

サイラトロントリガ回路へのフィルタの導入

DEVELOPMENT OF FILTER FOR THYRATRON TRIGGER CIRCUIT

中澤伸侯^{A)}, 稲垣隆宏^{B)}, 近藤力^{B)}, 櫻井辰幸^{B)}, 大竹雄次^{B)}
益田邦和^{A)}, 木村健^{A)}

Shingo Nakazawa^{A)}, Takahiro Inagaki^{B)}, Chikara Kondo^{B)}, Tatsuyuki Sakurai^{B)}, Yuji Otake^{B)},
Kunikazu Masuda^{A)}, Takeshi Kimura^{A)}

^{A)} SPring-8 Service Co., Ltd.

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

In the XFEL facility SACLA, more than 70 thyratrons are used as a high voltage switch device for an oil-filled line-type modulator. Four years from the start of the SACLA's operation has elapsed, so that failure is recently increasing around the G1 and G2 trigger-circuit of an aged thyatron. The cause of the failure is a high-frequency surge generated at the G1 and G2. The huge surge with a voltage of several kV hits and breaks parts, such as a surge absorption diode in the circuit. To mitigate harmful effects from the surge to the parts, we focused on the frequency difference of 40MHz between the G1 and G2 trigger-signal and the surge. They can be separated in the frequency domain, because of the frequency difference. A filter circuit is designed and added to the G1 and G2 circuit and successfully separates the trigger signal and the surge. The role of the filter circuit is to absorb the high-frequency surge from the thyatron and to conversely transmit the trigger signal from the circuit. In a test, the filter circuit effectively absorbs the surge and reduces its voltage from 4kV to 1.4kV. We finally confirm the TVS diode does not suffer from any harmful effects by the surge.

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA^[1]では、70台以上のサイラトロンがパルス・クライストロン用モジュレータ電源のスイッチング素子として使用されている。2010年10月のコンディショニング運転の開始から4年が経過し、劣化したサイラトロンが引き起こすサージによる、TVSダイオード等のトリガ回路部品の故障が頻発している。^[2,3]

我々はサージ成分とトリガ信号が周波数領域で分離できる事に着目し、トリガ信号を伝達し、かつ高

周波サージを効果的に抑制できるフィルタ回路を考案した。本報告では、その設計、製作状況および試験結果の詳細について報告する。

2. トリガ回路の概要

2.1 モジュレータ電源とトリガ回路の概要

Figure 1 には SACLA で使用しているクライストロンモジュレータ電源およびサイラトロントリガ回

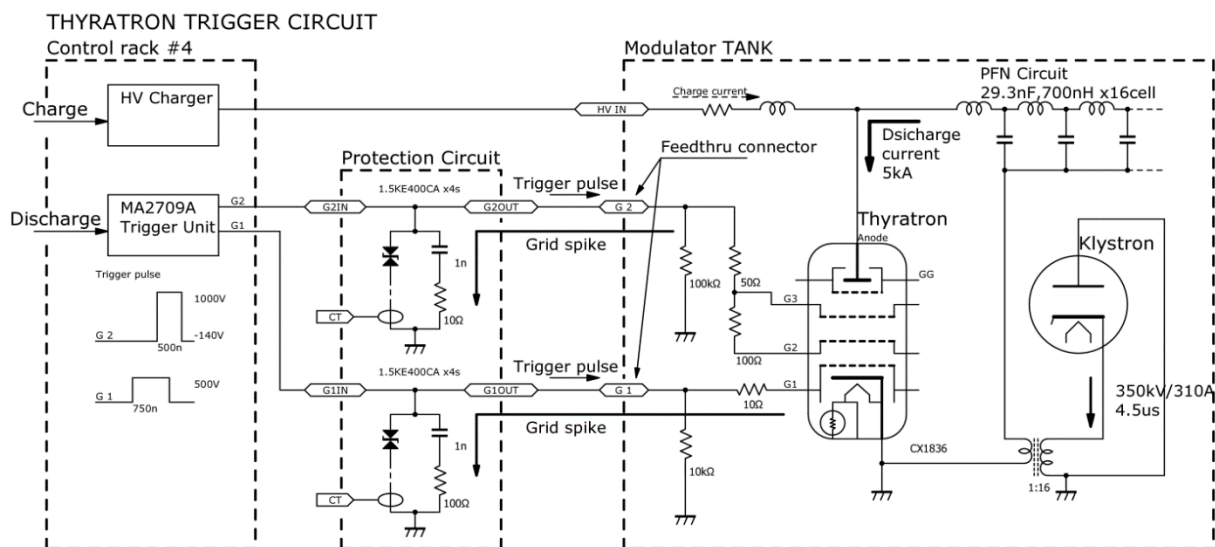


Figure 1: Block diagram of the klystron modulator for SACLA and its thyatron trigger circuit.

