

高電圧サイリスタを用いたサイラトロン代替半導体スイッチの開発

DEVELOPMENT OF SOLID-STATE SWITCHING MODULE USING HIGH VOLTAGE THYRISTOR

近藤 力^{#, A, B)}, 大竹 雄次^{B)}, 稲垣 隆宏^{B)}, 徳地 明^{C)}, 森 均^{C)}
Chikara Kondo^{#, A, B)}, Yuji Otake^{B)}, Takahiro Inagaki^{B)}, Akira Tokuchi^{C)}, Hitoshi Mori^{C)}

^{A)} JASRI

^{B)} RIEKN SPring-8 Center

^{C)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

Abstract

In the X-ray free electron laser facility, SACLA (Spring-8 Angstrom Compact free electron LAser), more than 70 klystron-modulators are operated as the high power RF sources for the electron linac. In the modulators, thyratrons are used as a high power switching module, and it has problems such as self-triggering, long-term instability, and a lifetime limit of several ten thousands hours. In order to solve these problems, we have developed a solid-state switch using ultra-fast high-voltage thyristors, with a rated voltage of 50 kV, a peak current of 5 kA, a pulse width of 5 μ s, and a repetition of 60pps. To replace the thyratron, the thermal loss in the switch is required to be less than 1 kW, and the heat dispersion can be cooled by the natural convection of insulation oil. We performed high-power pulse operation to be used as a test modulator with 45 kV, 2.75 kA, 8 μ s, 60 pps, and continuously operated it for 72 hours. In the operation, we confirmed that the surface temperature of the thyristor element was less than 50 $^{\circ}$ C, and the thermal loss in the switch were below 1 kW.

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設(SACLA)では、電子ビームを加速するため大電力 RF の生成のため、70 台以上のクライストロン・モジュレータ電源を用いている。この電源では、PFN(Pulse Forming Network)のコンデンサに充電された電荷を、サイラトロンを用いた高電圧大電力パルスの生成を行っている[1]。サイラトロンは、高電圧、大電流を高速でスイッチング可能であるため、古くから使用されている。一方で、自己導通による誤動作や、数万時間の有寿命であることなどの欠点もある。また、内部カソードの経年劣化により、導通抵抗の変動や、サイラトンノイズによる周辺回路の損傷といったトラブルも発生する。このため、サイラトロンを長期に渡り、安定的に使用するためには、周辺回路を含めた定期的な保守交換や点検・調整が必要である。また、これまでフィルタ回路の導入[2]やトリガパルス幅の最適化[3]を行い、我々はトラブル頻度の低減に成功している。このように、モジュレータ電源の保守管理では、サイラトロンに関わるトラブル対策に、多大なコストや労力が費やされている。

このようなサイラトロン欠点の解消や、労力の削減のため、サイラトロン代替として、安定動作や長寿命が期待できる半導体を用いたスイッチングデバイスの開発が世界中で行われている[4]。我々は、SACLA のモジュレータ電源に組み込めるようなコンパクトで、かつ絶縁油中にて使用可能な半導体スイッチを目指して開発を行ってきており、これまで SI サイリスタ[5]を用いた半導体スイッチの開発に成功している[6]。しかし、SI サイリスタは発熱が大きく、オイルクーラーを用いた強制対流が必要であり、導入や保守にコストが掛かることや、SI サイリスタ

が生産中止となったため、実用には至らなかった。

今回、新たに我々は Applied Pulsed Power 社の高電圧サイリスタ S38 [7]を用い、よりコンパクトかつ低発熱の半導体スイッチの開発に成功した。本報告では、開発した半導体スイッチの設計と、動作試験の結果を示す。

2. 要求仕様

SACLA のモジュレータ電源の回路図を Fig. 1 に示す。このモジュレータ電源は、絶縁油を満たした密閉筐体の中にクライストロンのパルストランスと変調器部を配置した一体型電源であり、従来のモジュレータ電源に比べてコンパクトかつノイズ漏洩が少ないことが大きな特徴となっている。

このモジュレータ電源に、サイラトロン代替として設置する半導体スイッチには、サイラトロンと同程度もしくはそれ以上の性能が要求される。電気特性としては、耐電圧 50 kV、ピーク許容電流 5 kA、ターンオン時間 500 ns 以下などが要求される。また、サイズはサイラトンや付

