

[09-A09]

DEVELOPMENT OF A HIGH-POWER KLYSTRON MODULATOR WITH SI-THYRISTOR SWITCH

M. Akemoto, S. Anami, H. Honma, N. Shimizu^A and D. Yoshida^B

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801 Japan

^ANGK Insulators, Ltd.

2-56 Suda-cho, Mizuho-ku, Nagoya, 467-8530 Japan

^BKomatsu Ltd.

1200 Manda, Hiratsuka-shi, Kanagawa-ken, 254-8567 Japan

Abstract

We are developing a solid-state switch to replace thyratrons for high-reliability klystron modulators of linear colliders. The SI-thyristor designed for pulsed power applications is suitable for this purpose because of its high-power handling and fast turn-on capabilities. Fast turn-on characterization of five stacked SI-thyristor connected in series has been studied using a low inductance circuit. A maximum current of 10kA and di/dt of 110kA/ μ s with an anode voltage of 15kV were obtained.

SIサイリスタスイッチを使用した大電力クライストロンパルス電源の開発

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、大出力ガスレーザ等のパルス電源に積極的に適用されている。そこで我々は、従来大電力クライストロン用パルス電源に使用されてきたサイラトロンを寿命及びメンテナンス問題[1]から半導体スイッチに置き換える技術開発を行っている。

サイラトロンスイッチの半導体化には、デバイス単体の定格から直列接続による高電圧化、並列接続による大電流化する方法で対応することになるが、立ち上がりの早いスイッチングを実現するためには高 di/dt 耐量が必要で、高速のターンオン特性のデバイスが要求される。SIサイリスタ(Static Induction Thyristor)[2]は、高耐電圧化が容易な低損失・大容量・高速デバイスであり[3,4]、この要求に対して非常に高い適正を有している。

今回、SIサイリスタ素子の高耐電圧化及び高速ターンオン特性の実験的検証をするために、SIサイリスタを5素子直列接続によるターンオン特性の評価試験を行ったのでその報告を行う。また今後の予定についても報告する。

2. パルス電源の構成

図1に半導体スイッチを使用したパルス電源回路の構成を示す。基本的には、サイラトロンを使用したパルス

電源と同様な構成になっているが、逆導通型デバイスを使用することから、EOLC 回路及びコマンド充電方式を採用している。現在開発を進めている半導体スイッチの性能は、表1に示すようにKEKBリニアックのパルス電源で使用中のサイラトロンの性能を予定している。

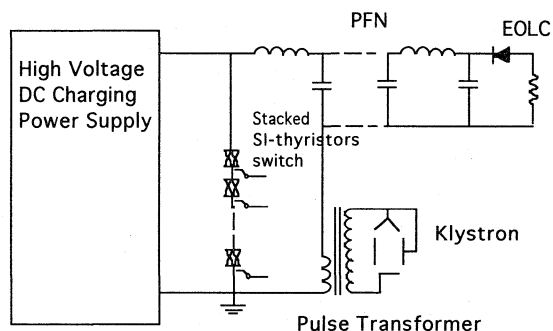


図1 パルス電源の構成

表1 半導体スイッチの性能

パルスピーク電圧	最大 45kV
パルスピーク電流	5kA
パルス幅	5.5 μ s
パルス繰り返し	50Hz
スイッチング時間	200ns

3.ターンオン特性の評価

SI サイリスタ（日本ガイシ製、平型圧接パッケージ、4kV 耐圧、RT103）を5素子直列接続して低インダクタンス回路で動作させて、ターンオン特性の評価を行った。

3-1. 評価回路

高速で大容量の半導体素子进行评估するためには、電流の立ち上がり速度 (di/dt)、ピーク電流が回路インダクタンスの影響を受けやすいため、低インダクタンスの評価回路を用いなければならない。今回製作した評価装置を図2に示す。インダクタンス成分を低減するために、クランプで5素子スタックされたSIサイリスタスイッチを円筒状の導体で囲むような同軸構造とし、セラミックコンデンサを円筒上部の円周上に12個配置し、できる限り密にした。

