

# 電流型 ACC 併用によるパッシブ EMI フィルタの小型化

大倉 惇稔\* 渡辺 大貴 日下 佳祐 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

## Miniaturization of Passive EMI Filter with Current Type ACC

Atsutoshi Okura\*, Hiroki Watanabe, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a hybrid EMI filter that combines a passive EMI filter and a current type active common mode noise canceller (ACC). In the hybrid EMI filter, low-frequency common mode (CM) noise is compensated by the current type ACC and high frequency CM noise is compensated by the passive EMI filter. Since the cutoff frequency of the passive EMI filter can be designed to be high, the total volume of filters will be downsized.

**キーワード** : ワイドバンドギャップデバイス, コモンモード電流, パッシブフィルタ, アクティブコモンモードノイズキャンセラ

(Wide Band Gap device, Common-mode current, Passive filter, Active Common-mode noise Canceler)

### 1. はじめに

近年, SiC(炭化ケイ素)や GaN(窒化ガリウム)などのワイドバンドギャップ半導体の実用化により, 高速スイッチング可能なスイッチングデバイスの利用が盛んになりつつある<sup>(1-3)</sup>. これらのワイドバンドギャップ半導体の高速スイッチング特性により電力変換回路の低損失化が可能となる反面, スwitchingの高速化に伴い電力変換回路から発生する電磁ノイズの増大と広帯域化が問題となっている<sup>(4-5)</sup>.

電力変換回路から生じる電磁ノイズの低減手法として, 電磁ノイズ発生の要因の一つであるコモンモード(CM)電流を抑制するパッシブフィルタが広く用いられている<sup>(6)</sup>. パッシブフィルタはコモンモードチョークと Y キャパシタで構成され, インダクタとキャパシタから計算されるカットオフ周波数以上の周波数帯の電磁ノイズを低減する。しかし, 広い周波数範囲で高いノイズ低減効果を得るためにカットオフ周波数を低く設計した場合, フィルタ体積が大きくなるという問題点がある。

上記の問題に対して, アクティブコモンモードキャンセル方式(ACC)へ注目が集まっている<sup>(7-12)</sup>. ACCはトランジスタからなる増幅回路によりコモンモード電流を打ち消す方式であり, 特に電流をカップリングコンデンサを介してコモンモード電流と逆相の電流を注入する方式として電流補償形がある。電流補償形 ACCでは, コモンモードトランスが不要であり, また電流検出にカレントトランスを用いるため, 小型化の期待がある反面, 増幅回路の帯域に制御がある場合, 抑圧性能が低下する問題がある。

そこで本論文では, パッシブフィルタと電流補償形 ACC

を組み合わせハイブリッド ACC を提案し, シミュレーションにより基本動作の検証を行ったので報告する。

### 2. ハイブリッド ACC

図 1 に ACC を示す。ACC は補償方法により図 1(a)の電圧補償形と図 1(b)の電流補償形に大別される。

#### 2.1 電圧補償形 ACC

図 1(a)の電圧補償形 ACC では, 4 巻線のコモンモードト

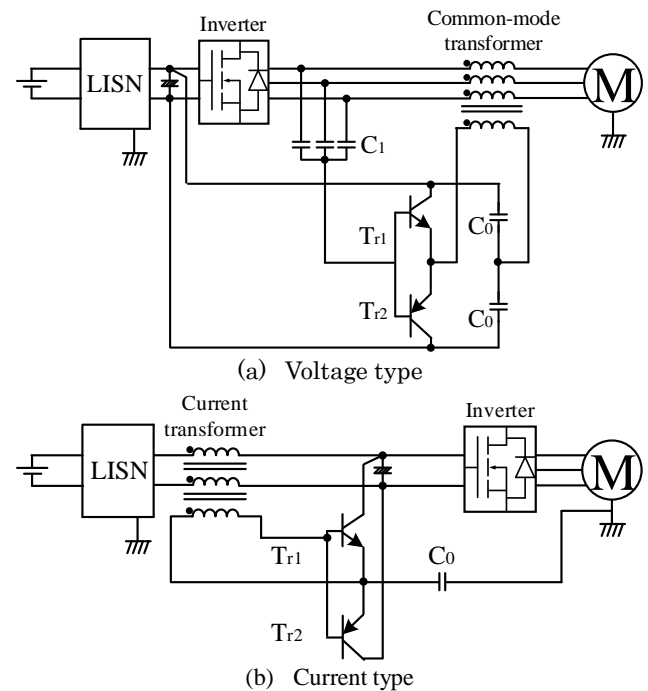


Fig. 1. Active Common-mode noise Canceler.

