

6.6 kV 系統に適用する Solid-State Transformer の損失解析

◎青柳 和樹 日下 佳祐 伊東 淳一

長岡技術科学大学 電気電子情報工学専攻

{aoyagi@stn|kusaka@vos|itoh@vos}.nagaokaut.ac.jp

1. はじめに

従来の配電システムでは、降圧のため商用周波数のトランスを使用する。しかし、商用周波数のトランスを用いた場合、体積、重量が非常に大きい⁽¹⁾。そこで著者らは、上記の問題を解決する一手法として、絶縁型電力変換器を多段に直列接続して構成した Solid-State Transformer (SST) を検討し、低圧にて動作検証および損失解析を行っている⁽²⁾。

本論文では、6.6 kV 系統へ適用した際の損失解析を行ったので報告する。

2. 回路構成

図 1 に提案する SST の回路構成を、表 1 に SST の仕様を示す。提案回路では高周波トランスの一次側に力率改善(PFC)回路と LLC 共振型コンバータを接続し、これらを 1 セルとして多段化する。PFC 回路は電源電流を力率 1、かつ正弦波状となるように制御する。LLC 共振型コンバータは、電源周波数に対して十分高周波で駆動することでトランス部の大幅な小型化を達成する。さらに、セルの電源側を直列多段化することにより高周波トランスの一次側には低耐圧、低オン抵抗の半導体スイッチを使用することが可能である。加えて、1 段あたりのスイッチング周波数を低減でき、スイッチング損失を低減することが可能である。

3. ミニモデルによる実機検証

図 2 に 3 セルを用いて AC200 V 入力、DC50 V 出力で取得したミニモデルでの動作波形を示す。図 2 より、入力電流は入力電圧に対して同位相の正弦波となっておりほぼ力率 1 で動作している。この時の入力電流 THD は 3.07% である。さらに、セル側に印加される電圧においては、3 段のマルチレベル波形となっている。出力電圧は、指令値である 50 V に追従しており、降圧動作が実現さ

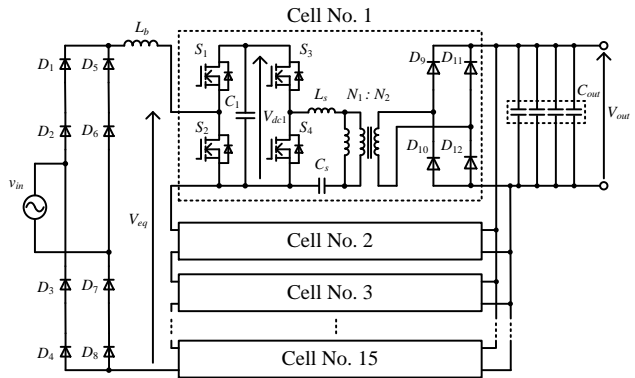


Fig. 1. Single-phase Solid-State Transformer.

Table 1 Circuit parameters of SST.

Input voltage	v_{in}	6600 V _{rms}
Rated output power	P_{out}	10 kW
Rated output voltage	V_{out}	320 V
Boost inductor	L_b	24 mH (%Z = 0.2%)
Primary side capacitor	C_1	48 μF
Resonant capacitor	C_s	330 nF
Leakage inductor	L_s	30 μH
Secondary side capacitor	C_{out}	6000 μF (1500 μF×4)
Switching frequency of PFC	f_{sw_pfc}	2 kHz
Resonant frequency	f_o	50 kHz
Number of cells	m	15
Trans turns ratio	$N_1:N_2$	1.1 : 1.0

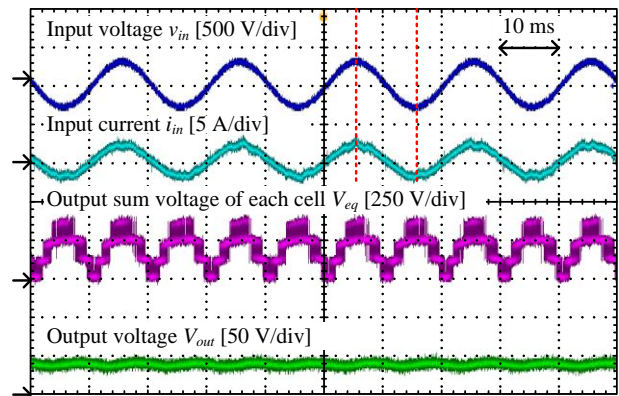


Fig. 2. Operation waveform of miniature model SST.

