

クライストロン電源用半導体スイッチの開発

横山和也^{A)}、青木謙一^{A)}、清水尚博^{B)}、明本光生^{C)}

^{A)} 住友重機械工業株式会社

〒188-8585 東京都西東京市谷戸町 2-1-1

^{B)} 日本ガイシ株式会社

〒467-8530 愛知県名古屋市瑞穂区須多町 2-56

^{C)} 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

現在、加速器電源で用いられている PFN 型クライストロン電源用の大電力スイッチとしてサイラトロンが用いられている。しかしながら寿命、メンテナンス性を考慮すると高電圧、大電流スイッチの半導体化が望まれる。

SI サイリスタを用いた半導体スイッチの開発を行い、試験で試作したスイッチは逆電流耐量が少ないことが判明した。そこで半導体スイッチを安全に動作させるための改良を行った。

1. はじめに

静電誘導サイリスタ(SI サイリスタ)は大電流を容易に扱え、高い di/dt を特徴とした素子であり^[1]、高電圧・大電流スイッチに使用できると考えられる。

本報告では試作した静電誘導サイリスタを使った高電圧スイッチ(45 kV・6 kA・25 Hz)の逆電流対策について報告する。

本開発は高エネルギー加速器研究機構(KEK)、日本ガイシ(株)、住友重機械工業(株)が共同で行っている。

2. 半導体スイッチ

昨年度より PFN 型大電力クライストロン電源で用いているサイラトロンの置き換えを目指し、半導体スイッチを試作した。半導体スイッチの仕様を表 1 に示す^[2]。この仕様は ATF や KEKB で用いられているクライストロン電源でのサイラトロンの仕様に準じている。

半導体スイッチには日本ガイシ(株)製の逆導通

型 SI サイリスタ RT103P を使用した。この素子の仕様を表 2 に示す。SI サイリスタ 15 個を直列に接続し、45 kV 耐圧とした。スイッチは高圧絶縁油を強制循環させて冷却を行う。各 SI サイリスタにはゲート回路が付属しており、この回路によって SI サイリスタのゲートを制御する。各ゲート回路はゲートドライブ装置からトリガ信号と電力が供給されている。

3. 半導体スイッチの逆電流の問題と対策

3.1 半導体スイッチの逆電流の問題

試作した半導体スイッチは信頼性試験の一環として行った ATF クライストロン電源での一次側短絡状態のテストで、40 kV の印加電圧まで正常に動作した。このときの順電流は 12 kA、逆電流は 10.5 kA であった。印加電圧を定格の 45 kV にしたところ、SI サイリスタが破損した。この試験により SI サイリスタは逆電流に対する耐量が低いことが確認された。その後の解析により破壊のほとんどは過大なパルス状の逆電流によるゲート-カソード間の破壊であった。この破壊現象は次のように説明できる。

順方向電流がゲートからカソードに流れた後急激に逆方向電流が流れたとき、ゲート-カソード間に逆電圧が発生する。これはダイオードの逆回復現象に対応するものである。このとき SI サイリスタ内の p n 接合が均一に逆回復できないと、逆回復の遅れた個所でエネルギーの集中が発生し破壊に至る。そこで SI サイリスタ内部に流れる逆電流を低減するために外部に高速ダイオードを並列に設置し、素子内に流れる逆電流をバイパスする方法が考えられる。

表 2 : SI サイリスタ RT103P の仕様

ピーク繰り返しオフ電圧	4000 V
ピークアノード di/dt	100 kA/ μ s
ピークゲート電流	300 A
直流ゲート逆電圧	36 V
ピークオン電圧	2.0 V

表 1 : 半導体スイッチの仕様

ピーク電圧	45 kV
ピーク電流	6 kA
パルス幅	5.5 μ s
繰り返し	50 Hz

3.2 逆電流の評価方法

素子内部には SI サイリスタ構造とダイオード構造の 2 つの構造が逆並列に構成されているため、SI サイリスタ自体に流れる逆電流の観測はできない。そこでゲート-カソード間に発生する電圧を利用した。

逆電流とゲート-カソード間に発生する電圧の関係を調べるために図 1 に示す回路で実験を行った。コンデンサに直流電源で充電し、所定の電圧になったところで SI サイリスタにトリガを送る。逆電流はコンデンサから放電された電荷のゆれ戻しを利用している。図 2 にこの回路で SI サイリスタに逆電流を流したときの、電流とゲート-カソード間に発生する電圧を観測した波形の例を示す。SI サイリスタに逆電流を流すと、ゲート-カソード間に逆電流が流れ始めるとき逆電圧が発生する。この図にあらわれているように逆電流の流れ始めるときにゲート-カソード間にパルス状の負電圧が発生することが分かる。

