

# 電流形アクティブコモンモードノイズキャンセラによる マルチセル Solid-State Transformer でのノイズ低減効果の実機検証

学生員 大倉 惇稔      正員 渡辺 大貴      上級会員 伊東 淳一  
(長岡技術科学大学)

Experimental verification for reduction of Conducted emission voltage  
using current type active common-mode noise canceller in a multi-cell Solid-State Transformer.

Atsutoshi Okura, Student Member, Hiroki Watanabe, Member, Jun-ichi Itoh, Senior Member  
(Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a common mode (CM) noise reduction for a multi-cell solid-state transformer (SST) using a current type active common mode noise canceler (ACC). ACC effectively reduces electromagnetic noise in power converters with many cells despite the complexity of the noise paths. The significance of this approach is demonstrated in our experimental results. The conducted emission voltage is reduced by 118.2 dB $\mu$ V when the SST is operated with three cells. The conducted emission voltage is reduced to 104.4 dB $\mu$ V when a current-type ACC is connected, with a significant improvement of 13.8 dB $\mu$ V.

キーワード : Solid-State Transformer, コモンモードノイズ, アクティブコモンモードノイズキャンセラ

Keywords : Solid-State Transformer, Common mode noise, 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、電力変換回路の高パワー密度化が盛んに研究されている<sup>(1-3)</sup>。ワイドバンドギャップ半導体により、従来の半導体に比べてスイッチング速度が向上し、高周波駆動が可能となるため、インダクタなどの受動素子の小型化やスイッチング素子の低損失化による冷却体の小型化が実現されている。一方で、スイッチング速度の向上は急峻な電位変動を引き起こすため、電磁ノイズの影響が顕著となる。

電磁ノイズの主要因であるコモンモード(CM)ノイズを抑制するため、一般的にパッシブ型の CM フィルタが広く用いられている<sup>(4)</sup>。パッシブ CM フィルタは構成する素子のインダクタンスとキャパシタンスから得ら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、広帯域で高いノイズ低減効果を得るためにはカットオフ周波数を低く設計する必要がある。そのため、コモンモードフィルタの受動素子が大型化し、パワー密度が低下する原因となる。

一方で、能動素子を使用したアクティブコモンモードキャンセラ(ACC)が盛んに研究されている<sup>(5-6)</sup>。ACC は、CM 電圧または電流を検出し、アンプを介して逆位相の CM 電圧を印加または電流を注入することで電磁ノイズを低減する方式である。ACC は受動素子のみで構成されるパッシブフィルタと比較して、広帯域化した際に回路体積を小さく設計できる利点がある。しかし、多数のセルを使用する電力変換器ではノイズ経路が複雑であるため ACC による電磁ノイズ低減が困難である。

そこで、本論文では双方向の電力制御や無効電力補償等の機能を有する Solid-state transformer(SST)をマルチセル動作させた際に発生する電磁ノイズを ACC により低減を行う。実機実験により 3 セルで動作させた際に電流形 ACC を接続することで雑音端子電圧が 13.8dB $\mu$ V 低減したので報告する。

## 2. システム構成

### 〈2.1〉 ACC

電流形 ACC は CM 電流検出部、増幅回路、補償電流注入部から構成される。本論文では CM 電流検出部にログスキ

ーコイルを用いた電流形 ACC<sup>7)</sup>によりノイズ低減効果の検討を行う。

図1にコモンモード等価回路における電流形 ACCのブロック図を示す。電流形 ACCは電源側へ流入するCM電流をフィードバック制御系として構成し、指令値 0A として比例制御することでCM電流を抑制する。ACCのノイズ低減効果は、検出部の検出電流 - 検出電圧比とアンプゲインによって決定され、ゲインが高くなると雑音端子電圧の低減効果も高くなる。

CM電流の検出部には広帯域化を目的としてログスキーコイルを適用している。従来の電流形 ACCの検出には変流器(CT: Current transformer)が広く用いられている<sup>(8-9)</sup>が一次側巻き数増加による体積の増加や周波数特性により検出可能な周波数帯に制限がある。対してログスキーコイルは1次側が1ターンであるためCTに対し体積の低減が可能であり、1次側に対し電流値が低い2次側の巻き数を増加させることで周波数帯域の広域化が達成できる。また、ログスキーコイルは絶縁性能にも優れているため 6.6kV といった中圧を扱う回路への適用も可能となっており幅広い回路に使用可能である。