れていることが確認できる。なお、シミュレーションにより AC6.6kV 入力, 15 セルにて同様に所望の動作が得られることを確認している。

4. 損失解析

図 3 に 200 V 系統接続時のミニモデルの各部の損失の割合と実機実験により取得した損失分離の結果を示す。図 3 より、実験により得られた損失と比較して計算値は 5% 以下で一致しており、損失解析の妥当性を確認している。図より、損失の中でも二次側整流器の損失の占める割合が大きい。これはミニモデルでは二次側整流器部分に MOSFET のボディダイオードを使用して整流動作を行っているためである。

表 2 に選定した素子一覧を示す。6.6kV モデル SST には 1.2 kV 耐圧の SiC-MOSFET を使用することを想定し、セル段数は 15 段としている。なお、3.3 kV SiC を使えば、6 段にできる。また、一次側ダイオードブリッジは耐圧の関係上、各アームでダイオードを 2 直列に接続している。さらに、LLC 部分ではゼロ電流スイッチング(ZCS)が達成されていると仮定し、スイッチング損失をゼロとして計算している。出力側に接続されている電解コンデンサは 4 並列接続にすることで許容リップル電流に余裕を持たせている。

ここで、トランスは Gecko MAGNETICS を用いて設計する。Gecko MAGNETICS は improved-improved Generalized Steinmetz Equation (i²GSE)を用いて鉄損を算定し、データベースから最適なコア形状、コア材、巻線形状を選択する⁽³⁾。Gecko MAGNETICS を用いた解析より、提案回路ではコア材として EPCOS N95 を使用することで損失が最小となることが分かった。

図 4 に 6.6kV モデル(10kW) SST の損失の内訳を示す。結果より設計した SST は効率 98% 以上が期待できる。これは、一般的に使用されている柱上変圧器とほぼ同等の効率である⁽⁴⁾。

5. まとめ

本論文では、SST を 6.6 kV 系統へ接続することを想定したシステムの損失解析を行った。

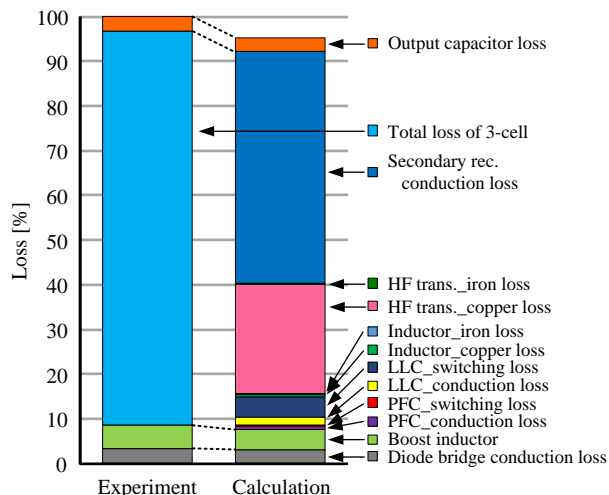


Fig. 3. Loss separation result of miniature model 2 kW SST by experiment and calculation.

Table 2 Selected components.

Part	Marking	Maximum rating	Number of device
$D_1 \sim D_8$	mitsubishi RM250DG-130F	6.5 kV 250 A	8
$S_1 \sim S_4$	CREE C2M0025120D	1.2 kV 90 A	60
$D_9 \sim D_{12}$	ROHM SCS212AM	650 V 15 A	60

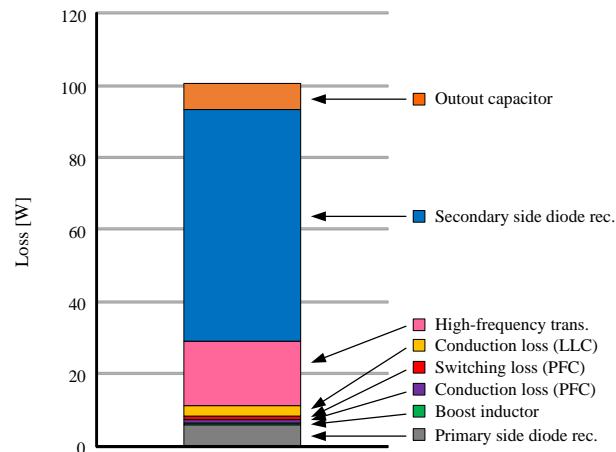


Fig. 4. Loss separation result of 10 kW SST by calculation.

損失解析から、効率 98% 以上が期待でき、一般的な柱上変圧器と同等の効率を得ることが可能であることが分かった。

今後は、実機による高電圧印加時の動作検証を行う予定である。

文 献

- (1) X Yu et al: IEEE Trans., Vol. 5, No. 2, pp.954-965 (2014)
- (2) 青柳和樹 他: JIASC, R1-15, 1-147 (2017)
- (3) J. Muhlethaler et al: IEEE Trans., Vol. 27, No. 2, pp.964-973 (2012)
- (4) 日本規格協会: JIS C 4304 (2017)