

## DEVELOPMENT OF IEGT SWITCH FOR A LONG PULSE MODULATOR

Manabu Souda<sup>1,A)</sup>, Takashi Saito<sup>A)</sup>, Choji Yamazaki<sup>A)</sup>, Ikuo Watanabe<sup>B)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>C)</sup>,  
Shigeki Fukuda<sup>C)</sup>, Tetsuo Shidara<sup>C)</sup>, Hiroyuki Honma<sup>C)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Toshiba-Mitsubishi Electric Industrial Systems Corporation (TMEIC)

1, Toshiba-cho, Fuchu, Tokyo, 183-8511

<sup>B)</sup> Toshiba Corporation (Toshiba)

8, Shinsugita-Cho, Isogo-Ku, Yokohama, 235-8523

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

An IEGT switch has been developed for a long pulse modulator. This switch consists of six IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) devices connected in series. It is worth to mention that the IEGT is able to handle a large current and can be connected in series easily. Additionally, since a low inductance structure was adopted in this design, the snubber capacitance is able to be only 3.5 $\mu$ F for each device. Several evaluation tests were carried out. First, a turn off test at 9kV-4200A was performed, which represented the severest condition for the switch. The test result showed that the transient voltage of the whole switching device was 16.1kV and the transient voltage for each device impressed a maximum stress of 3.7kV. Second, at the continuous output test, it was verified that the IEGT switch was able to switch 9kV-2100A-1.7ms-5Hz continuously. At last, a protection test for a short circuit in the klystron was examined. The test result showed that the energy consumed in the klystron was 4.7J during the short circuit fault. In summary, the IEGT switch achieved sufficient performance for a long pulse modulator.

## 長パルスモジュレータ用 IEGTスイッチの開発

### 1. はじめに

現在、世界各国においてILC建設に向けた技術開発が進められており、日本ではKEKにSTFを建設し、超伝導加速器技術の確立を進めている<sup>[1]</sup>。STFでは、10MW-MBK (Multi-Beam Klystron) 駆動用パルスモジュレータとして、パルストランス昇圧形のバウンサ方式パルスモジュレータの開発を進めている。本方式は、TTF (TESLA Test Facility) で開発され<sup>[2]</sup>、現在10台近くが運転されており、長パルスモジュレータの標準タイプとなっている。本方式では、パルストランス (以下PT) 1次側に配置されるスイッチ部には高電圧、大電流が要求される。今回スイッチング素子として高耐圧化及び大電流通電に適したIEGTを適用し、10kV-2000A級のIEGTスイッチを開発し評価試験を実施したので報告する。

### 2. パルスモジュレータ

#### 2.1 回路構成

図1に開発したモジュレータの回路構成を、表1に定格諸元を示す。モジュレータは、コンデンサバンク、IEGTスイッチ、エネルギー吸収回路より構成される。実際のシステムではパルス通電中のサグを補償するためのバウンサ回路が接続されるが、今回

の開発では省略している。

コンデンサバンクは入力電圧9kVにおいて、17MW-1.7ms通電中のサグが20%程度となる容量として2200 $\mu$ Fとした。

表1: STFパルスモジュレータ要求仕様

項目	仕様
出力電圧	120kV
出力電流	140A
クライストロン等価抵抗	857 $\Omega$ (2次側換算)
パルス幅	1.7ms
パルス平坦度	$\pm 0.5\%$
Klystron短絡時許容注入エネルギー	20J以下
パルストランス昇圧比	1:15

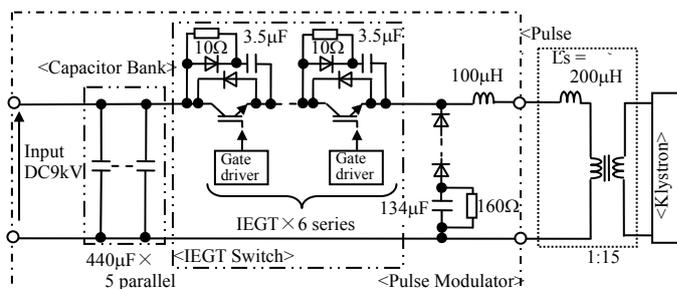


図1: モジュレータ回路構成

#### 2.2 IEGT スイッチ

スイッチには高耐圧化、大電流通電に適した

<sup>1</sup> E-mail: SOUDA.manabu@tmeic.co.jp

IEGT (4500V-2100A) を適用し、6直列構成としている。IEGT素子を適用する利点を以下に示す。

- 1)安全動作領域が広い (大電流遮断可能)
- 2)ゲート駆動電力が小さい
- 3)高耐圧で直列数低減可能 (小型化,高信頼化)
- 4)直列接続構成 (高耐圧化) が容易 (小型化)

