

30kW 共振形交直双方向変換器

土井 佑太
Yuta Doi

鈴木 健司
Takeshi Suzuki

1 はじめに

近年、地球温暖化問題や省エネルギーへの関心が高まっており、太陽光発電に代表される再生可能エネルギーが普及してきている。その中でも、太陽光発電の急速な普及拡大に伴い、太陽電池により発電された直流電力を交流電力に変換し配電系統に供給するPCS (Power Conditioning System) には、小型化、低騒音化、高効率化、軽量化等が要求される。これらの要求に対して、絶縁変圧器及び、フィルタリアクトルを高周波駆動する方法が各種提案されており、高周波駆動のためにはPCS内のスイッチング素子の高周波化が必要となる。しかし、スイッチング時に電圧電流が同時にステップ状に変化する従来のスイッチング方式 (ハードスイッチング方式) では、スイッチングに伴う損失が大きいため、高周波化に限界がある。このことから、電圧または電流がゼロの状態ですwitchingさせ、損失を低減する新たなスイッチング方式 (ソフトスイッチング方式) が採用されつつある⁽¹⁾。しかしながら、ソフトスイッチング方式の中容量器 (10kW~100kW) 以上への適用例はまだ少ない。

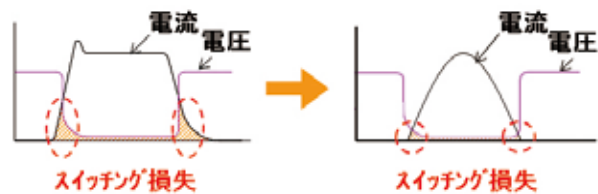
東光高岳では、このソフトスイッチング方式を中容量のPCSで採用することを狙って、交流⇒直流及び直流⇒交流の双方向で利用可能な交直双方向変換器の30kW評価器を製作し、性能を確認した。この評価器では、交直双方向変換器の高周波リンク部に直列LC回路を付加した電流共振回路を採用してソフトスイッチングとした。また、高効率化のため、スイッチング素子の一部にSiC-MOSFET^(註1)を採用した。本評価器の最大効率は、従来の交直双方向変換器では最大効率88%程度、すなわち損失12%であるため、この損失を30%低減し、92%を超えることを目標とした。以下に概要を説明する。

2 高効率化技術

2.1 ソフトスイッチング方式

ハードスイッチング方式では、図1(a)に示すようにスイッチング時の電圧及び電流の波形が重なる部分がスイッチング損失となる。一方、ソフトスイッチング方式では、図1(b)のように電流を正弦波として、電圧と電流の波形が重なる時間を最小にすることにより、スイッチング損失を低減する (図例はZCS: Zero Current Switching)。

スイッチング損失はスイッチング周波数に比例するため、高周波化にはソフトスイッチングが適している。



(a) ハードスイッチング (b) ソフトスイッチング

図1 スwitchング損失比較

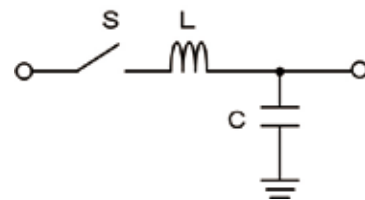


図2 電流共振スイッチ構成

評価器に適用するソフトスイッチング方式の共振形には、電圧共振を用いるZVS (Zero Voltage Switching) と電流共振を用いるZCSがある。電流共振スイッチの構成を図2に示す⁽²⁾。スイッチSと直列にリアクトルLとコンデンサCを接続して共振回路を構成する。スイッチSに流れる電流を正弦波電流にし、電流が0になる点でスイッチングすることにより、ゼロ電流スイッチングを行う。

2.2 SiC素子

SiC (シリコンカーバイド) はSi (シリコン) を用いたスイッチング素子と比較して、理論的には、絶縁破壊電界が10倍であるため耐圧絶縁領域厚さを1/10にでき、オン抵抗、定常損失が小さいといった特長をもつSi-MOSFETとSiC-MOSFETの構造比較を図3に示す⁽³⁾。