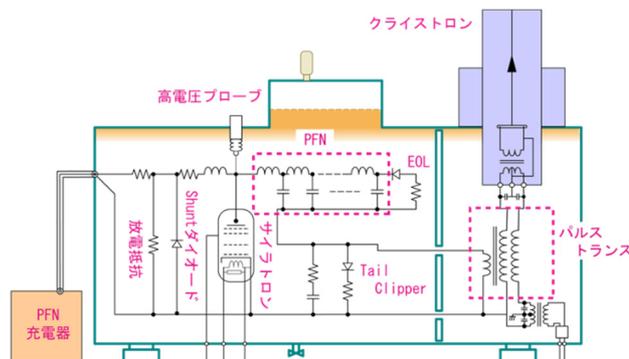


Figure 1: Diagram of the klystron-modulator of SACLA.

ckondo@spring8.or.jp

Table 1: Requirements for Solid-State Switch

Charging Voltage	50 kV
Pulse Current	5 kA, 4 μ s 3.3 kA, 8 μ s
Switching Time	< 500 ns
Repetition Rate	60 pps
Timing Jitter	<1 ns (STD)
Thermal Loss	<1 kW
Chassis Size	0.50 m(W) \times 0.25 m(D) \times 0.70 m(H)

属回路が収まっている空間に収まるよう、サイズは幅 0.50 m \times 奥行き 0.25 m \times 高さ 0.70 m 以内に収める必要がある。また、絶縁油中にて使用するため、耐油性を備えること、そして油の自然対流により冷却できるよう、発熱量の低減や、効率的な放熱が必要となる。具体的には、サイクロン使用時と同程度となるよう、発熱量が 1 kW 以下、絶縁油の温度は上面にて 50 $^{\circ}$ C 以下を目標とした。更に、半導体素子の温度は、長寿命で使用できる範囲に収まるものとした。半導体スイッチへの要求性能を Table 1 に示す。

3. 半導体スイッチ

3.1 サイリスタ素子

素子単体では、サイクロン代替となるような高電圧、大電流に耐えられるような半導体スイッチは未だ存在しておらず、よって我々は複数の素子を直並列で組み合わせる半導体スイッチとする。このとき、素子には高い耐電圧や大きい許容パルス電流のものを用いることで、素子の使用数を少なくでき、設計の難度や製作のコストを抑えることができる。

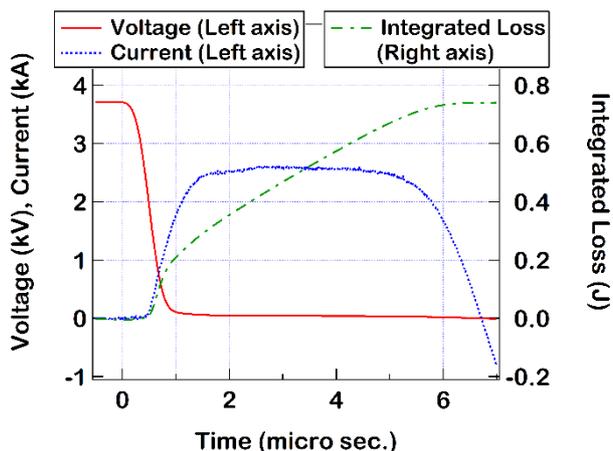


Figure 2: Waveforms of the pulse test of one thyristor element: voltage (solid line, red), current (dot line, blue), and integrated loss power (dashed line, green).

Table 2: Specifications of Thyristor Module, S38[7]

Forward Off-stage Voltage (10 msec)	4.7 kV
Peak Forward Current (10 μ s, 60 pps)	7 kA
Current Rise Rate	30 kA/us
Gate Current for Turn-ON	>50 mA
Turn-ON Jitter	2 ns (max.)
Recommended Base Temperature	<50 $^{\circ}$ C

我々は、スイッチング素子として、Applied Pulsed Power 社の高電圧サイリスタ S38 [7]を選定した。このサイリスタは、4.7 kV という高い耐電圧、7 kA という許容ピーク電流量など、要求される特性を備えている。このサイリスタの主要な定格を、Table 2 に示す。我々は半導体ス

