

階調制御による ISOP 型 Solid-State Transformer のコモンモードノイズ低減効果の検証

菊地 尚斗*, 日下 佳祐, 伊東 淳一(長岡技術科学大学)

Experimental verification of common mode noise reduction for Solid-State Transformer based on ISOP configuration with gradationally control

Naoto Kikuchi, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

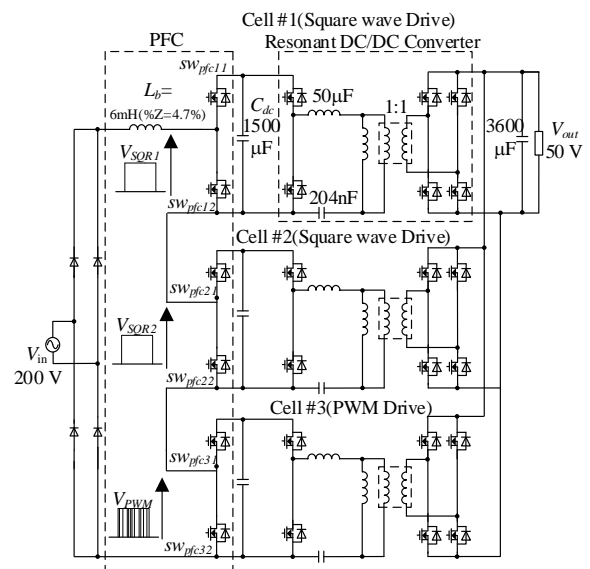
近年、直流配電システムの導入が検討されており、Solid-State Transformer(SST)が注目されている。回路トポロジーとして複数のセルコンバータを使用し、入力を直列、出力を並列にした ISOP 型マルチセル方式が盛んに研究されている⁽¹⁾⁻⁽²⁾。一般的に電力変換器ではスイッチング動作に起因するノイズが発生し、CISPR11 等の規格値を満たすようにノイズを抑制する必要がある⁽³⁾。しかし、SST のような中圧システムを想定したシステムでは、素子の耐圧の観点から大型な追加のノイズフィルタ必要となる。

そこで本論文では、ISOP 構成を有する SST のコモンモードノイズを低減する目的として、PWM 駆動と方形波駆動を併用した階調制御により、コモンモードノイズの低減効果について検証する。階調制御を適用することで、追加のフィルタなしで従来の全セルを PWM する駆動法よりコモンモードノイズを低減できる。実機実験により、従来駆動法と比べ、漏れ電流がスイッチング周波数において 7.5dB μ A 低減したため報告する。

2. 階調制御方式

図 1 に階調制御を適用する 3 セル構成の SST の回路図を示す。本回路は入力段に昇圧チョップ回路からなる力率改善補償回路(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、ISOP 接続により多段化する。PFC 部では、下側 1 セル目を電流制御による PWM 動作を行い、他セルは階調制御により方形波電圧を出力する。DC/DC コンバータでは、高周波トランスの漏れインダクタンスと 1 次側に接続されるコンデンサによる直列共振を使用し、共振周波数で動作する。デューティ 50% でスイッチングすることで、MOSFET のターンオン時に ZVS を達成する。

図 2 に階調制御における入力電流の制御ブロック図を示す。PWM 動作するセルでは、方形波セルの出力電圧による高調波成分を補償し、インダクタ電流を全波整流波形に制御することで、入力電力の力率を 1 になるように電流を制



Rated output power : 1 kW. Carrier frequency of PFC : 30kHz. Carrier frequency of DC/DC : 50kHz.

Fig. 1. Circuit configuration of the single-phase SST.

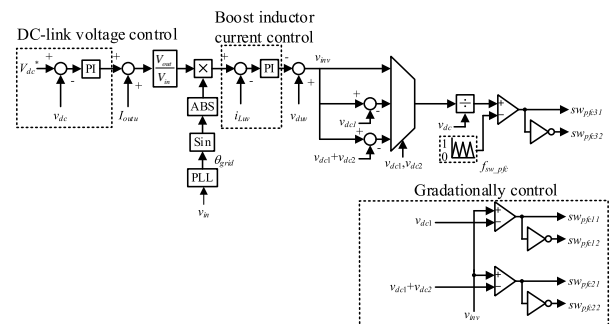


Fig. 2. Control block diagram of PFC with gradationally control.

御する。方形波セルは出力電圧指令値 v_{inv} と各セルの DC リンク電圧 v_{dc} を大小比較することで、スイッチング状態を決定する。これにより、系統電圧の 2 倍の周波数に同期した方形波電圧を出力する。生成されたゲート信号と各方形波セルの DC リンク電圧より、方形波セルの外乱成分を算出し、PWM セルにより外乱成分を補償する。

3. 階調制御によるコモンモードノイズ低減の原理

図3に2セル構成のPFCにおけるコモンモード等価回路を示す。等価回路では、昇圧インダクタが持つ直列抵抗 R_{dc} 、DC リンクと GND 間の浮遊容量 C_{dc_out} のみを考慮し、説明の簡略化のため2セル構成とする。ここで、各セルのコモンモード電圧 V_{com_cell1} 、 V_{com_cell2} は以下のように表せる。

$$V_{com_cell1} = sw_{pfc12} V_{dc1} / 2 + sw_{pfc21} V_{dc2} / 2 \quad (1)$$

$$V_{com_cell2} = sw_{pfc12} V_{dc1} / 2 - sw_{pfc21} V_{dc2} / 2 \quad (2)$$

なお、 V_{dcn} は各セルの DC リンク電圧である。発生するコモンモード電圧は PFC のスイッチングによりパルス状に変化し、各セルのスイッチング状態によって変化する。図3より、コモンモード電流 I_{com} は以下のように表せる。