電流遮断時にコンデンサバンクからエネルギー吸収回路までの一巡回路インダクタンス (以下一巡L) に蓄えられている電磁エネルギーを吸収し、直列間の過渡電圧バランスを均等化するため、各素子にはRDCスナバ回路が接続されている。各コンデンサ容量は3.5 $\mu$ Fとした。スナバコンデンサを1素子ごとに上下対称配置することでスイッチ長を最短としている。大電流遮断時のスイッチ両端過渡電圧上昇を抑制するため、IEGT素子とリターンパス間に絶縁物を挿入し近接配置する構造により、一巡Lの値が3 $\mu$ Hとなる低インダクタンス化を実現した。

スイッチには1素子以上の直列冗長性を持たせ、素子毎に短絡故障検出回路を設けることにより、万一短絡故障が発生しても、残り5素子で電流を遮断し、装置を停止させることで信頼性を向上させている。

図2にIEGTスイッチ外観、図3にIEGTスイッチスタック部拡大外観写真を示す。スイッチ部の外形はW:900mm×D:920mm×H:685mmである。

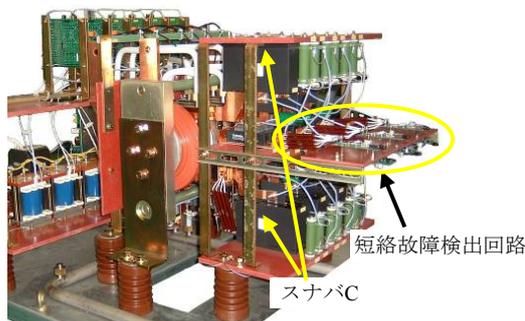


図2: IEGTスイッチ外観写真

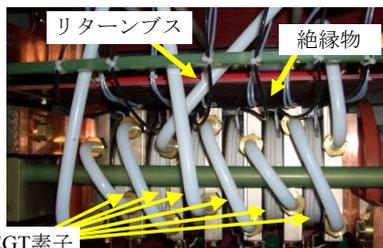


図3: IEGTスイッチスタック部拡大写真

### 2.3 エネルギー吸収回路

エネルギー吸収回路のコンデンサは、電流遮断時限流リアクトル及びPT漏れインダクタンスの電磁エネルギーにより電圧が上昇する。3300A遮断時の電圧上昇を5kV以下とする容量として134 $\mu$ Fとした。また、クライストロン短絡時このLC共振回路によりクライストロンへの短絡電流が継続する。共振電流継続時間 (共振周期の1/4) は315 $\mu$ sと計算される。

### 2.4 解析による確認

- (1) Klystron短絡、(2) PT1次側短絡 (または飽和)

時の過電流遮断を模擬した条件で回路解析を実施した。解析条件を表2に、解析結果を図4、5に示す。

図4より、エネルギー吸収回路によるスイッチ全体の電圧上昇は4.9kV、共振電流継続時間は317 $\mu$ sである。

図5は9kV-4200Aを遮断した時の解析結果で、一巡Lによる過渡電圧上昇が最大となる。解析結果より、スイッチ全体の過渡電圧上昇は16.4kVであり、電圧アンバランスを20%見込んだ場合でも、1素子あたりの電圧は3.3kVとなることから、素子最大定格電圧4.5kVに対して十分余裕がある。