路の概略を示す。このモジュレータ電源は、PFN回路のコンデンサに最大 50kV で充電された電荷をサイラトロンでスイッチングし、生じた大電力パルスを実用トランスによって昇圧してクライストロンに供給している。この時、サイラトロンを通過するパルス電流は半値幅で約 4.5 μ s、電流は 5kA に達する。SACLA のモジュレータ電源では、主に E2V 社製 CX1836 を使用している。このサイラトロンは 3 段のコントロールグリッドを持ち、グリッドにトリガとして高電圧パルスを印加することにより導通状態となる。^[4, 5, 6]

2.2 グリッドトリガパルスの詳細

グリッド駆動用トリガパルスは E2V 社製 MA2709A トリガシステムで生成され、供給されている。トリガシステムは、上位からのタイミング信号を受けると G1 に 500V 750ns のプレトリガを出力する。これにより、カソードと G1 グリッド間の重水素ガスをイオン化する。プレトリガより 500ns 後、G2 に 1000V 500ns のメイントリガが出力され、サイラトロンの G2, G3 グリッドへ印加される。これによりアノードからカソード間全体がプラズマ化され導通状態となる。また、G2 には誤動作防止のために -140V のバイアス電圧が印加される。Figure 2 には模擬負荷に接続して測定したトリガ出力波形を、Figure 3 にはその周波数成分を示す。模擬負荷の終端抵抗(G1:10 Ω , G2:50 Ω)端で測定したため、波高はそれぞれ約半分になっている。ジッターの少ない安定な導通状態とするためにはメイントリガパルスの立ち上がり速度が重要となる。^[7, 8]

2.3 トリガパルスの伝達

各トリガパルスは Figure 1 に示すようにモジュレータ電源制御部から RG-59 同軸ケーブルにより、モジュレータ電源タンクの保護回路箱へ入力される。そして保護回路箱の出力から、同軸貫通端子によってタンク内部へ導入され、サイラトロンの各グリッドに供給される。

保護回路箱はサイラトロンで発生したサージがトリガシステムへ逆流する事を防ぎ、故障を防止している。内部にはメーカー推奨の TVS(Transient voltage suppressor)ダイオード(1.5KE400CA \times 4 直列)が対接地間に挿入されており、1.6kV 以上の電圧発生を抑制している。また、サージ吸収用スナバ回路としてダイオードと並列に CR 素子を備えている

3. トリガ回路部品の故障と現在までの対策

SACLA の運転開始から 2 年後より、TVS ダイオードの抵抗値が低下し、サイラトロンの導通が停止する事象が急増し、問題となった。当初は TVS ダイオードが油タンクの内部に設置されていたので、交

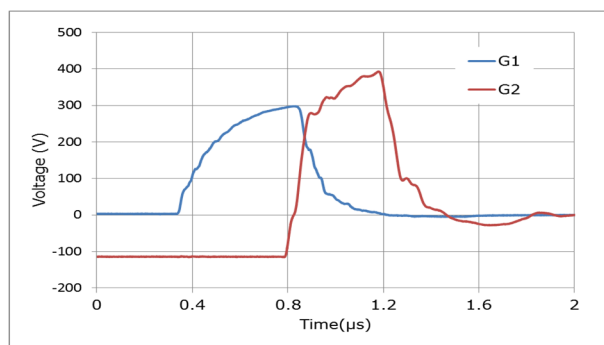


Figure 2: Wave forms of the G1 and G2 trigger pulses. The pulses are supplied from the MA2709A trigger unit.

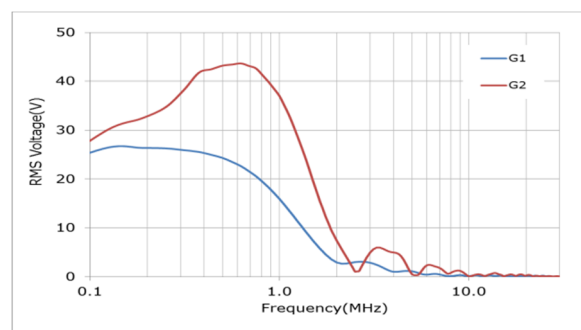


Figure 3: Frequency spectra of G1, G2 trigger pulses.