ランス, 3つのキャパシタ  $C_1$ , コンプリメンタリのトランジスタからなる ACC がインバータとモータの間に挿入される。フィルタコンデンサ  $C_1$  でコモンモード電圧を検出し, エミッタフォロワとして動作する  $T_{r1}$ ,  $T_{r2}$  を介して逆位相のコモンモード電圧をコモンモードトランスに印加することでコモンモード電圧をキャンセルする。

電圧補償形 ACC のコモンモードトランスは磁気飽和が生じないように設計する必要があるため, インバータ出力のコモンモード電圧と印加時間による電圧時間積に基づいてトランス体積を決定する必要がある。そのため小型化を行うためにはインバータを高周波駆動する必要がある。本方式はコモンモード電流の抑制効果が大きいことが知られているが, 電圧時間積の成約から大型のコモンモードトランスをインバータ出力側に必要とすることから小型化には不向きである。

2.2 電流補償形 ACC

図 1(b)に示す電流補償形 ACC は疑似電源回路網(LISN)とインバータの間に挿入されたカレントトランス(CT), コンプリメンタリペアのトランジスタ  $T_{r1}$ ,  $T_{r2}$ , カップリングコンデンサ  $C_0$  から構成される。CT でコモンモード電流を検出し, エミッタフォロワとして動作する  $T_{r1}$ ,  $T_{r2}$  を介して逆位相のコモンモード電流が  $C_0$  を通じて GND 線に注入される。GND 線においてモータから発生するコモンモード電流に逆位相電流が注入されることでコモンモード電流はキャンセルされる。電流形 ACC のコモンモード電流検出用カレントトランスは電圧補償型に利用しているコモンモードトランスと比較して電圧時間積が小さくなることから, フィルタの小型化が期待できる。しかしながら, ACC の増幅回路の帯域が制限される場合, 高周波のコモンモード電流が残存することとなる。

2.3 ハイブリッド ACC

そこで本稿では, パッシブ EMI フィルタと電流形 ACC を併用するハイブリッド ACC 方式を提案する。ACC はトランジスタの帯域以下の周波数帯でコモンモード電流を補償し, それ以上の帯域をパッシブフィルタで補償するように設計を行う。本設計により, パッシブフィルタ単体でコモンモード電流の抑制を行う場合に対して, フィルタの小型化が可能であり, また, 電流形 ACC 単体での補償に比べ高い電磁ノイズの減衰が見込める。

3. ノイズフィルタの体積

本章ではノイズフィルタの体積をエリアプロダクト法により評価する。エリアプロダクト法とはインダクタやトラ

ンスの体積をコアの窓面積と断面積から定量的に評価する手法である<sup>(13)</sup>。

(1)式にエリアプロダクトの式を示す。

$$Vol = K_{vol} \left[ \frac{2W}{K_u B_{max} J} \right]^{\frac{3}{4}} \dots\dots\dots (1)$$

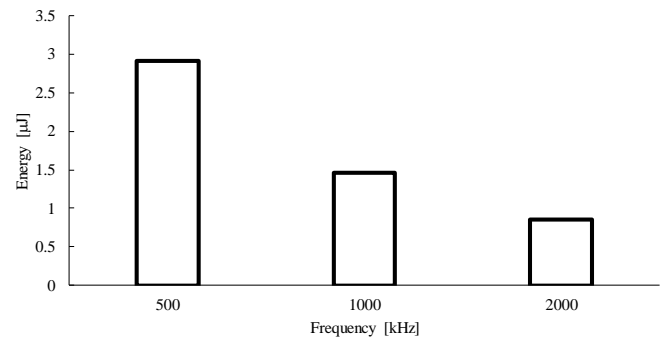


Fig. 2. Energy on filter inductor.