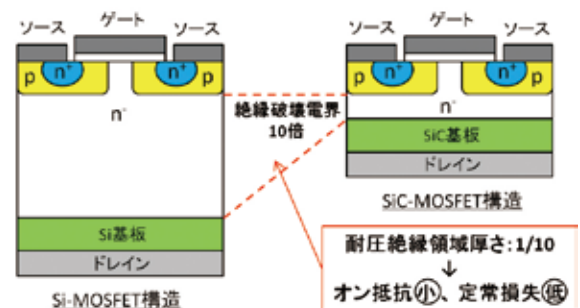


図3 SiとSiCの構造比較

3 30kW共振形交直双方向変換器

3.1 評価器構成

評価器である30kW共振形交直双方向変換器の構成を図4に示す。この装置は、直流⇒交流の変換（回生運転）^{注2)}と、交流⇒直流の変換（力行運転）^{注3)}が可能な双方向変換器である。交直変換を行う主回路、スイッチなどの入出力信号を制御する制御回路、運転状態を計測する計測回路及び操作、計測表示を行うPCで構成される。操作は、ボタンスイッチにより装置の運転/停止を行い、タッチパネル式モニターで出力電流及び電圧の設定を行う。主回路は、昇降圧チョップ回路、双方向共振形高周波リンク回路、双方向交直変換回路（インバータ／整流回路）の三回路で構成する。

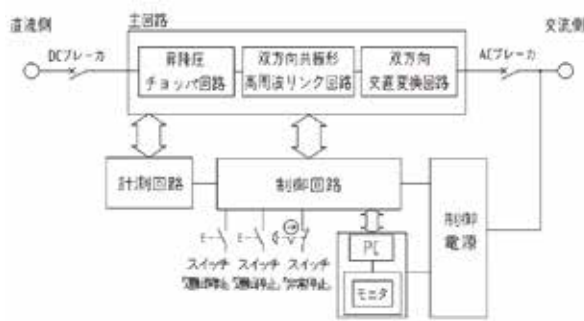


図4 評価器構成図

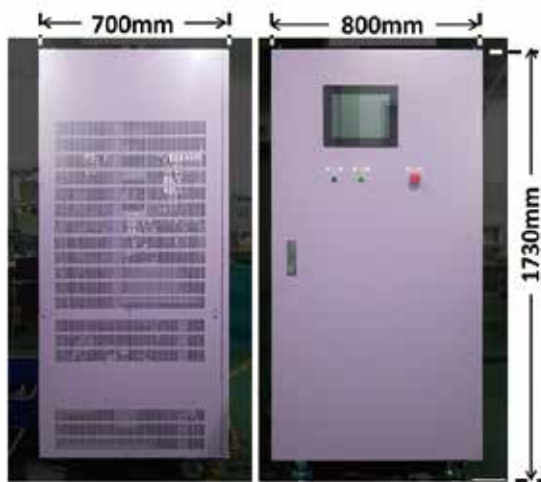


図5 評価器外形写真

各運転動作の流れを次に示す。

○回生運転：

直流入力→昇圧チョップ回路にて電圧上昇
→共振形高周波リンク回路にて変圧、絶縁
→インバータにて直流を交流に変換→交流出力

○力行運転：

交流入力→整流回路にて交流を直流に変換
→共振形高周波リンクにて変圧、絶縁
→降圧チョップ回路にて電圧下降→直流出力

今回の評価器の外形写真（W800mm×D700mm×H1730mm）を図5に、制御モニタの一面面を図6に示す。制御モニタは、出力電流制御、出力電圧制御、動作モード切替え及び、各部電圧電流の計測表示を実施する。評価器の主な仕様を表1に示す。

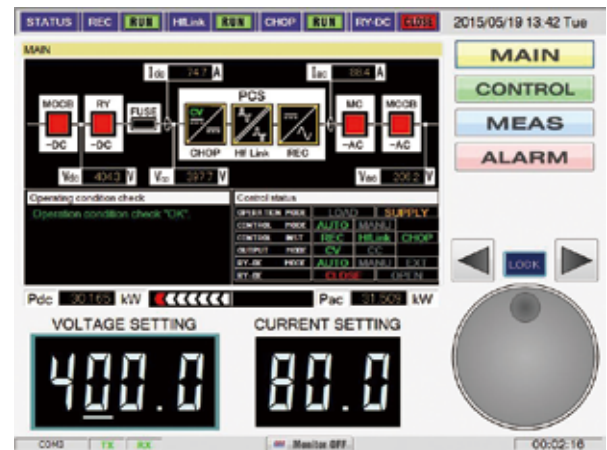


図6 制御モニタ

表1 評価器仕様

仕様項目	直流側	交流側
定格電力	30kW	33kW
定格電圧	50～600V	3相 200V (180～220V)
定格電流	0～90A	0～95.3A
高周波リンク部電圧	750V	400V
周波数	—	50/60Hz
スイッチング周波数：16.2 kHz		