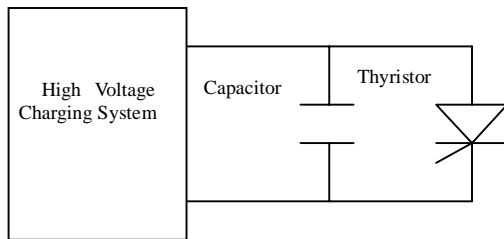


図 1 : テストベンチ概略図

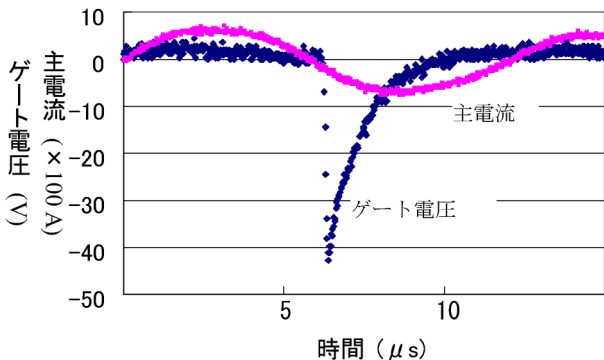


図 2 : 主電流とゲート電圧

逆電流とゲート-カソード間に発生する電圧の関係を調べた。図 3 に逆電流とゲート-カソード間の電圧との関係をプロットしたものを示す。この負電圧の波高は逆電流が大きくなるとともに増大することが分かる。この素子は約 4 kA の逆電流で破壊にいたった。この特性は逆電流の di/dt や SI サイリスタを構成するシリコン基板のキャリアのライフタイムの調整などで異なるので注意を要する。しかしゲート-カソード間に発生する負電圧をゲート-カソード間の電圧から素子の健全性をはかることができる。

一方 RT103P のゲート-カソード間の電圧と電流の関係を図 4 に示す。今回準備した RT103P のゲート-カソード間のブレイクダウン電圧は 45 から 50V であった。RT103P の直流ゲート-カソード間の定格は 36 V であるが、素子の破損がゲート-カソード間の接合におこるため、ゲート-カソード間に発生する負電圧が直流でのゲート-カソード間のブレイクダウン電圧以下であれば SI サイリスタに損傷がないものと考えられる。そこでゲート-カソード間に発生する電圧が 40 V 以下であるなら安全に動作しているとみなすことにした。図 1 の回路でこの値が 40 V になるのは逆電流が 1250 A のときであった。

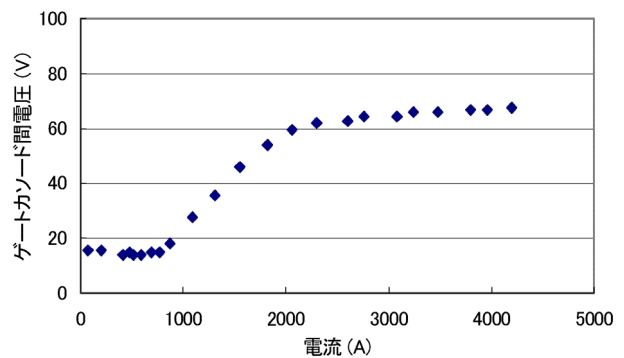


図 3 : 逆電流とゲート電圧の関係

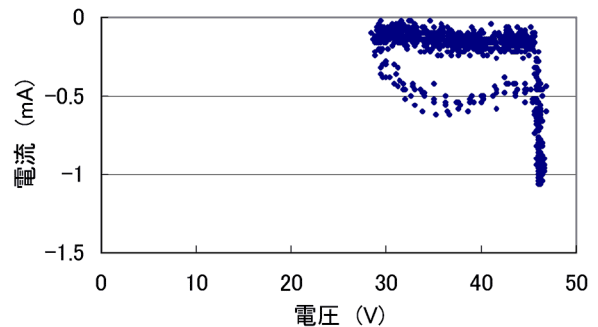


図 4 : ゲート-カソード間の電流-電圧特性

3.3 実験

図 5 に示した保護回路を SI サイリスタに設置した。図に示したとおり、素子ごとに逆並列にダイオード (VMI 社製 K 5 0 U F、5 kV 耐圧) を設置するとともに、素子 3 直列をひとつのユニットとしユニットごとに同様のダイオードを逆並列に、さらに 15 直列の最外周に大型のダイオード (HVCA 社製 6 H V 5 0 K、50 kV 耐圧) を設置した (図 5)。