ここで  $K_{vol}$  はコアの形状から決定される定数,  $K_u$  は窓の占積率,  $B_{max}$  は最大磁束密度,  $J$  は電流密度である。(1)式より, トランスの体積はコアに蓄積されるエネルギーの 3/4 乗に比例する。

(2)式よりパッシブフィルタのインダクタンス値を計算する。今回, Y キャパシタの値を 1nF とした。なお, フィルタのカットオフ周波数として 500kHz, 1MHz, 2MHz を想定する。

$$L = \left( \frac{1}{2\pi f_{cut}} \right)^2 \frac{1}{C_{CM}} \dots\dots\dots (2)$$

計算結果よりカットオフ周波数が 500kHz, 1MHz, 2MHz の時のインダクタンスはそれぞれ 101μH, 25.3μH, 6.33μH となる。

(3)式より設計したフィルタリアクトルのインダクタンス  $L$  と図 3 の CM 電流  $i_{CM}$  よりフィルタリアクトルに蓄積されるエネルギーを求める。

$$w = \frac{1}{2} L i_{CM}^2 \dots\dots\dots (3)$$

図 2 にカットオフ周波数ごとのフィルタリアクトルエネルギーを示す。リアクトルの体積はエネルギーの 3/4 乗に比例するため, カットオフ周波数を高く設計すると小型なリアクトルを使用することが可能となる。

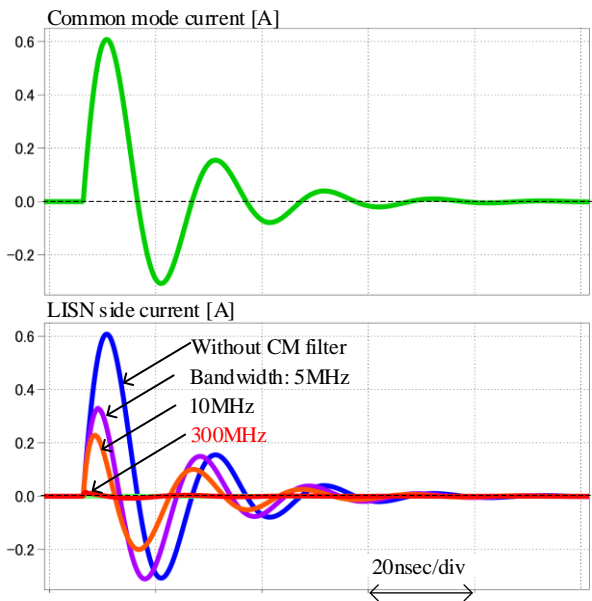


Fig.3 Simulation result when bandwidth of ACC was changed.

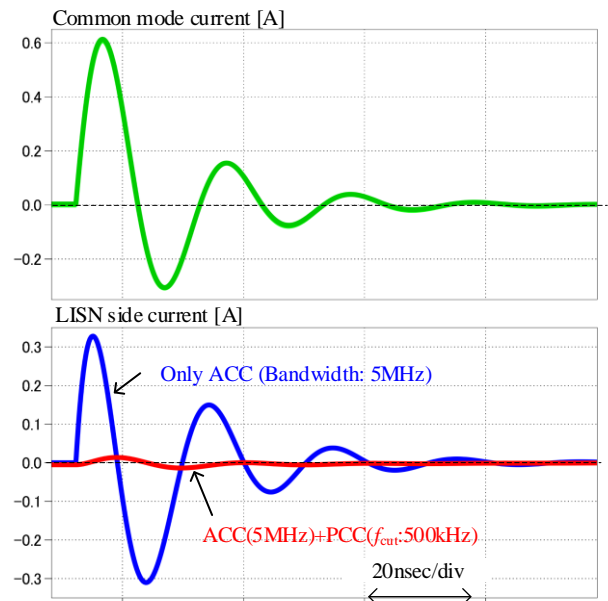


Fig.4 Simulation result when configuration of CM filter was changed

#### 4. シミュレーション結果

図3に電流形ACCの帯域を変更した際の共通モード電流および電源側の共通モード電流波形を示す。なお、今回は基礎検証として、電流形ACCを理想電流源とし、帯域については一次のLPFを用いて再現した。また今回は帯域を5MHzから300MHzまで変更した際の電源側の共通モード電流波形を比較した。

