

## DEVELOPMENT OF A 45KV, 6KA SEMI-CONDUCTOR SWITCH FOR KLYSTRON MODULATORS

M. Akemoto<sup>\*)</sup>, H. Honma and S. Anami

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801 Japan

### Abstract

We are developing a solid-state switch to replace thyratrons for klystron pulse modulators. The solid-state switch has the potential to operate with higher efficiency than thyatron switch and with a much longer lifetime. The SI-thyristor designed for pulsed power applications is suitable for this purpose because of its high-power handling and fast turn-on capabilities. We have designed and built a 45 kV solid-state switch which consists of 15 SI-thyristors stacked in series. The switch has been successfully operated at 45 kV, 6000 A peak current, 6  $\mu$ s pulse-width and 25 Hz repetition rate.

### クライストロン電源用 45 kV、6 kA 半導体スイッチの開発

#### 1. はじめに

近年、半導体パワーデバイスは目覚ましい発展をとげており、装置の寿命・品質を向上させるために、スイッチング素子の半導体化が積極的に進められている。[1]大型の線形加速器に用いる大電力クライストロン用パルス電源では、電圧・電流・高速スイッチングの仕様が非常に高いために従来サイラトロンスイッチのみが用いられてきているが、これを半導体スイッチに置き換える技術開発は大いに期待される。

SIサイリスタ(Static Induction Thyristor)[2]は、高耐圧化が容易で、低損失・大容量・高速デバイスであり[3]、大電力クライストロン用パルス電源用スイッチに対して非常に高い適正を有している。本稿は、このSIサイリスタを15素子直列接続した45kV半導体スイッチを試作し、実際のクライストロン用パルス電源で大電力評価試験を行ったのでその報告をする。

#### 2. 半導体スイッチの概要

表1に半導体スイッチの目標性能を示す。使用したSIサイリスタは、日本ガイシ(株)で開発されたもので、SIサイリスタとフリーホイーリング・ダイオードを一体化した逆導通型デバイスで、平型圧接パッケージ、4kV耐圧、RT103Nである。このSIサイリスタの性能から、素子を並列化しないで直列接続のみで構成することができる。図1に15素子を直列接続した半導体スイッチの外

観を示す。各段には、ゲートドライブ回路及び直流電圧バランスをとるための分圧抵抗(1M /10W 2並列)、スイッチング時のバランスをとるための分圧コンデンサ(220pF)、デバイスを過電圧破壊から守るためのアレスタ(3.7kV)がSIサイリスタに並列接続されている。この本体は冷却と電気的絶縁のために円柱型(高さ550mm、直径300mm)の絶縁油タンクに収納し、冷却のために絶縁油を循環させる。また低インダクタンスにするために、タンクをその外導体とする同軸構造にした。

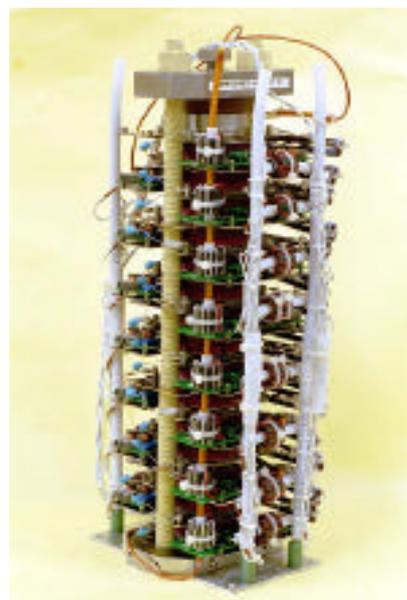


図1 半導体スイッチの外観

<sup>\*)</sup> M. Akemoto, 0298-64-5200-4246, mitsuo.akemoto@kek.jp

表 1 半導体スイッチの主な性能

|          |           |
|----------|-----------|
| パルスピーク電圧 | 最大45kV    |
| パルスピーク電流 | 6kA       |
| パルス幅     | 6 $\mu$ s |
| パルス繰り返し  | 50Hz      |
| スイッチング時間 | 200ns     |