$$I_{com} = (2V_{com_cell1} + V_{com_cell2}) / (2Z_1 + Z_2) \quad (3)$$

なお、 Z_1 は昇圧インダクタ L_b と直流抵抗 R_{dc} 、 Z_2 は DC リンクコンデンサ C_{dc} と浮遊容量 C_{dc_out} の合成インピーダンスである。(3)式より、 V_{com_cell1} は V_{com_cell2} に比べ影響の大きさが2倍である。上側1セル目に階調制御を適用することで、系統周波数の2倍となり、PWM動作時に比べ合成インピーダンス Z_2 は大きくなる。これにより、 V_{com_cell1} 部を低減し、コモンモード電流の低減が可能となる。従来法では、入力電圧により動作するセルに自由度があり、動作するセルはスイッチング周波数ごとに切り替わる。そのため、 V_{com_cell1} および V_{com_cell2} 部はスイッチング周波数の基本波として周波数成分を持つ。一方階調制御では、PWM動作するセルを固定にすることで、PWM動作によるスイッチング周波数の基本波成分を削減でき、コモンモード電圧の抑制が可能となる。以上より、階調制御を適用することで従来法に比べ、スイッチング周波数成分の漏れ電流を低減できる。

4. 実験結果

図4に階調制御による動作波形を示す。なお、実験条件は図1のパラメータを使用する。図4(a)の実験結果より入力電力の力率が0.99となり、入力電流のTHDが2.91%を得られた。また、図4(b)では、入力電圧に対する各セルの出力電圧を示しており、2つの方形波セルは入力電圧に同期して系統周波数の2倍である100Hzの方形波電圧を出力していることが確認できる。以上より、方形波セルによる高調波成分をPWMセルにより補償し、力率改善動作を確認できる。

図5に従来法と階調制御を適用した、漏れ電流の周波数解析した比較を示す。本実験では、各セルのPFCおよびDC/DCコンバータのヒートシンクを接地させ、漏れ電流を計測する。PFCのスイッチング周波数である30kHzにおいて、従来法に比べ7.5dB μ Aの低減効果を確認できる。以上より、階調制御方式を適用することで、スイッチング周波数成分におけるコモンモードノイズの低減効果を確認した。

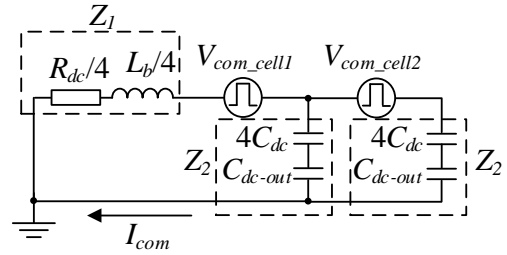
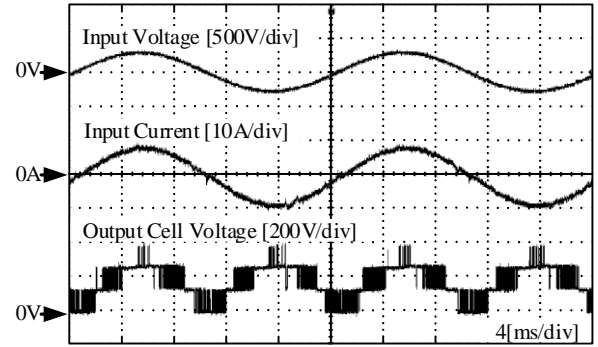
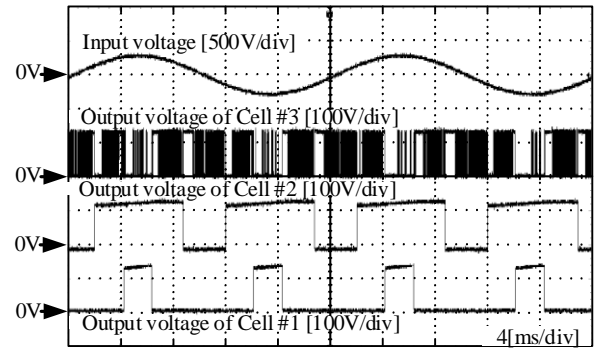


Fig. 3 Common-mode equivalent model of PFC.



(a) Operation waveform with gradationally control.



(b) Output voltage of each cell with gradationally control.

Fig. 4 Experimental result with gradationally control.

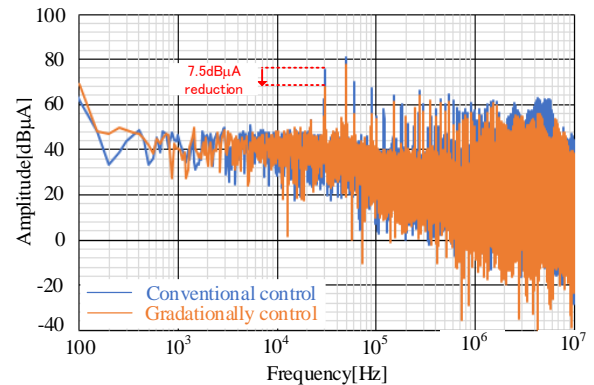


Fig. 5. Experimental results of leakage current with conventional and gradationally control.

文 献

- (1) J. E. Huber, et al, IEEE Trans. Vol.10, pp.317-326 (2019)
- (2) J.Itoh, et al, IEEE Journal, Vol.8, No.5, pp.795-802(2019)
- (3) IEC : CISPR 11 Edition.5.0 (2009)