図3より、共通モードフィルタを接続しない場合(図3中青波形)、発生した共通モード電流はそのまま電源側に流入していることがわかる。一方で、電流形ACCを適用することで電源側の共通モード電流が減衰していることがわかる。電流形ACCを接続した場合の電源側の共通モード電流に着目すると、帯域が低い場合は電流形ACC側で共通モード電流を十分に補償できないため、電源側に流入する共通モード電流が増加する。一方で十分に電流形ACCの帯域が高い場合、ACCによって共通モード電流が十分減衰できていることを確認した。

図4に共通モードフィルタの構成を、電流形ACCのみにした場合、パッシブEMIフィルタと電流形ACCで併用した場合のシミュレーション結果を示す。なお、図4では電流形ACCの帯域が狭いと仮定し、電流形ACCの帯域を5MHzとしている。またパッシブEMIフィルタのカットオフ周波数は500kHzとした。

図4より、電流形ACCの帯域が狭い場合、電流形ACCだけでは十分に共通モード電流を補償することができな

い。一方でパッシブEMIフィルタを併用することで残存する共通モード電流を減衰できていることを確認した。パッシブEMIフィルタのみで構成する場合、150kHz帯といった低周波域でカットオフ周波数を設計する必要があるため、大型化しやすい。一方で、電流形ACCと併用する場合は低周波域については電流形ACC側で共通モード電流を減衰することができるため、パッシブEMIフィルタのカットオフ周波数を高く設計できる。その結果パッシブEMIフィルタの小型化が可能である。

図5に電流形ACCの帯域を変更した際の電源側に流入する共通モード電流の高調波解析結果を示す。なお今回は高域側の周波数成分に着目し、各帯域における各周波数成分の減衰の度合いを解析した。また解析の基本周波数は1MHzとし、30MHzに相当する30次までの周波数成分を解析した。

図5より、電流形ACCの周波数帯域が低くなるほど残存する共通モード電流が増加していることがわかる。電流形ACCのみで高域側の共通モード電流を減衰するためには、共通モード電流に対して十分高い帯域を担保できる構成が必要になる。

図6に共通モードフィルタの構成を、電流形ACCのみ、パッシブEMIフィルタのみ、電流形ACCとパッシブEMIフィルタの併用、とした場合の電源側に流入する共通モード電流の高調波解析結果を示す。なお、電流形ACCの帯域は5MHzとした。また電流形ACCとパッシブEMIを併用する場合のパッシブEMIフィルタのカットオフ周波数は

500kHzとした。さらにパッシブ EMI フィルタのみの構成の場合のカットオフ周波数は、低域側でカットオフ周波数を設計し、15kHzとした。

図 6 より、カットオフ周波数を高く設計した場合のパッシブ EMI フィルタと電流形 ACC を組み合わせることで、帯域不足により残存するコモンモード電流を補償できることを確認した。特に本方式は低周波域は電流形 ACC で補償できるため、パッシブ EMI フィルタのカットオフ周波数を高く設計でき、小型化ができる可能性がある。

## 5. まとめ

本論文ではパッシブ EMI フィルタと電流形 ACC で構成されるハイブリッド EMI フィルタを提案し、シミュレーションによりコモンモード電流抑制機能の検証を行った。