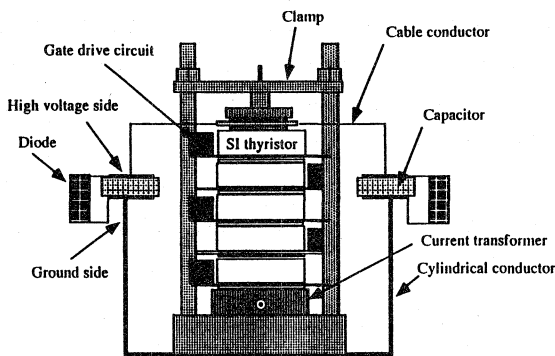


図2 ターンオン特性の評価装置

図3に評価回路を示す。高電圧充電器でセラミックコンデンサ(容量17 μ F)を最大15kVまで充電し、SIサイリスタスイッチを通して放電させて、その時のアノード電圧及び電流波形を測定した。電圧は電圧プローブ(Tektronix製P6015A)で測定し、電流はアース側に組み込まれたCT(Pearson製Model101)を用いて測定した。コンデンサに並列接続されているダイオードは、高速の揺れ戻し電流を止めるために使用した。

ゲートドライブ回路は、デバイスを高速ターンオン動作させるために、ゲート電流の立ち上がりの速い回路が要求される。そのためには、ゲート周りのインダクタンスを低減することと、そしてゲート順電圧を高くすることが重要である。ゲートドライブ回路基板を各デバイスの直ぐ近くに配置し、配線によるインダクタンスを低く押さえた。またゲート電圧160Vという高電圧を用いてターンオン速度の高速化を行った。各基板内で必要とする電源は全て、絶縁をとるために1ターンの1次巻線

を有するパルストランスから供給される。またトリガ信号も、1ターン貫通コイルを用いて各デバイスのパルストランスを経由して供給される。

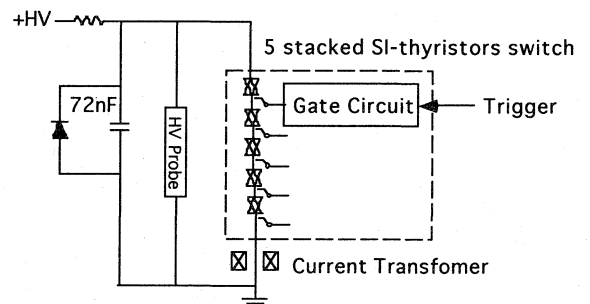


図3 ターンオン特性の評価回路

3-2. 結果

評価試験は単発スイッチングで行った。印加電圧（スイッチング電圧）15kVでのアノード電圧及び電流波形を図4に示す。コンデンサに並列接続されているダイオードの効果のため、電流波形は正極性で減衰振動する。この波形からターンオン時間（アノード電圧立ち下がりの90%-10%間の時間）128ns、ピーク電流10kAを得た。アノード電流の di/dt 波形を図5に示す。これから di/dt の最大値として110kA/ μ sを得た。これらの値は、大電力サイクロトロンに匹敵する通電能力を示す。この時、素子の破壊等の異常は見られず、極めて良好なスイッチング特性を示した。電流の立ち上がり速度から回路インダクタンスを計算すると、約150nHと非常に値が小さいことが分かった。