表2: モジュレータ回路解析条件

	入力電圧	出力L	遮断電流
(1)	9kV	300 $\mu$ H	3300A
(2)	9kV	100 $\mu$ H	4200A

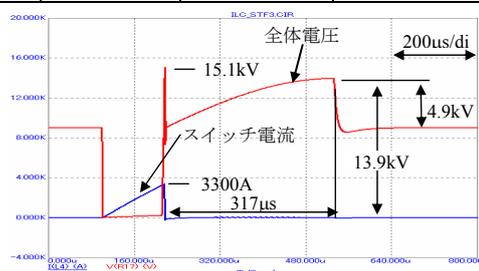


図4: Klystron短絡模擬過電流遮断解析結果

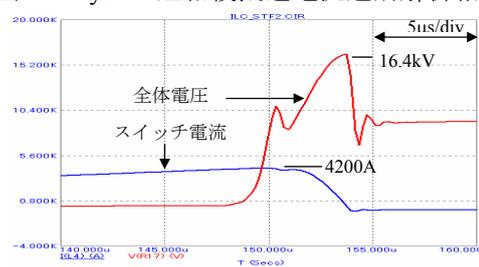


図5: PT1次側短絡模擬過電流遮断解析結果

## 3. 評価試験

### 3.1 過電流遮断試験

図6に過電流遮断試験回路を示す。試験は (1) Klystron短絡模擬試験、(2) PT1次側短絡模擬試験について実施した。試験条件を表3に示す。

表3: 過電流遮断試験条件

	入力電圧	負荷L (Total L)	過電流検出値	電圧上昇率
(1)	9kV	200 (300) $\mu$ H	2520A	30A/ $\mu$ s
(2)	9kV	0 (100) $\mu$ H	2520A	90A/ $\mu$ s

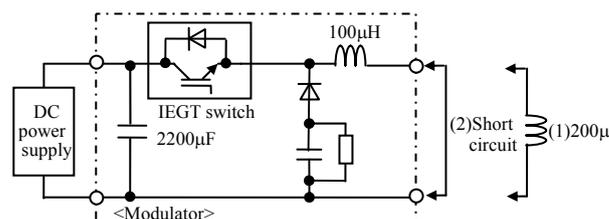


図6: 過電流遮断試験回路

図7に試験条件 (1) での過電流遮断時の波形を

示す。遮断電流は3300A、一巡Lによる過渡電圧上昇は14.8kV、エネルギー吸収回路による過渡電圧上昇は13.6kV、共振電流継続時間は330 $\mu$ sであった。試験結果は図4に示す解析結果と良く一致している。

図8に試験条件(2)(最過酷条件)での過電流遮断時の波形を示す。遮断電流は4200Aとなった。一巡Lによるスイッチ全体過渡電圧上昇は16.3kVであり、解析結果と良く一致している。また、IEGT6のターンオフタイミングを他の素子より1 $\mu$ s速くして試験した結果、IEGT6の過渡電圧上昇は3.7kV、電圧アンバランスは37%であった。実際には、ターンオフタイミングのばらつきは1 $\mu$ s以下に調整可能であり、1素子当たりの最大印加電圧は3.7kV以下となることを検証済みである。

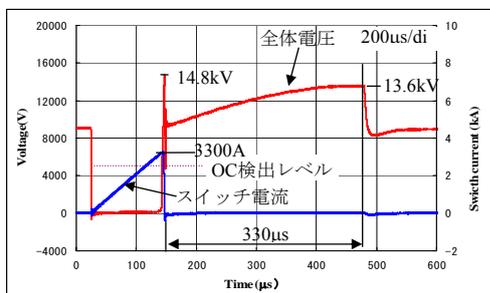


図7：過電流遮断試験波形 (klystron短絡模擬)

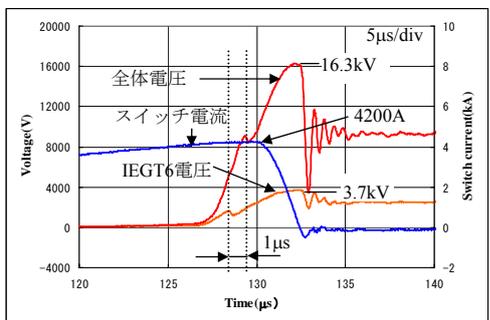


図8：過電流遮断試験波形 (PT1次側短絡模擬)

