

クライストロンモジュレータ用半導体スイッチの開発と性能評価

DEVELOPMENT OF THE SOLID-STATE SWITCH FOR A KLYSTRON MODULATOR AND ITS PERFORMANCE

古川和弥^{#,A)}、徳地明^{A)}、川瀬啓悟^{A)}、磯山悟朗^{A)}、加藤龍好^{B)}

Kazuya Furukawa^{#,A)}, Akira Tokuchi^{A)}, Keigo Kawase^{A)}, Goro Isoyama^{A)}, Ryukou Kato^{B)}

^{A)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We are developing a solid-state switch using static induction thyristors for the klystron modulator of the L-band electron linac at ISIR, Osaka University to highly stabilize the linac operation. The first model was fabricated, which meets specifications of the maximum holding voltage of 25 kV, the maximum current of 6 kA, and the repetition rate of 10 pps, and it was reported two years ago at this meeting. The solid state switch has been used in regular operation of the linac for more than 2 years though minor troubles occurred several times. Based on the experience gained with the first model, we have developed the second model of the solid state switch that can be operated at 60 pps either in the 25 kV and 6 kA mode or in a 50 kV and 3 kA mode by changing internal wirings. Temperature rise of the thyristors in the second model is reduced to one third of that in the first model operated in the same conditions, and fluctuations of the klystron voltage are measured to be 7.8 ppm (standard deviation) using a new measurement system with a noise level of 5.3 ppm. The new switch has been used in the regular operation of the linac for debugging. We found some troubles in its control circuits and are fixing them for higher reliability in operation.

1. 概要

我々は大阪大学産業科学研究所量子ビーム科学研究施設のLバンド電子ライナックを用いて遠赤外・テラヘルツ (THz) 領域の自由電子レーザー (FEL) の開発研究を行っている。このFELは通常5~10 Hzの繰り返しでパルス動作をするが、FELの基礎研究や大強度THz波の利用研究にはFEL強度の安定性が求められる。FEL強度は電子ビームエネルギーの変動に大きく依存し、電子エネルギーはライナックに供給するRFのパワーと位相により決まる。大強度RFパルスはクライストロンで発生するため、クライストロンに高電圧・大電流パルスを供給するクライストロンモジュレータ (モジュレータ) の出力電圧を高安定化する研究を行っている。

モジュレータはパルス生成回路 (PFN) に蓄えた高電圧の大電荷を高速スイッチで導通し、昇圧トランスを通じてクライストロンに高電圧・大電流パルスを供給して大パワーRFパルスを発生する。モジュレータ電源の高安定化にはPFNに充電する電圧と高速スイッチ動作の安定性と再現性が必要である。PFNの充電電圧を安定化するため、PFN電圧が目標値に近づくと、高電圧電源であるインバータ電源がPFNに供給するパルスの電荷量を小さくすることで 10^{-5} 台の高い電圧精度を得ている。他方高速スイッチ素子に関しては、従来使用していたサイラトロンは放電現象を利用するため、微少であるが本質的に出力電圧変動が避けられない。我々はこれらの問題

を解決するため、より高い安定性が期待できる半導体スイッチを開発し、一昨年の年会でその詳細を報告した。阪大産研のLバンドライナックでの使用に特化したこの1号機に続き、一般的なSバンドライナックのクライストロンモジュレータでも使用可能な2号機を開発した。

本報告では2号機の開発と安定性の評価結果を報告する。

2. 半導体スイッチ2号機の開発

2.1 静電誘導型サイリスタ

使用する素子は1号機と同様に新電元製の静電誘導型サイリスタ (SIサイリスタ) である。Table 1に使用したSIサイリスタの仕様を示す。メーカーの仕様は最大耐電圧3.2 kV、平均最大電流50 Aであるが、Lバンドライナックの出力は10マイクロ秒以下の短いパルスであるためより大きな電流を流すことが可能であり、試験の結果1 kAを流しても問題がないことを確認した。