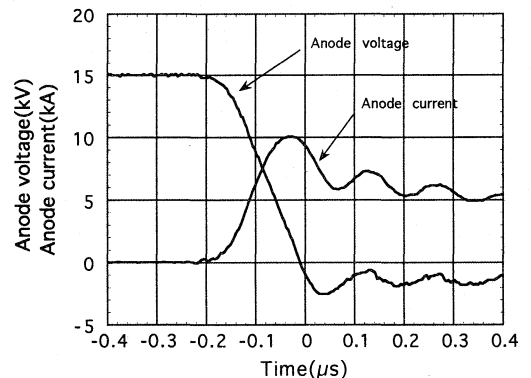


図4 アノード電圧及び電流波形

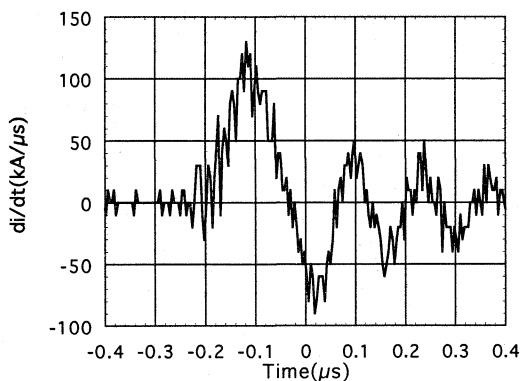


図5 アノード電流の di/dt 波形

次に、デバイスの動作状態を調べるために印加電圧を変化させて、ピーク電流とピーク di/dt を測定した。図6にその結果を示す。印加電圧に対して、ピーク電流及びピーク di/dt は線形な関係にある。従って、デバイスがピーク電流とピーク di/dt を制限しているわけではなく外部回路による制限であることがわかる。つまりSIサイリスタは正常動作範囲内である。

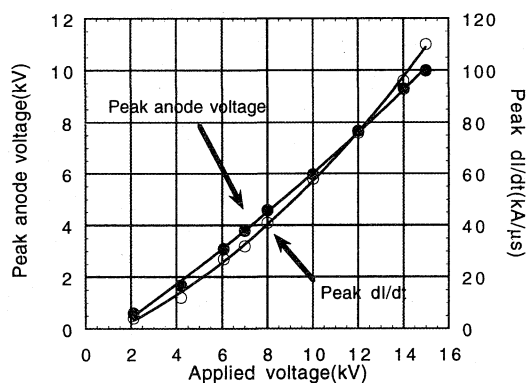


図6 ピーク電流、ピーク di/dt と印加電圧との関係

図7は、ターンオン時間の印加電圧依存性を示す。ターンオン時間は印加電圧の増加とともに短くなり、約7kV (1.4kV/1素子) 付近で飽和するような特性をもっていることが分かった。

4. 今後の予定

今回の評価試験で、SIサイリスタのターンオン特性は、大電力サイラトロンに匹敵する十分な通電能力があることを実験的に検証できた。従って、並列化をしないで直列接続のみで大電力化することが可能である。表2に示す仕様のようなSIサイリスタを15素子直列接続したコンパクトな高電圧スイッチユニットを開発する予定で

ある。更にそれを実際に運転しているクライストロン用パルス電源のサイラトロンと交換して試験(図1と表1を参照)することによって、この半導体スイッチのパルス通電特性及び長期安定性能について評価し、実用化を図っていく。

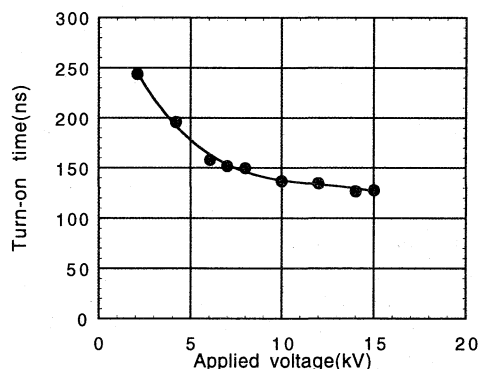


図7 ターンオン時間と印加電圧との関係

表2 半導体スイッチユニットの主な仕様

使用素子	SIサイリスタ 日本ガイシ製RT103N(4kV耐圧)
接続構成	15直列
絶縁方式	絶縁油
冷却方式	油冷却
サイズ	円柱型、高さ550mmX直径300mm

参考文献

- [1] JLC Design Study Group, "JLC Design Study," KEK Report 97-1, 1997.
- [2] N. Shimizu et al., "4kV Reverse Conducting Static Induction Thyristor," 10th SI Device Symposium, SSID-97-6, 1997.
- [3] S. Ibuka et al., "Evaluation of 5500-class SI-Thyristor as Pulse Power Switching Device Utilizing a Low Inductance Testing Circuit," 23rd International Power Modulator Symposium, 1998.
- [4] M. Akemoto et al., "Development of a SI-thyristor Switch for High-Power Klystron Modulator," Proc. of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, (1998)258.