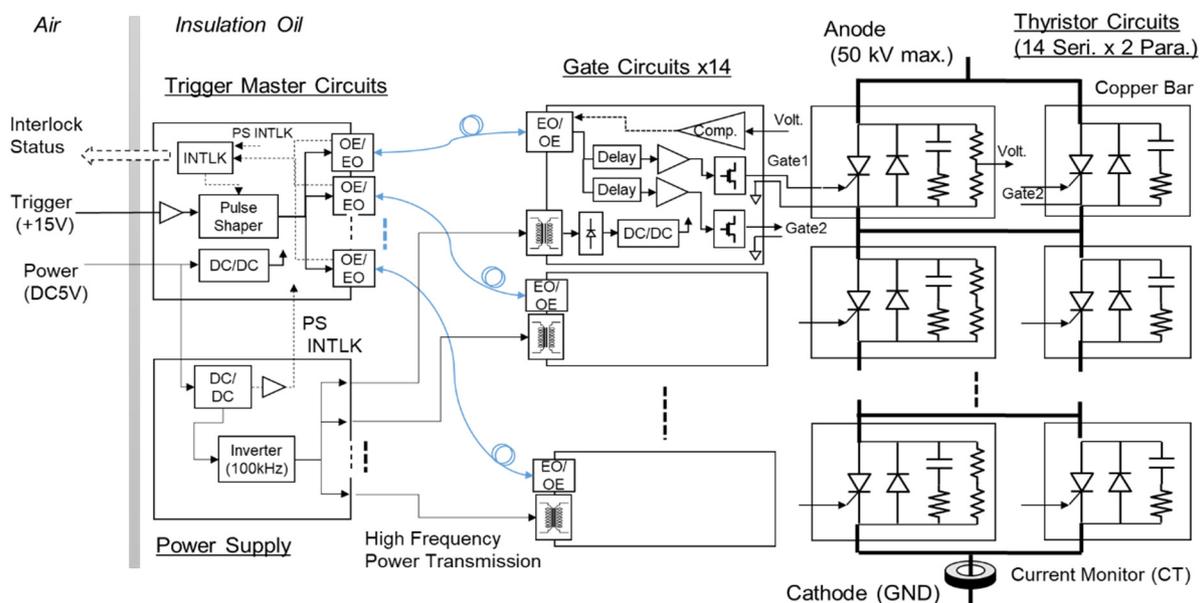


Figure 3: Circuit diagram of the solid-state switch.

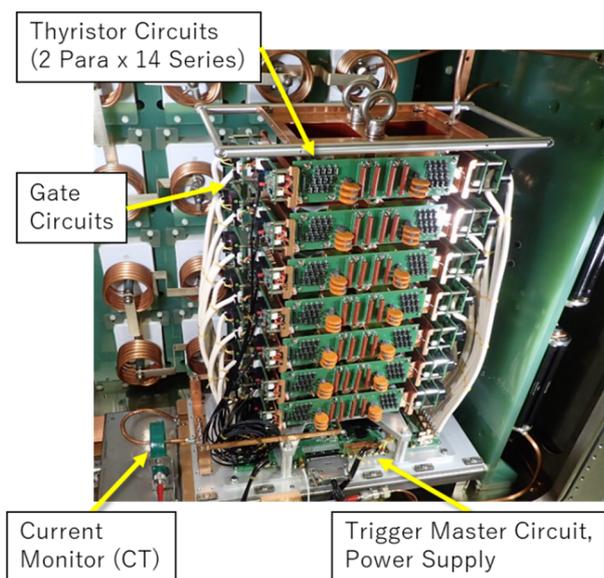


Figure 4: Photograph of the solid state switch installed in the L-band modulator.