増幅回路部には DC バス電圧をコンデンサ分圧し、レギュレータにより 15V まで降圧し、アンプ部分に印加される電圧を低耐圧化することで、高性能な電流帰還形オペアンプを用いた非反転増幅回路を適用する。

図2に本論文で用いた電流帰還形オペアンプを使った非反転増幅回路を示す。ACCのアンプ部も広域で動作する必要があるため理想状態動作時に最大帯域幅が 900MHz で動作可能な高出力電流帰還アンプ(THS3491(Texas Instruments))を採用した。本オペアンプは所望のゲインを得るために最適な抵抗の組み合わせがデータシートに記載されている。本検討では、データシートに示される最大ゲインの 26dB になるように抵抗値を決定し、非反転増幅回路を作成した。

### 〈2・2〉 SST

図3にSSTの回路構成を示す。本回路は入力段に昇圧チョッパ回路からなるPFCと電圧型直列共振DC/DCコンバータで構成される。これを1つのセルコンバータとし多段化する。PFCはダイオードブリッジ整流器後段のインダクタに通流する電流を全波整流状に制御し、系統電圧からPLLをかけることで力率補償動作を行う。共振型DC/DCコンバータは漏れインダクタンスと  $L_s$  とコンデンサ  $C_r$  による直列共振を使用し、共振周波数で動作する。

## 3. シミュレーションおよび実機検証

表1にシミュレーションおよび実験条件を示す。本実験では、SSTを3段接続し、定格容量を 100W とし、雑音端子電圧の測定を行った。電流形 ACCのログスキーコイルは検出電流 - 検出電圧比が 20 倍(26dB)、カットオフ周波数が 20kHz となるように巻き数を 120 回、検出抵抗を 2.4k $\Omega$  に決定した。アンプゲインも 26dB としてノイズ低減効果の測定

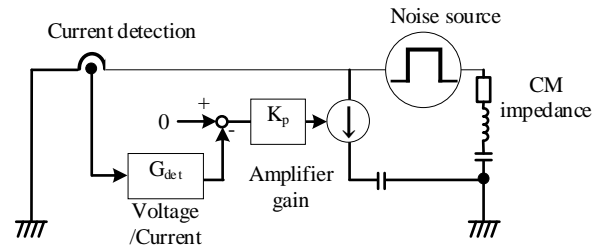


Fig. 1. Equivalent block diagram of ACC in common mode circuit.

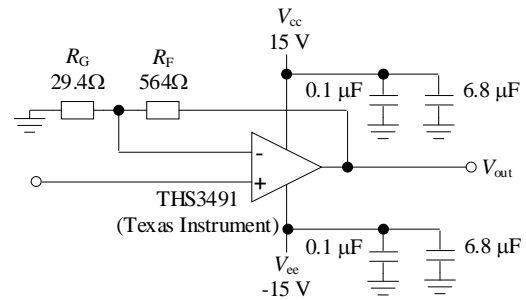


Fig.2. Noninverting amplifier circuit.

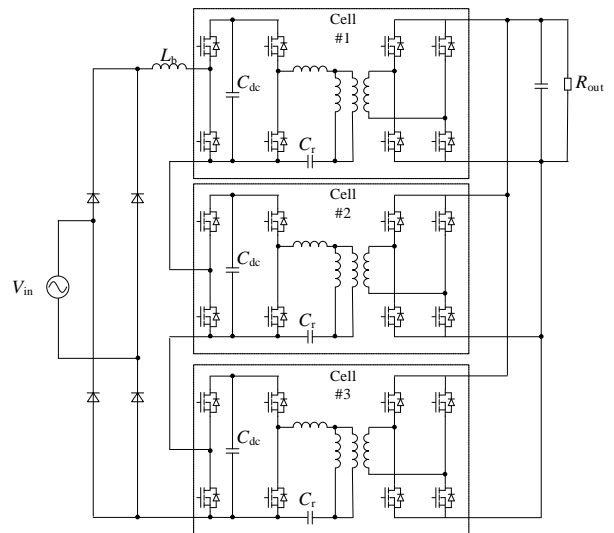


Fig. 3. Circuit configuration of the three-phase SST.

