:「モータドライブシステムにおける入出力結合パッシブ EMI フィルタの雑音端子電圧減衰特性」, 令和 4 年電気学会全国大会, 4-059, web 開催, 2022.
2. 高橋翔太郎, 前川佐理:「モータドライブシステムにおける入出力結合パッシブ EMI フィルタ」, 令和 3 年電気学会半導体電力変換研究会, EMC-21-045, SPC-21-165, ハイブリッド開催, 2021.