スイッチの構成を決定する上で、サイリスタ素子のパルス動作や発熱量を確認する必要がある。そこで、簡易的な PFN 回路とサイリスタ素子単体を用いたパルス動作試験を行った。Figure 2 には、充電電圧 3.8 kV、ピーク電流 2.5 kA、パルス幅 5 μ s の条件での波形を示す。なお、この波形より、2.5 kA 電流の通電時の素子の ON 抵抗は約 20 m Ω と見積もられる。

3.2 回路構成

半導体スイッチの構成は、サイリスタ素子を 14 直列 \times 2 並列とした。耐電圧を決定する素子の直列数は、スパイク電圧や素子の故障を見越して 50 kV のスイッチング電圧に対して 20%以上の電圧余裕を持たせた。また並列数は、素子の損失による総発熱量を 1 kW 以下に抑えられるように電流分岐量から決定した。

回路構成図を、Fig. 3 に示す。PFN からの高電圧印加や大電流パルスは、14 直列 2 並列のサイリスタ回路に掛かる。サイリスタ回路は、サイリスタ素子、逆流ダイオード、スナバ回路、および分圧回路で構成される。また、直列 1 段毎に、1 つの Gate 回路が備わり、サイリスタのトリガ駆動や過電圧や回路異常の検知を行う。

その他にも、高電圧部の Gate 回路へのトリガ信号の送信やインターロック信号の受信を行うマスター回路、および Gate 回路に高周波電力伝送を行う電力回路が備わる。Gate 回路とマスター回路間の信号伝送は、光ファイバケーブルにて行われる。また、Gate 回路への電力伝送は、絶縁トランス方式で行っている。

半導体スイッチの外観を Fig. 4 に示す。筐体サイズは、幅 0.50 m \times 奥行き 0.25 m \times 高さ 0.65 m と、要求されるサイズに収まるものとした。上部が高圧部(アノード)で、下部は接地電位となっている。各電位のサイリスタ回路は、左右 2 列に分かれ 20 mm の絶縁スペーサを介して積層され、電極が銅バーで接続される。各段では 2 並列構成となるサイリスタ素子 2 個をヒートシンクの裏表にそれぞれ固定し、アノードをヒートシンク電位に接続してい

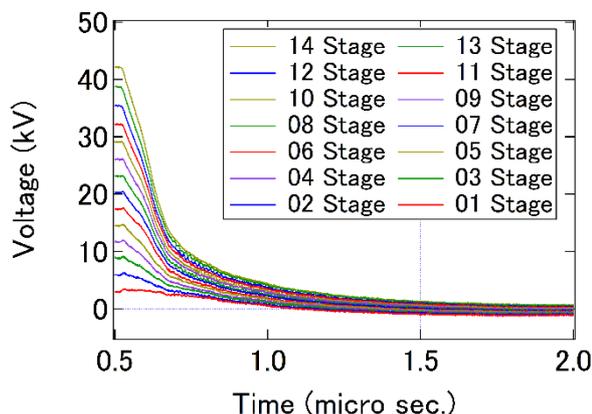


Figure 5: Voltage waveforms of each stage in switching operation.

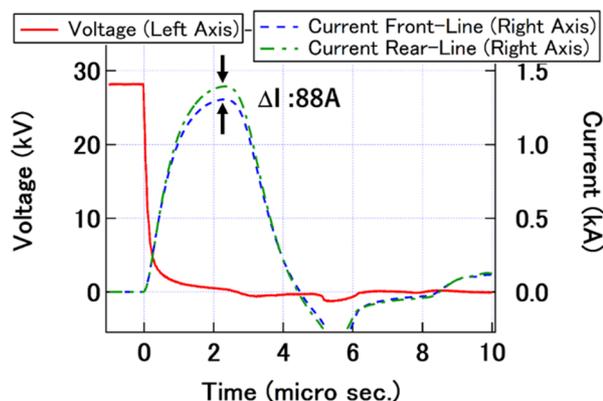


Figure 6: Voltage waveform between the anode and cathode of the switch, and the current waveforms of each parallel line. The current difference at peak is about 7%.

る。ヒートシンクは、アルミ製の大型ヒートシンクを用いており、開口の向きを上下にすることで、熱せられた絶縁油が自然対流でスムーズに上に抜けるようにしている。また、スイッチ最下段のカソード電極と接地電位を接続する銅バーには電流計測用 CT を挿入している。

4. パルス出力試験

4.1 電圧・電流バランス確認

複数の素子を直並列で構成するとき、一部の素子に電圧や電流が集中すると、素子の故障に繋がるため、これらを均等にする必要がある。ここでは、並列間の電流の不均衡は 10%以内とし、また直列間の電圧は定格耐電圧を超えないものとした。これには、次のような対策を施した。