を行った。

### 〈3・1〉 CM 等価回路シミュレーション

図4に3セル構成時のSSTにおけるコモンモード等価回路を示す。ヒートシンクとデバイス間の寄生成分はRLC直列回路でのモデル化を行った。複数段接続時の各セルの寄生成分は並列接続としてモデリングを行った。

図5にコモンモード等価回路を用いた雑音端子電圧のシミュレーション結果を示す。図よりACCが動作していない時は 2.5MHz で 116 dB $\mu$ V 雑音端子電圧が発生していることがわかる。ACCを接続した際の雑音端子電圧は 79.5dB $\mu$ V となっており 36.5 dB $\mu$ V 低減していることがわかる。またシミュレーション結果では ACC 接続時に 150kHz から 30MHz のすべての範囲で雑音端子電圧が低減しており、測

定範囲での雑音端子電圧低減に電流形 ACC が有効であることがわかる。

### (3.2) 実機検証

図 6 に作成したログスキーコイルの周波数変化による検出電流 - 検出電圧比の特性を示す。測定結果より作成したログスキーコイルは設計値に対して透磁率の変化や配線インピーダンスの相違等により 1.5% の誤差が発生したが 25.6dB の検出ゲインを取得できた。また、カットオフ周波数が 20kHz であり 150kHz に対し十分に小さくなっていることがわかる。また検出ゲインが 30MHz まで一定となっているためノイズ測定範囲の 150kHz から 30MHz までの帯域で設計した検出ゲインで CM 電流検出部として使用することが出来ることわかる。

図 7 にアンプの周波数-ゲイン特性の測定結果を示す。高周波では配線インダクタンスの影響が大きくなりアンプのゲイン特性が低下するが 12MHz まで設計通りのゲインで動作していることが確認できる。

図 8 に SST に ACC を接続した際の回路図を示す。本回路では疑似電源回路網(LISN)を使用し電源側に発生する雑音端子電圧を測定する。電流形 ACC の電流検出部であるログスキーコイルは LISN の後段に接続してあり回路に流れる CM 電流の検出を行う。検出された CM 電流はログスキーコイルの 2 次側で電圧に変換され増幅回路部に印加される。本回路を使用しアンプ回路の電源を cell #1, cell #2, cell #3 の直流電圧部分に接続した際と DC 側に接続し際の雑音端子電圧の低減効果の測定を行う。

図 9 にヒートシンクに接続された接地線に通流する CM 電流と、ACC により補償された LISN へ流れる CM 電流の測定結果を示す。図よりモータから最大 1.4A の CM 電流が発生しているが、ACC により LISN へ流れる CM 電流を低減していることがわかる。

図 10(a)にアンプ電源を AC 側に接続した際の雑音端子電圧の測定結果を示す。図より ACC が動作していない時は 2.5MHz で 118.2dB $\mu$ V 雑音端子電圧が発生していることがわかる。ピーク値が等価回路のシミュレーションとはほぼ一致しており等価回路モデルは妥当であるといえる。また、cell #1 にアンプ電源を接続時は 2.5MHz で 13.8dB $\mu$ V の低減効果が得られた。同様に cell #2 に接続時は 12.8dB $\mu$ V, cell #3 に接続時は 12.2dB $\mu$ V の低減効果が得られた。以上より ACC のノイズ低減効果はアンプ電源の接続するセルに依存しないことがわかる。図 10(b) にアンプ電源を DC 側に接続した際の雑音端子電圧の測定結果を示す。図より 2.5MHz で 9.0dB $\mu$ V の低減効果が得られた。AC 側にアンプ電源を接続した際に比べノイズ低減効果が低下しているのは CM 電流の経路が電源、スイッチング素子、ヒートシンク、電源で流れており DC 側は経路となっていないため補償電流を十分に注入できなかったと考えられる。しかし、電流形 ACC 接続時に 150kHz から 30MHz のすべての範囲で雑音端子電圧が低減していることが確認できた。電流形 ACC が測定範囲のすべての周波数帯域で電磁ノイズ低減に有効であ

Table 1. Circuit parameters.