Table 1: Manufacturer's Specifications of the SI Thyristor

Blocking voltage (kV)	3.2
Maximum current (rms) (A)	50

2.2 2号機の概要

Figure 1に半導体スイッチ2号機の外形図と写真を示す。サイリスタは冷却のためヒートシンクの長辺に固定し、その真上にゲート用パルス発生回路を

[#] furukawa@sanken.osaka-u.ac.jp

取り付けた。ゲート基板へは 5 V、100 kHz で動作する絶縁型 DC-DC コンバータで電力を供給し、トリガー信号は光ファイバーで各段に送る。

L バンドライナックのモジュレータで必要な性能は最大保持電圧 25 kV、導通時の最大電流 6 kA である。25 kV の耐圧を得るために SI サイリスタを 10 直列で使い、6 kA の電流に耐えられるように 6 並列とした。従って 1 号機と同様に SI サイリスタを 10 直列 6 並列、合計 60 使用する。他方、2 号機は一般的なクライストロンモジュレータで使用する 50 kV、3 kA での運転も可能である。1 号機では、直方体型ヒートシンクの長辺外側にサイリスタを 6 個ずつ取り付け 2 直列 6 並列の回路を構成し、絶縁のための

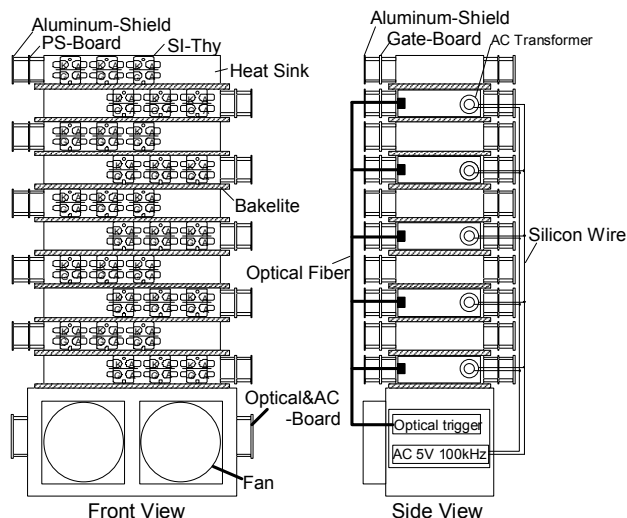


Figure 1: Solid-state switch 2nd model using SI thyristors.

ベーク板を挟んで 5 台のヒートシンクを積み重ねた。2 号機では厚さが半分のヒートシンクを 10 段積み重ね、それぞれの対向する長辺外側にサイリスタ 3 個を取り付けた。25 kV、6 kA 運転時は 1 直列 6 並列となるように配線し、50 kV、3kA で運転する場合はヒートシンク 1 段のサイリスタを 2 直列 3 並列に配線する。各段 2 枚、計 20 枚のゲート基板の電位は、それぞれが制御するサイリスタのカソードと同電位に保つ。電気的なノイズから制御基板を保護するため、制御基板の上に、基板のグランド電位と同電位のアルミ製のシールド板を取り付ける。

2.3 熱設計

L バンドライナックには出力パルス幅が 4 μ s の短パルスモードと 8 μ s の長パルスモードがある。これらのモードで 10Hz 運転をした時のサイリスタの発熱量はそれぞれ 420W、720W と計算されるが、サイリスタの温度上昇の測定値はそれぞれ 6.8 $^{\circ}$ C、11.7 $^{\circ}$ C であり、ほぼ熱負荷に比例する。これらの値を使い短パルスモードの最大繰返し 60 Hz、長パルスモードの 30 Hz で温度上昇を計算するとそれぞれ 40.8 $^{\circ}$ C、35.1 $^{\circ}$ C である。使用するサイリスタは温度上昇に伴い漏れ電流が増加し、更に温度が上がるため、2 号機では最大定格で運転できるように冷却能力を強化する。