まず、Gate タイミングは、電流・電圧の均一化のために重要である。タイミングのバラつきは、Gate 回路ラインの素子や伝送ラインの個体差によって生じる。そこで、Gate 回路に遅延回路を設け、タイミング調整を行った。タイミング時間差と電流バランスの相間を測定したところ、約 0.3%/ns の線形的な関係があることが分かった。今回は、Gate タイミングのバラつきが 2 ns 以下になるように設定した。

電圧バランス、特にターンオンの過渡状態でのバラつ

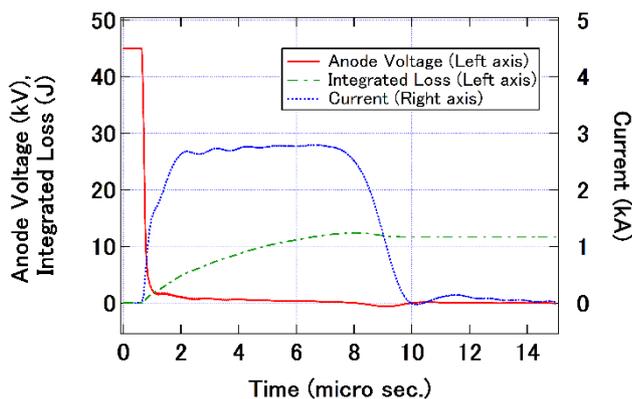


Figure 7: Waveforms of voltage, current, and integrated loss power in the rated operation of the modulator.

きは、サイリスタ素子のターンオン特性のバラつきに影響される。今回は、サイリスタと並列にスナバ回路を入れることで直列間の電圧変動率を制限し、素子のバラつきの影響を小さくした。電流バランスをとるため、並列接続の経路が等距離かつ対称となるような配線としている。

これらの調整を行い、模擬パルス回路を用いて電圧バランスと電流バランスを測定した結果を、それぞれ Fig. 5 と Fig. 6 に示す。Figure 5 より各段の電圧はほぼ連動して変動しており、局所的な電圧上昇が無く、過渡電圧も 4 kV 以下におさまっていることを確認した。また、Fig. 6 より 2 並列間での電流バランスもピーク値で約 7% の差違に収まっていることを確認した。

4.2 高電圧パルス動作試験

我々は、半導体スイッチを L-band クラストロン用モジュレータ電源に設置し、高電圧パルス動作試験を行った。PFN の充電電圧を 45 kV とし、出力電流 3.7 kA、パルス幅 8 μs、繰り返し 60 pps のパルス動作試験を行った。Figure 7 に、スイッチのアノード-カソード間電圧と、通過電流の測定波形を示す。

パルス特性として、ターンオン時間は 160 ns 以下を確認した。電流上昇率は 4.9 kA/μs 以上が見込まれ、モジュレータ電源のパルス出力が可能であることを確認した。また、電流波形から求めた時間ジッタは、0.23 ns (STD) であった。電流、電圧波形から、高電圧スイッチの発熱を算出したところ、1 ショットあたり約 12.4 J と見積もられた。これは繰り返し 60 pps では 744 W 程度の発熱にあたる。

次に長時間連続運転を行い、動作信頼性と素子の温度上昇を確認した。45 kV、60 pps にて 72 時間の温度測定結果を、Fig. 8 に示す。この連続運転において、トラブルや自己着火などは発生せず、長時間に渡り継続した運転が行えることを確認した。また、サイリスタの素子表面温度は約 46°C と、使用推奨温度である 50°C 以下に収まっていることを確認した。また、絶縁油温度も上面付近で 40°C 以下と、規定の 50°C 以下であることを確認できた。これより、この半導体スイッチは絶縁油の自然対流により十分に冷却できることを確認した。

我々は、半導体スイッチの発熱量を、熱収支から概算した。冷却水の入り出の温度差から冷却水の吸熱量を

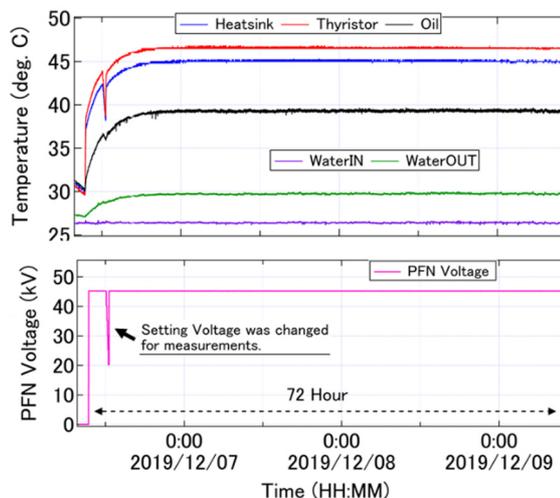


Figure 8: Trend of temperatures (upper) and PFN voltage (under) in long duration operation.