Parameter	Symbol	Value
Input voltage [V]	$V_{in}$	300
Output power [W]	$P_{out}$	100
Switching frequency [kHz]	$f_{sw}$	30
Boost inductor [mH]	$L_b$	5.0
Resonant capacitor [ns]	$C_r$	204
DC link Capacitor [ $\mu$ F]	$C_{dc}$	1500
Amplifier gain [dB]	-	26
Detective voltage / current [dB]	-	26
Number of turns	N	120
Detection resistance[k $\Omega$ ]	R	2.4

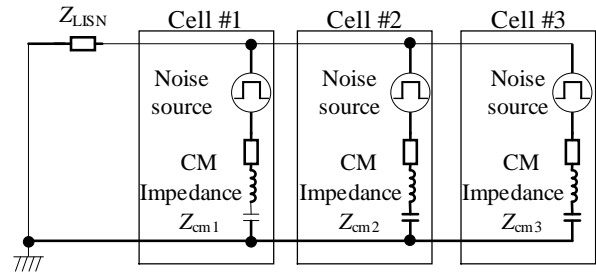


Fig. 4. Equivalent block diagram of SST in common mode circuit.

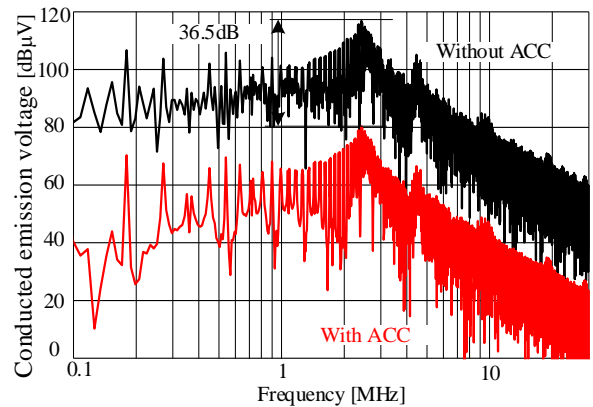


Fig. 5. Conducted emission voltage of the equivalent circuit.

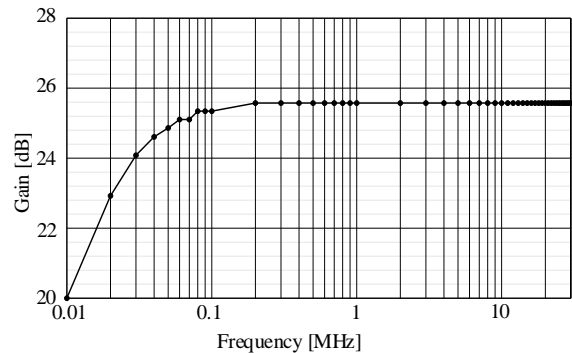


Fig. 6. Rogowski coil frequency characteristics.

るといえる。

## 5. まとめ

本論文では電流形 ACC でのマルチセル SST の雑音端子電圧低減を行った。実験結果よりアンプ電源を cell #1 の AC

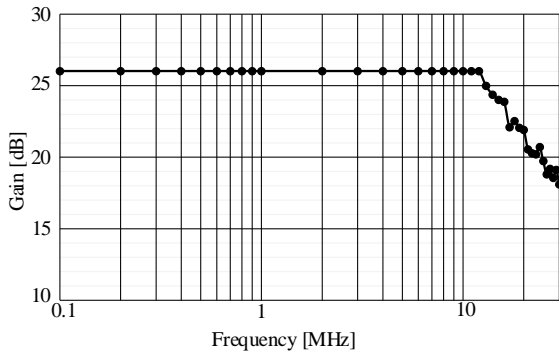


Fig. 7. Amplifier gain characteristics.

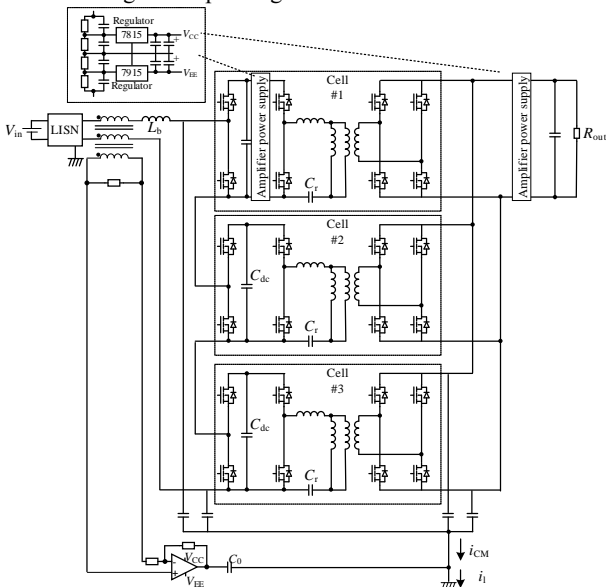


Fig. 8. Circuit configuration of the three-phase SST with ACC.