### 3.2 連続通電試験

図9に連続通電試験回路を示す。負荷は(200 $\mu$ H+3.9 $\Omega$ )を直列接続し、入力電圧9kV、パルス幅1.7ms、繰返し5Hzで連続通電試験を実施した。

図10に連続通電試験の波形を示す。試験結果より、IEGTスイッチは9kV-2100A-1.7ms-5Hz連続通電が可能であることが確認された。

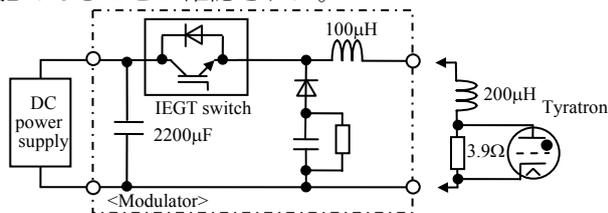


図9：連続通電試験回路

### 3.3 ブレークダウン試験

Klystron短絡保護動作確認試験のため、図9の試験

回路に示すように3.9 $\Omega$ の抵抗と並列にThyratronを接続し、パルスONから500 $\mu$ s後にThyratronをONし、ブレークダウンを強制的に発生させた。図11の試験結果より、遮断電流3050A、遮断遅れ時間34 $\mu$ sであった。Klystron短絡中の注入エネルギーは短絡中のアーク電圧を100V一定と仮定すると、共振電流継続時間の注入分も含めて4.7Jであり、仕様である20J以下を達成している。

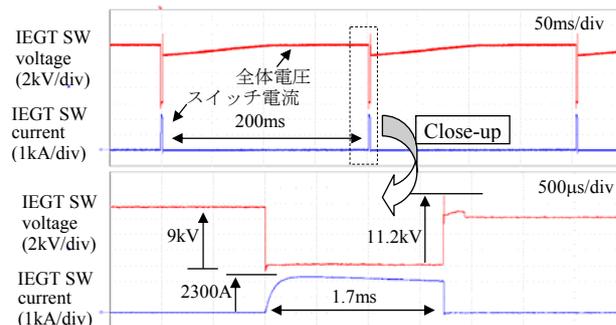


図10：連続通電試験波形

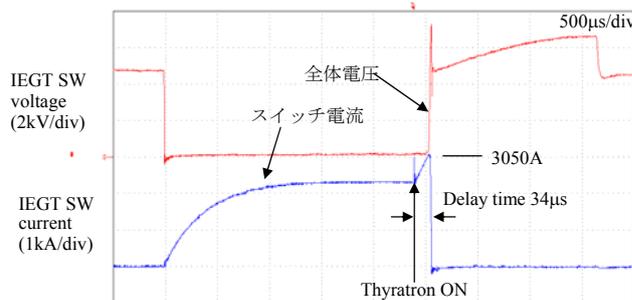


図11：ブレークダウン試験波形

## 4. まとめ

高耐圧化、大電流通電に適したIEGT素子を適用した長パルスモジュレータ用IEGTスイッチを開発した。スイッチ部を低インダクタンス構造とすることで、素子毎のスナバコンデンサ3.5 $\mu$ Fのみとした。

開発したIEGTスイッチに対して、種々の評価試験を実施した。9kV-4200Aの最過酷条件での過電流遮断結果から、スイッチ両端電圧16.3kV、最大電圧が印加される素子の電圧は3.7kVであり、素子定格電圧に対して十分裕度があることが確認された。連続通電試験結果から、9kV-2100A-1.7ms-5Hz連続通電可能であることが確認された。更に、ブレークダウン試験結果から、Klystron短絡時のエネルギー注入量は4.7Jであり、仕様を満足する結果が得られた。

以上より、IEGTスイッチは長パルスモジュレータに適用できることが確認された。

## 参考文献

- [1] S. Fukuda et al., "RF Source of Superconducting RF Test Facility(STF) in KEK", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 2-4, 2006, Sendai Japan, P130-132.
- [2] H. Pfeffer, et al., "A Long Pulse Modulator for Reduced Size and Cost", FERMILAB-Cnf-94/182, (1994).