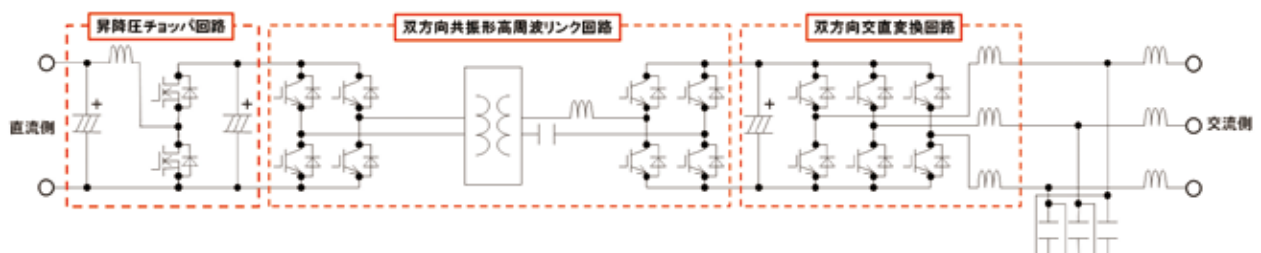


図7 主回路図

3.2 主回路の特長

主回路を図7に示す。主回路の各回路について説明する。

(1)昇降圧チョップ回路

チョップ回路は、直流電圧の変換を行う直流/直流変換回路であり、太陽光発電用PCSの入力段には昇圧チョップが広く利用されている。

評価器では、双方向のチョップ回路により、回生運転時は昇圧チョップ、力行運転時は降圧チョップとして動作する。スイッチングデバイスにはSiC-MOSFETを使用した1200V-180A-2in1のフルSiCパワーモジュールを採用し、スナバレス構造とした。このスナバレス構造は、損失低減の利点をもつ。

(2)双方向共振高周波リンク回路

高周波リンク回路は、直流電力を高周波電力に変換し、変圧器で絶縁する回路である。電力変換回路の直列数は増加するが、高周波化により絶縁用の変圧器やフィルタ回路の小型化・軽量化が可能であるという利点をもつ。

評価器では、この電力変換の部分に共振形(ZCS方式)を適用した。絶縁トランスと直列LC回路により共振回路を構成してスイッチング電流を正弦波にし、電流ゼロ点でスイッチングさせることでスイッチング損失を低減する。本回路においてもスナバレス構造である。スイッチングデバイスは1200V-200A-2in1のIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を使用した。

(3)双方向交直変換回路 (インバータ/整流回路)

双方向交直変換回路は、インバータと整流回路の両方の機能を持った回路である。

評価器では従来回路を使用し、回生運転ではインバータ、力行運転では整流回路として動作する。本回路もスナバレス構造である。スイッチングデバイスは3相600V-300A-6in1のIPM^{注4)}を使用した。

4 動作結果

4.1 共振形によるスイッチング特性

30kW共振形双方向交直変換器において、力行運転、回生運転ともに定格での運転を確認できた。共振形によるスイッチング特性の評価では、定格運転時の高周波リンク回路の電圧・電流波形を測定し、スイッチング時の特性が最適となるように回路定数、スイッチングのタイミングを調整した。