Table 3: Heat Balance of Water and Heat Components

Heat Absorption of cooling water	2.62 kW	Water Flow: 11 L/min. ΔT:3.4 K
Heat Dispersion of Klystron Heater	0.32 kW	Calculated from Heater Current and Voltage
Pulse Transformer	0.88 kW	Calculated by Diff. of Prim. and Sec. Power
Resistors	0.44 kW	Calculated by Currents
Heat Dispersion of Solid-State Switch	0.98 kW	Difference value of the absorption and dispersions

求め、また電源内の抵抗体やヒーターなどの発熱量を測定値から概算し、両者の差分から半導体スイッチの発熱量を求めた。測定結果は、Table 3 にまとめている。この結果より、半導体スイッチの発熱量は、約 1 kW と概算される。これは、先の波形からの発熱見積より 30% 程度大きい値であるが、モジュレータ電源内のダイオードなどの発熱も含まれているため、発熱量の上限値としてみる事ができる。これより、半導体スイッチの発熱量は、サイラトロン発熱量 1 kW よりも小さいことを確認した。

他の RF 機器の耐久性試験のため、我々はこのモジュレータ電源を用いた長期間運転を行い、約 500 時間の運転実績を得ている。この間、Gate 回路のインターロックが 2 回発報した。1 回目は、スナバ回路のコンデンサ素子のリード線の断線に起因するものであった。これは、半田不良だけでなく、パルス動作電流による機械振動に起因している可能性もあり、コンデンサ素子の固定の強化を施した。その後、2 回目のインターロック動作が見られたが、リセット後は再び運転を継続できたため、回路の誤作動と思われる。

5. まとめと今後

我々は、SACLA の絶縁油密閉型モジュレータ電源の

サイクロロン代替に用いることのできる半導体スイッチを開発した。半導体素子に Applied Pulsed Power 社製のサイリスタ S38 を用い、これを 14 直列 2 並列で構成することで、耐電圧 50 kV, ピーク電流 3-5 kA, パルス幅 5-8 μ s, 繰り返し 60 pps の半導体スイッチとした。サイズは幅 0.5 m \times 奥行き 0.25 m \times 高さ 0.65 m と、既存のサイクロロンと付属回路の空間に収められる大きさとした。絶縁油の自然対流により効率的に冷却できるよう、アルミ製大型ヒートシンクを縦に積層することで、対流が上に抜けやすい構造としている。L-band クライストロン用モジュレータ電源に設置し、45 kV, 2.75 kA, 8 μ s, 60 pps の高電圧試験を行い、定格のパルス出力を得られることを確認した。また、スイッチの発熱量はサイクロロンと同等の 1 kW 以下で、サイリスタ素子の表面や絶縁油温度も推奨温度以下となることを確認した、更に、定格条件で 72 時間の連続運転を行い、問題が無いことを確認した。今後、一部で残っているインターロックの誤作動などの問題を対策し、数千時間の長時間動作試験を行う予定である。

謝辞

実験準備や測定を手伝って頂いた、JASRI の安積隆夫研究員、スプリングエイトサービスの江口氏、中澤氏に感謝します。

参考文献

- [1] T. Inagaki *et al.*, PRST-AB 17, 080702, (2014).
- [2] S. Nakazawa *et al.*, PASJ2015, WEP066.
- [3] S. Nakazawa *et al.*, PASJ2017, WEP062.
- [4] cf. Diversified Technologies, Inc.; <http://www.divtecs.com/>
- [5] J. Nishizawa and K. Nakajima, *Revue de Physique Appliquée*. Vol.13, No.12, 725-728 (1978).
- [6] T. Inagaki *et al.*, PASJ2017, TUOL08.
- [7] <https://siliconpower.com/solid-state-switches/>