側に接続した際、ピーク値である 2.5MHz で 13.8dB $\mu$ V の低減効果が得られた。また、CISPR に定められた周波数帯域である 150kHz から 30MHz のすべての帯域でノイズ低減効果が確認でき、ACC がマルチセル回路の伝導ノイズの低減に効果的であることが確認できた。

今後はマルチセル回路の詳細なノイズ経路の解析を行いマルチセル回路のノイズ低減に適した ACC の設計を行う。

## 文 献

- (1) 佐藤 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) Kazuhiro Umetani, Takahiro Tera, Kazuhiro 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)
- (5) 小笠原 悟司・藤田 英明・赤木 泰文: 「電圧形 PWM インバータ

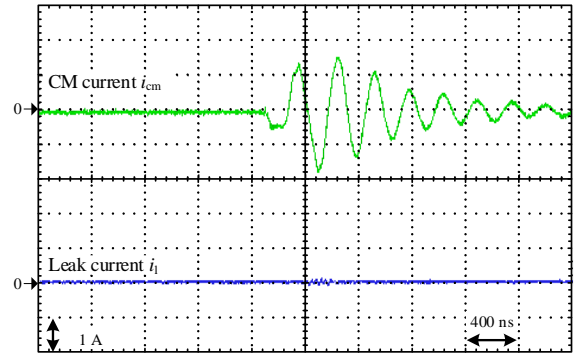
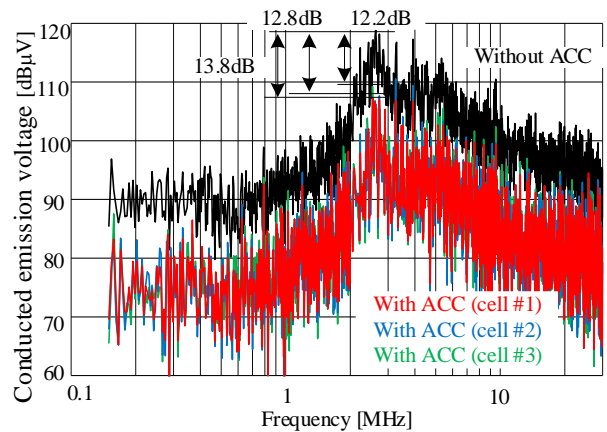
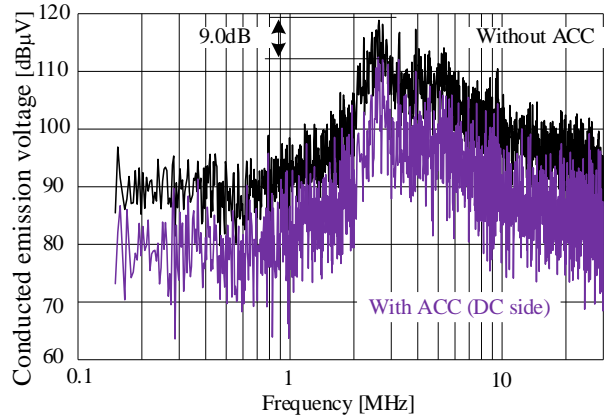


Fig. 9. CM current waveforms.



(a) Connection of the amplifier power supply to AC side



(b) Connection of the amplifier power supply to DC side

Fig. 10. Conducted emission voltage.

- 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)
- (6) Isao Takahashi, Akihiro Ogata, Hidetoshi Kanazawa, Atsuyuki Hiruma, "Active EM1 Filter for Switching Noise of High Frequency Inverters" IEEE (1997)
- (7) A.Okura, R.Kusui, K.Nishikawa, M.Yamaguchi, H.watanabe, J.Itoh: "Volume Minimization of Current Type ACC with Rogowski Coil," IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (2024.)
- (8) 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)
- (9) 小笠原 悟司・綾野 秀樹・赤木 泰文: 「電圧形 pwm インバータが発生する共通モード電圧のアクティブキャンセレーション」電学論 D, Vol.117, No.5 号, pp565 -571(1997)