今後は実機実験によりシミュレーションの妥当性を検討する。

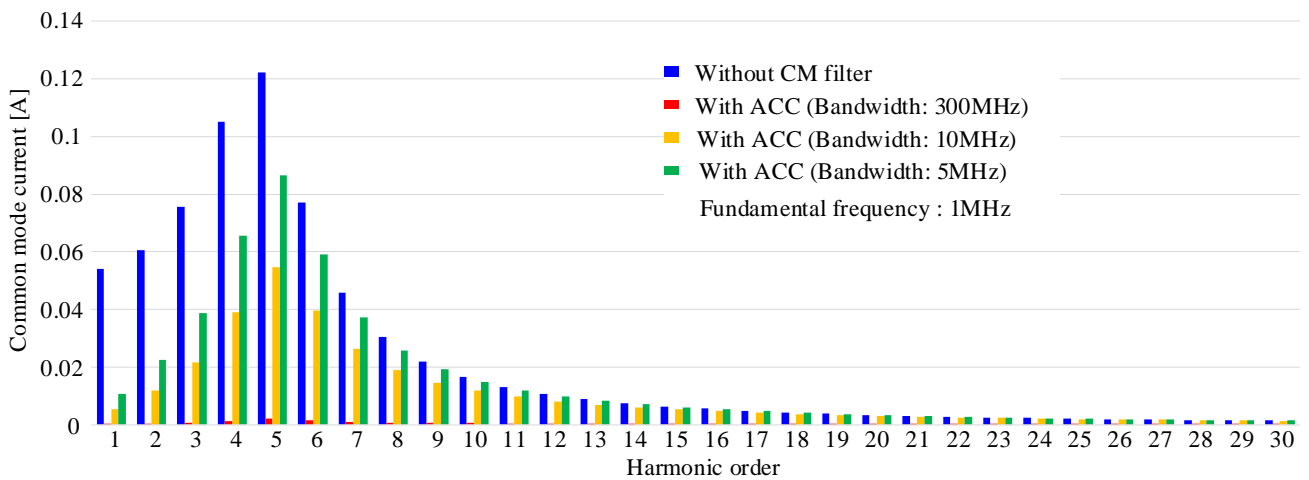


Fig. 5 Harmonic analysis result when bandwidth of ACC was changed.