### 3. 試験回路

実際のクライストロンパルス電源[4]を使用して、半導体スイッチの大電力試験を行った。サイラトロンスイッチとの性能比較をするため、スイッチのみを置き換えるかたちで試験を行った。図2に試験に使用したパルス電源の回路構成を示す。逆導通型デバイスをを使用した半導体スイッチであるので、パルス成形回路(PFN)の逆充電を防止するためのEnd of Line Clipper(EOLC)回路がPFNに接続されている。またこの電源ではインパータ電源を用いたコマンド充電方式を採用している。PFNは0.045 $\mu$ Fのコンデンサを9段接続したものを2並列とし、インパータ電源によって19msで45kVまで定電流でPFNを充電し、ホールド時間5ms後半導体スイッチを点弧して放電させ、1:15のパルストランスによって出力電圧を15倍に昇圧し、SLAC製の5045型クライストロンに印加する。半導体スイッチのアノード電圧は高圧プローブ(岩崎通信機製HV-P60)で測定し、アノード電流はPFNの戻りのラインに挿入したCT(Pearson製Model 3025)を用いて測定した。また同時にクライストロンの印加電圧、ビーム電流はパルストランス内にある容量分圧器及びCTでそれぞれ測定した。

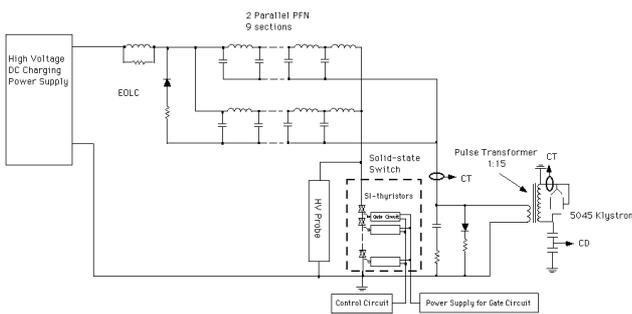


図2 パルス電源の回路構成

### 4. 試験結果

パルス電源は繰り返し25Hz(充電器の最大能力)で運転を行った。PFN充電電圧を20、30、40、45kVと徐々に上げて、各電圧での波形とスイッチの損失の熱量測定を行った。

#### 4.1 通電特性

図3に充電電圧45kVでの半導体スイッチのアノード電圧・電流波形を示す。この波形からピーク電流6000Aを得た。また $di/dt$ は10kA/ $\mu$ sであった。図4に、同じ条件でのサイラトロンスイッチ(EEV社製50kV耐圧CX1536A)を使用した時の、アノード電圧・電流波形を示す。両者を比較すると、スイッチング時間(アノード電圧立ち下がりの90%-10%間の時間)は、半導体スイッチは208nsで、サイラトロンスイッチは40nsであった。5倍の差はあるが、電流の立ち上がりは、ほとんどパルストランスを含む出力回路の時定数で決まっているので、両者の出力波形の立ち上がりには大きな違いは現れていない。しかし、半導体スイッチのゆっくり立ち下がる分は、スイッチの損失となり発熱となる。以上の結果から、この半導体スイッチは大電力サイラトロンに匹敵する十分なスイッチング能力があることが確認できた。図5に充電電圧45kVでのクライストロンの電圧・電流波形を示す。この波形が示す、ピーク電圧361kV、ピーク電流376A、パルス幅6 $\mu$ sから、ピーク出力電力は136MWであることが分かる。今までサイラトロンスイッチのみ可能であった100MW級の大電力パルススイッチングを、今回の半導体スイッチで実現できることが確認できた。