SI サイリスタが破壊する逆電流の値は逆電流のピークの値だけではなく、逆電流のパルス幅や波形な

どにも依存する。そこでこの保護回路を図1の回路を用いた正弦波形をした電流と、PFNを用いた矩形波の2つの電流波形で測定を行った。

図1の評価回路で各ダイオードを設置したときの分流比を表3に示す。電流はまず、最外周に設置したHVCA社製ダイオードへと分流し、その後ユニット単位で設置したVMI社製ダイオード、各段に配置したダイオードへと分流し、その残りがSIサイリスタへと流れ込む。HVCA社製ダイオードで分流される前の全体の逆電流を I_t 、HVCA社製ダイオードで分流された後に半導体スイッチ側に流れ込む電流を I_1 、ユニットごとに設置されたVMI社製ダイオードで分流された後に半導体スイッチ側に流れ込む電流を I_2 とした。分流比はゲート-カソード間に発生した負電圧から電流値を推測して求めた。この結果よりSIサイリスタに流れ込む電流は分流される前の電流の1%程度と見込まれる。

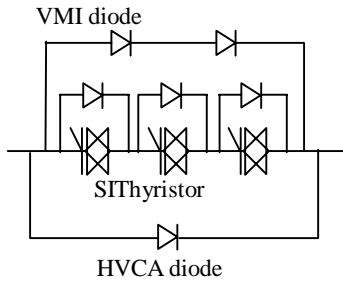


図5：逆電流保護回路

表3：各ダイオードの分流比

	ダイオードを経由する逆電流
HVCA製6HV50K	$0.95 \cdot I_t$
VMI製K50UF(ユニット)	$0.6 \cdot I_1$ ($I_1=0.05 \cdot I_t$)
VMI製K50UF(各段)	$0.6 \cdot I_2$ ($I_2=0.4 \cdot I_1$)

図6は矩形波で試験を行ったときの、主電流と図5に示したHVCA製ダイオードに流れる電流の様子である。電流はカレントモニターで測定を行った。このとき逆電流の90%以上がHVCA社製ダイオードに流れ、ゲート-カソード間に負パルスは観測されなかった。図6の電流の方向は、主電流はスイッチのアノードからカソードに流れる方向を正に、HVCA社製ダイオードに流れる電流はダイオードのアノードからカソードに流れる方向を正とした。

HVCA製ダイオードに流れる電流を見る限りは波形の違いによる分流比への影響はあまり見られなかった。

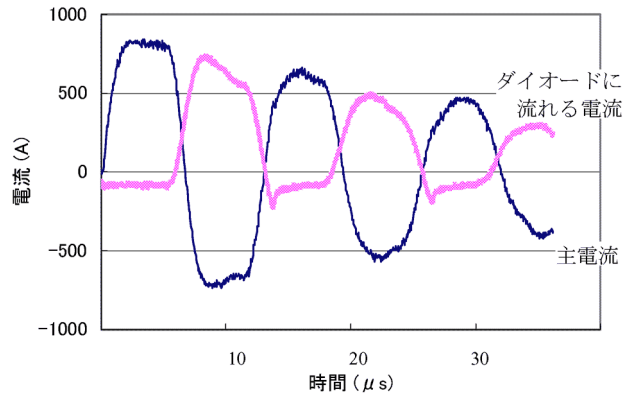


図6：ダイオードに流れる電流

3.4 結果

保護回路としては素子各段に高速ダイオードを設置するよりも、電源側に大型ダイオードをいれたほうが良好な結果がえられた。しかし電源側にダイオードを入れた場合、電源からスイッチまでの配線のインダクタンスによって保護効果が代わる可能性があるため、実機の保護回路として両方式を併用する。

4. 今後の予定

素子の破壊は逆電流導通時の電流集中によるものであるが、この破壊は逆電流の総エネルギーに依存するものか、ピークエネルギーに依存するものかは不明である。今後15直列半導体スイッチに保護回路を実装し、安全性の実証試験を行った上でスイッチ性能及び長期安定性に関して評価を行うとともに、破壊がピークエネルギーと総エネルギーのどちらに依存するものであるか調査する予定である。

5. 謝辞

本データをとるにあたりトリガ回路に関する情報などを提供いただきました小松製作所の方々にお礼を申し上げます。

また実験サイトの提供と試験の協力をいただきましたATFの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] M.Akemoto et al, "Development of A High-Power Klystron Modulator with SI-Thyristor Switch", Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 7-9, 1999
- [2] M.Akemoto et al, "Development of A 45kV, 6kA Semi-conductor Switch for Klystron Modulators", Proc. of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 12-14, 2000