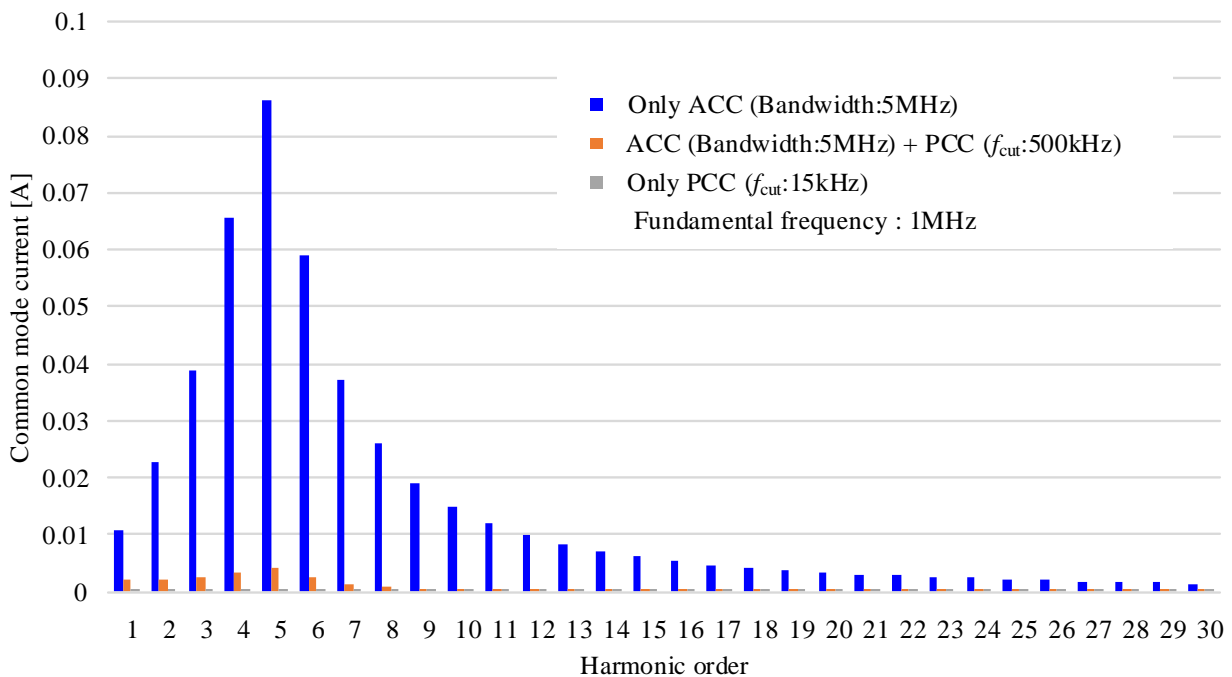


Fig.6 Harmonic analysis result when configuration of CM filter was changed.

## 文 献

- (1) 佐藤以久也, 田中孝明, 堀元人, 山田隆二, 鳥羽章夫, 久保田寿夫, 「SiC MOSFET とパワー系 IVH 基板を用いた高密度モータ駆動用インバータ」, 電学論 D, Vol. 140, No. 7, pp.526-533 (2020)
- (2) Junji Kondoh, Tsutomu Yatsuo, Itaru Ishii, Kazuo Arai, "Estimation of Converters with SiC Devices for Distribution Networks," IEEJ Trans. On Industry Applications, Vol. 126, No. 4, pp. 480-488 (2006)
- (3) Kenji Sato, Hirokazu Kato, Takafumi Fukushima, "Development of SiC Applied Traction System for Next-Generation Shinkansen High-Speed Trains," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 9, No. 4 pp. 453-459 (2020)
- (4) 林真一郎, 和田圭二, スイッチング損失とサージ電圧の低減に着目したゲート駆動回路実装, 電学論 D, Vol. 136, No. 10, pp. 791-797 (2016)
- (5) S. Takahashi, K. Wada, H. Ayano, S. Ogasawara, T. Shimizu, "Review of Modeling and Suppression Techniques for Electromagnetic Interference in Power Conversion Systems," IEEJ Trans. On Industry Applications, Vol. 11, No. 1, pp. 7-19 (2022)
- (6) Kazuhiro Umetani, Takahiro Tera, Kazuhiko Shirakawa, "A Magnetic Structure Integrating Differential-mode and Common-Mode Inductors with Improved Tolerance to DC Saturation," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 4, No. 3, pp. 166-173 (2015)
- (7) Liyu Dai, Wenjie Chen, Yang Yang, Rui Wang, Xu Yang: "Design of Active EMI Filters With the Integrated Passive Component"
- (8) 小笠原 悟司・藤田 英明・赤木 泰文: 「電圧形 PWM インバータが発生する高周波漏れ電流のモデリングと理論解析」電学論 D, Vol.115, No.1 号, pp77-83(1995)
- (9) Isao Takahashi, Akihiro Ogata, Hidetoshi Kanazawa, Atsuyuki Hiruma, "Active EMI Filter for Switching Noise of High Frequency Inverters" IEEE (1997)
- (10) Satoshi Ogasawara, Hideki Ayano, and Hirofumi Akagi, "An Active Circuit for Cancellation of Common-Mode Voltage Generated by a PWM Inverter" IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.13, NO.5, pp835-841 (1998)
- (11) Yongbin Chu, Shuo Wang and Qinghai Wang, "Modeling and Stability Analysis of Active/Hybrid Common-Mode EMI Filters for DC/DC Power Converters" IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.31, NO.9, pp6254-6263 (2016)
- (12) 高橋 翔太郎, 「高速スイッチング電力変換器が発生する電磁ノイズの抑制手法に関する研究」, 北海道大学博士論文, 甲第 14140 号 (2020)
- (13) COLONEL WM. T. MCLYMAN "TRANSFORMER AND INDUCTOR DESIGN HANDBOOK" (2004)