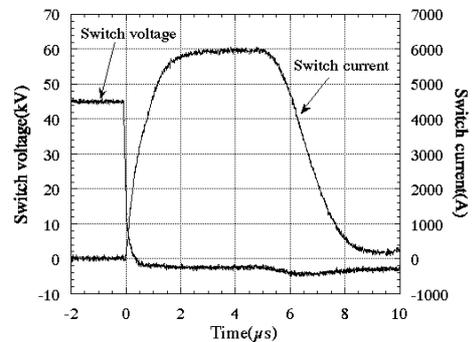


図3 半導体スイッチの電圧・電流波形

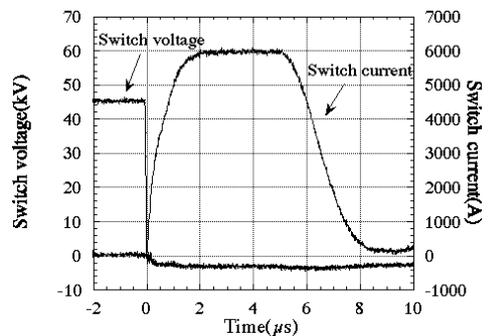


図4 サイラトロンスイッチの電圧・電流波形

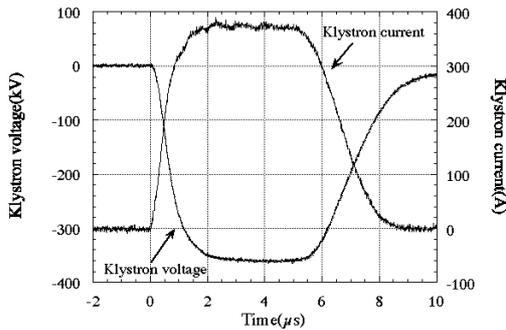


図5 クライストロンの電圧・電流波形

#### 4.2 スイッチ損失

スイッチの損失は通常スイッチ電圧・電流波形から求められるが、大電力のもとで精度の高い測定は困難なため、ここでは信頼性の高い熱量測定の方法で半導体スイッチの損失を評価した。半導体スイッチの冷却システムはスイッチ本体が入っている絶縁油タンク、ポンプとラジエーターから構成される密閉循環システムである。タンクの入出口の熱電対により油の温度を常時モニターし、その温度差と流量(4.7l/min.)からタンク内に発生した熱量、すなわちスイッチの損失を測定した。この試験では1度の温度差で130Wのスイッチの損失になる。タンク内の温度が定常となまでに約1時間の連続運転が必要であった。表2にPFN充電電圧20、30、40、45kVのときのPFNの蓄積エネルギーとスイッチの損失の関係を示す。PFN充電電圧45kVでは、タンクの出口と入口の温度差は、8.5まで上昇し、スイッチの損失が1.1kWに達する。当然、高い繰り返しでは大きなエネルギー損失になる。表からスイッチの損失がPFN蓄積エネルギーの約5%占めていることが分る。また、この損失はPFN充電電圧の二乗に、即ち蓄積エネルギーに比例して増加していることも分かった。

スイッチの損失は分圧抵抗、ゲート回路そしてデバイスによるものと分類することができる。分圧抵抗は充電電圧波形から計算し、ゲート回路は基板に送られる電力の実測値から見積もった。その残りをデバイスの損失とした。表2にそれぞれのPFN充電電圧での損失を示す。充電電圧45kVでは、デバイスによる損失割合が90%に達し、スイッチの損失は殆どデバイスの損失であることが分る。従って、スイッチの損失の低減には、デバイスの改善が強く要求される。

#### 5. まとめ

SIサイリスタを15素子直列した45kV半導体スイッチを試作し、実際のクライストロンパルス電源で試験を行

った。その結果は、大電力サイクロトロンに匹敵する十分なスイッチング能力があることを示した。またスイッチの損失はPFNに蓄積されたエネルギーの約5%損失することことが分かった。高い繰り返しではかなりの損失になるので、今後の課題になるが、大電力クライストロン用パルス電源のサイクロトロンスイッチの半導体化に対して大きな見通しを得たとと言える。

表2 スイッチの損失とPFN充電電圧の関係

| PFN<br>充電電圧<br>(kV) | PFN蓄積<br>エネルギー<br>(J/pulse) | スイッチ<br>の損失<br>(J/pulse) | スイッチの損失の内訳        |                    |                   |
|---------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|                     |                             |                          | 分圧抵抗<br>(J/pulse) | ゲート回路<br>(J/pulse) | デバイス<br>(J/pulse) |
| 20                  | 162                         | 9.4<br>(5.8%)            | 0.98<br>(10.5%)   | 0.8<br>(8.5%)      | 9.6<br>(81.0%)    |
| 30                  | 365                         | 21.3<br>(5.8%)           | 1.92<br>(9.0%)    | 0.8<br>(3.8%)      | 18.6<br>(87.2%)   |
| 40                  | 648                         | 32.8<br>(5.1%)           | 2.77<br>(8.5%)    | 0.8<br>(2.4%)      | 29.2<br>(89.1%)   |
| 45                  | 820                         | 41.1<br>(5.0%)           | 3.10<br>(7.4%)    | 0.8<br>(2.4%)      | 37.2<br>(90.7%)   |

( )内はPFN蓄積エネルギーに対する割合、スイッチの損失の内訳( )内は全損失に対する割合

#### 謝辞

本研究に際し、菅原機構長、木原加速器研究施設長、高田加速器研究総主幹にご理解と多くのご指導を頂きました。ATFグループの方々には試験の協力を頂きました。日本ガイシ(株)清水尚博氏、小松製作所(株)吉田大輔氏に大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] K. Sato et al., "Development of Long-Pulse, High-Frequency Pulse Modulator for S-band Klystron," Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, (1999)206.
- [2] N. Shimizu et al., "4kV Reverse Conducting Static Induction Thyristor," 10th SI Device Symposium, SSID-97-6, 1997.
- [3] M. Akemoto et al., "Development of a High-Power Klystron Modulator with SI-Thyristor Switch," Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, (1999)101.
- [4] S. Morita et al., "Test Operation of the Klystron Modulator Using Inverter Power Supply," Proc. of the 23<sup>rd</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (1998)255.