1 号機ではヒートシンクを冷やすファンをヒートシンク架台内部に上向きに取り付けているため、ファンが空冷チャンネルの真下にあるか否かで半導体スイッチ直上の風速が 0.5 m/s 以下から 1.9 m/s 程度と大きく異なる。2 号機ではファンを架台の側面に取り付けたため、全てのチャンネルで風量が等しくなると共に、外部から効率よく空気を吸引できる。また 1 号機では風量 2.9 m³/min の送風量を持つ AC モーターを使ったファン 2 台を用いたが、2 号機では 7.35 m³/min の DC モーターを持つファン 2 台に変更した。空冷能力を高めるため、従来の約 60% と熱抵抗が低いヒートシンクを採用した。これらを用いて製作した半導体スイッチ 2 号機直上の風速を測定すると、ほぼ一様に 5 m/s 程度と 1 号機の 2.5 倍以上に増加した。2 号機を長パルスモード 10 Hz で運転する時の温度上昇は 4 $^{\circ}$ C であり、従来の 11.7 $^{\circ}$ C

Table 2: Performance of Cooling Fans and Heat Sinks

	1st model	2nd model
Air flow of cooling fan (m ³ /min)	2.9 \times 2	7.35 \times 2
Heat resistance of heat-sink (at 100mm)(K/W)	0.75	0.45
Temperature rise for short pulse at 10Hz($^{\circ}$ C)	6.8	-
Temperature rise for long pulse at 10Hz($^{\circ}$ C)	11.7	4

に比べ大幅に低下した。発熱量から計算した短パルスモード 60 Hz での温度上昇は 14 °C と十分に小さい。Table 2 に 1 号機との比較を示す。

3. 安定度の測定

半導体スイッチの性能を評価するためクライストロン印加電圧の変動を測定した。半導体スイッチ 1 号機を用いて以前測定したクライストロン電圧パルスのピーク値変動は 0.015% に対しノイズレベルが 0.012% であり、ピーク電圧の変動はノイズレベルの変動とほぼ同程度で正確な値を得ることは困難である。ノイズレベルが高い訳は、パルスピーク部分を拡大するために使用した差動アンプが原因である。今回はより正確な測定を行うため、テレダイン・レクロイ社製作動アンプ DA1855A を用いて、半導体スイッチ 2 号機に対して安定度を測定した。Figure 2 にクライストロンとモジュレータ回路の模式図を示す。PFN の充電電圧は 20 kV で運転繰り返しは毎秒 10 回である。Figure 3 に半導体スイッチの電圧・電流波形と、クライストロンの電圧・電流波形、クライストロン電圧の拡大波形を示す。クライストロン電圧の拡大波形は 523 パルスを重ね描きしたもので線の太さが電圧の変動を表し、その標準偏差は 0.00078 % である。Figure 4 は測定に用いた差動アンプの入力端子を短絡して測定した出力波形を 10000 回重ね描きしたものを示す。この線幅は、クライストロン電圧に対し 0.00053 % の変動に相当する。従来の測定に比べ、1 桁以上高い精度で測定できたが、依然、測定器のノイズレベルが信号に対して大きな割合を占める。

4. 運転経験

現在は半導体スイッチ 1 号機と 2 号機を適当に交換して 2 年間以上 L バンドライナックを運転しているが、その中でいくつかの不具合が起きた。その一つはゲート基板で使用する IC の損傷である。

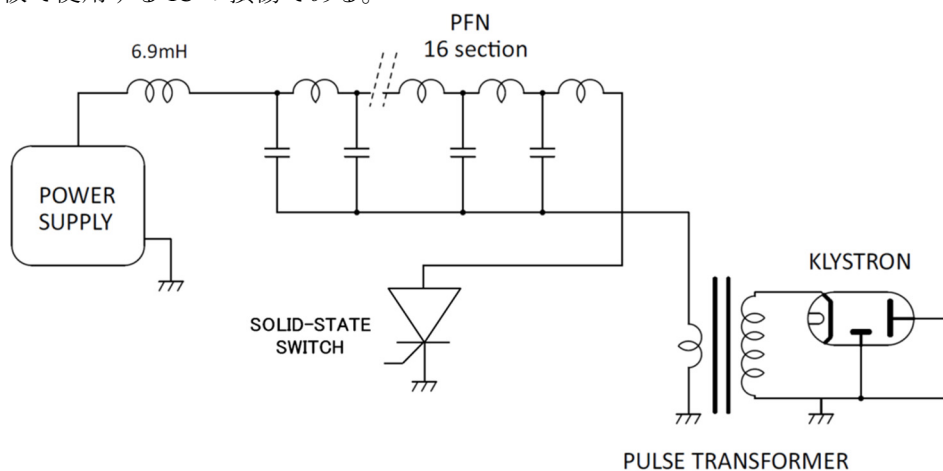


Figure 2: Operating circuit for the solid-state switch.