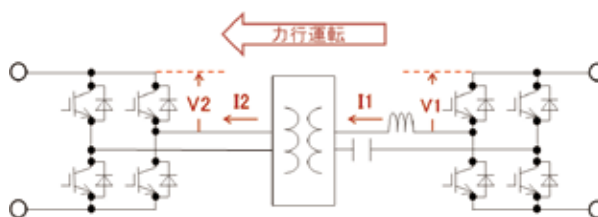


図8 波形測定箇所

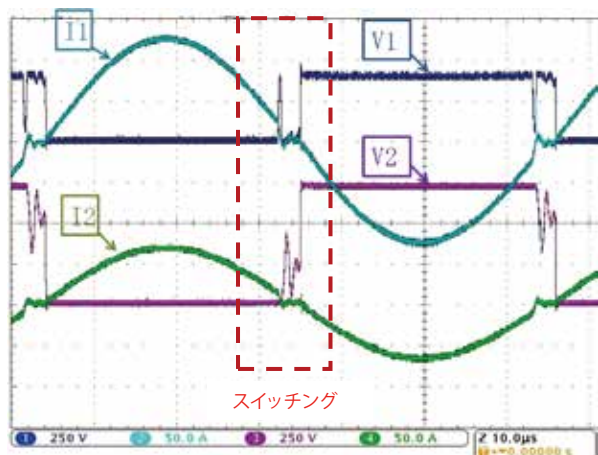


図9 高周波リンク回路電流・電圧波形

電圧・電流波形測定箇所を図8に示す（力行運転時）。高周波リンク回路の低圧側の電圧をV1、電流をI1、高圧側の電圧をV2、電流をI2とした。

高周波リンク回路の電圧・電流波形を図9に示す。共振形により電流が正弦波となり、電流がゼロ付近まで十分に小さくなったところでスイッチングが行われている。このスイッチング特性の最適化により高周波リンク回路のスイッチング損失が低減され、装置全体の変換効率が向上した。力行運転におけるハードスイッチングとソフトスイッチングの効率比較を図10に示す。

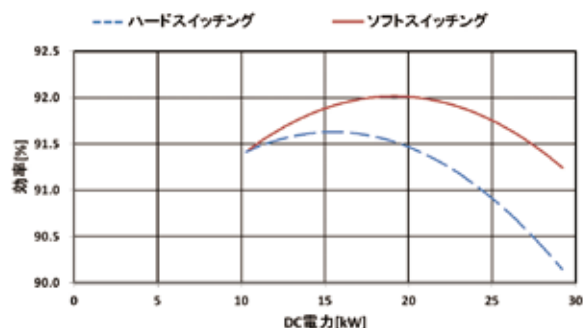


図10 効率比較 (力行運転)

4.2 変換効率

力行運転、回生運転の変換効率を図11に示す。制御方式に変更を加えたこともあり、最終的には力行運転では最大効率92.5%、回生運転では最大効率93%の結果を得た。Siデバイスを用いた東光高岳の従来品では最大効率88%程度であったが、SiCデバイスや共振形を用いたことで最大効率は5%程度向上した。

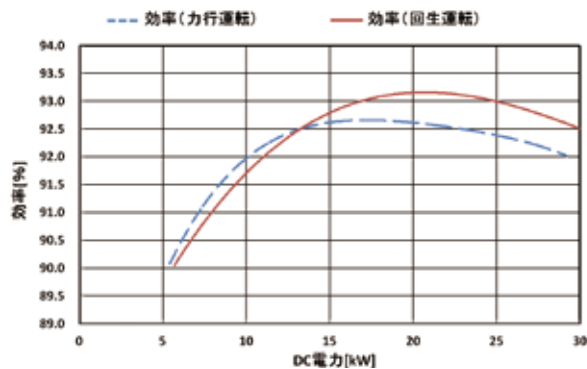
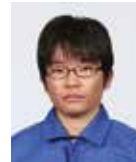


図11 変換効率

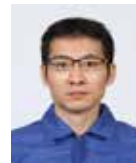
注3) 力行 (りっこう, りきこう) : 電源から負荷へ電力を供給すること。

注4) IPM: Intelligent Power Module, パワー-MOSFETやIGBTに加え, それらの駆動回路や保護回路も内蔵したもの。



土井 佑太

技術開発本部 技術研究所
プロジェクト推進グループ 所属
PCSに関する開発・研究に従事



鈴木 健司

技術開発本部 技術研究所
プロジェクト推進グループ 所属
PCSに関する開発・研究に従事

5 おわりに

30kW共振形双方向交直変換器を開発し, 目標である最大効率92%超過を達成し, 力行運転では最大効率92.5%, 回生運転では最大効率93%の結果を得た。また, 今回の評価器では, フルSiC-MOSFETによる昇降圧チョッパ回路の効果およびスナバレス構造の効果も確認できた。この評価器を, 急速充電器等の直流電源装置の試験電源に適用し, 連続運転による性能評価を引き続き実施する。

今回の開発成果により中容量のPCSへの適用の目途がたったため, 今後の開発品に適用し, 機器の小型化, 高効率化へ展開する。

■参考文献

- (1) 金:「パワースイッチング工学 [改訂版]」, p.243, (2014), 一般社団法人 電気学会
- (2) 一般社団法人 電気学会半導体電力変換システム調査専門委員会編:「パワーエレクトロニクス回路」, p.291,(2000), オーム社
- (3) トランジスタ技術編集部編:「高周波デバイス実践活用法」, p.197, (2004.12), CQ出版社

■語句説明

注1) MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOS形電界効果トランジスタ

注2) 回生: 負荷から電源へ電力を供給すること。