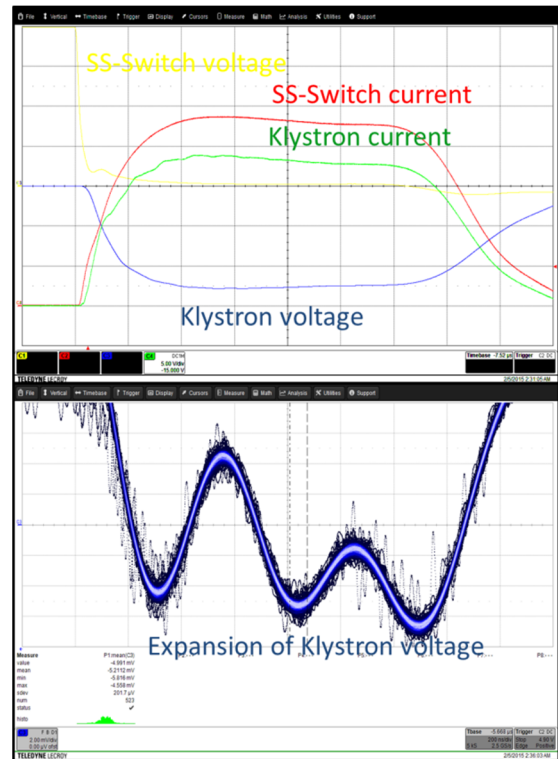


Figure 3: Voltage and current waveforms of klystron and solid-state switch and expansion of the klystron voltage.

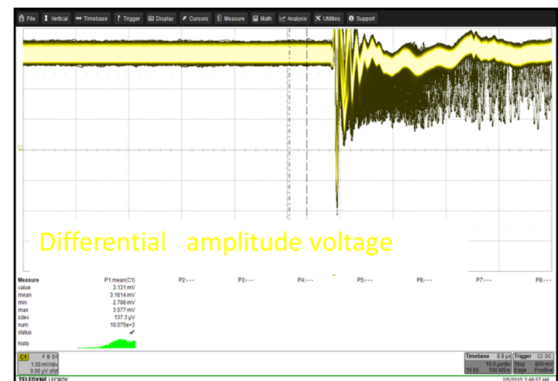


Figure 4: Noise waveform of the differential amplifier.

ゲート基板は SI サイリスタのゲート回路と、スイッチの安全を監視するための異常検出回路と表示用 LED 等で構成される。ゲート基板では、絶縁トランスから供給される 5 V、100 kHz の信号を整流した後、2 種類の DC-DC コンバータを用いて+24V と+5V 電源電圧を発生する。1号機ではこの 24 V 用 DC-DC コンバータが何度か損傷した。この DC-DC コンバータが単体で壊れることもあれば、トリガー用 O/E 変換 IC が壊れることで出力電流が増え損傷につながることもある。故障の原因は明らかではないため、対策として予備の基板を 2 枚用意して、故障した時に交換して運転に支障が出ないように運用している。2号機ではノイズ対策としてシールド用アルミ板をゲート基板直上に設置していることもあり、IC の損傷はほとんど起きない。しかし 2号機特有の不具合として、PFN の充電電圧を高めたときに異常がないにもかかわらず異常検出回路が働き運転が止まることがある。詳しい原因は調査中であるが、充電電圧を上げることで、ノイズが大きくなり、誤動作が起きると考える。

5. 結論

SI サイリスタを用いた半導体スイッチ 2号機を製作し、阪大産研の L バンドライナックの運転に使用している。2号機では冷却能力を向上したため、温度上昇が 1号機に比べて約 3 分の 1 まで低減した。さらに精度の高い測定器を用いて安定度を測定したところ、クライストロン電圧の変動は 0.00078 % と小さい。測定器のノイズによる変動 0.00053 % を考慮すると真の変動は更に小さい。

IC の損傷やノイズによる誤動作等はあるが、これらの問題を解決して、より信頼性の高い半導体スイッチに改良したい。