換作業を行うのに油中の気泡除去も含めて 6 時間を要していた。そこで、油タンク内に付けられていた TVS ダイオードを、CR スナバ回路と共に金属ケースに入れて油タンクの外に設置し、交換を容易に行えるようにした。^[3]

しかしながら、今度は TVS ダイオードに至るまでの間の各部品、すなわち同軸ケーブルや、同軸貫通端子、そしてグリッド入力抵抗に、このサージ電流が流れる事により短絡損傷や断線などで故障が発生した。これらのトラブルの原因を調査するため、TVS のグラウンド側に CT を挿入した試験用保護回路箱およびトリガライン用分圧回路を作成し、サージ電圧および TVS 通過電流を測定した。Figure 4 にはその測定例を示す。

図から判るように G1OUT 端子の電圧は約 20ns 周期の振動を繰り返しながら 4kV に達し 240ns 程で終息している。G1OUT 端子の電圧が 1.6kV を超えると TVS が導通し、その電流の最大値は 68A であった。使用している TVS ダイオード 1.5KE400CA の許容ピーク電流は 4A であり、定格をはるかに超えている。ただし、導通時間が 120ns と短いため即時に破損には至らず、徐々に絶縁抵抗が下がる形で劣化が進行していたものと推定される。また、サイラトロンから TVS ダイオードまでの経路では、ピーク電圧が 4kV に達しており、同軸ケーブルや SHV

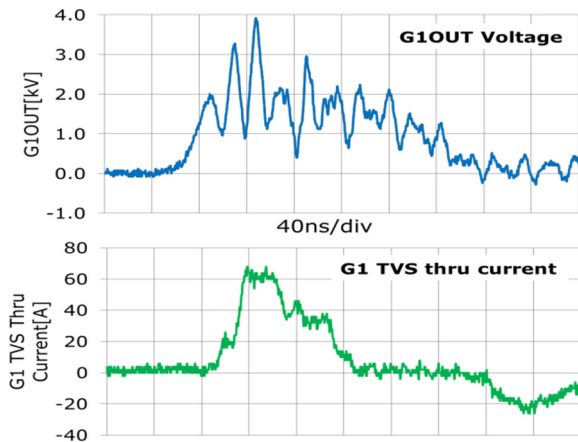


Figure 4: Wave forms of voltage and current through the TVS diode attached on the G1 trigger line, measured at "G1OUT" port in Fig. 1.

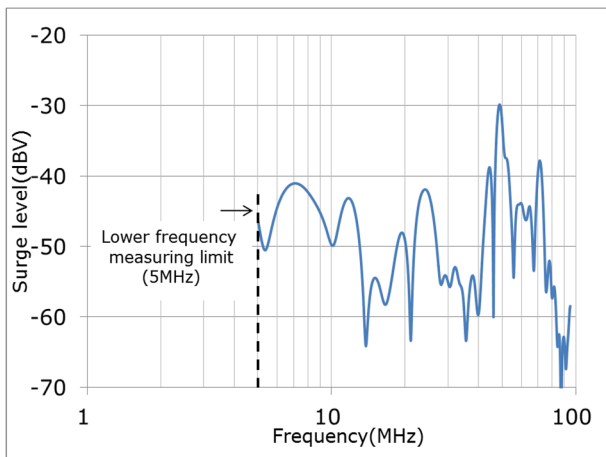


Figure 5: Frequency spectrum of the surge voltage, measured at G1OUT port, using a spectrum analyzer.

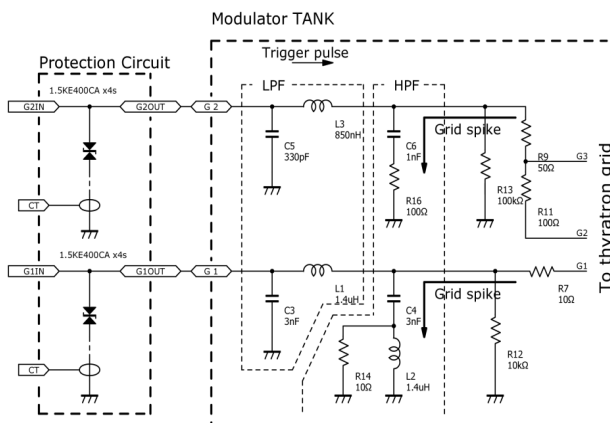


Figure 6: Filter circuit diagram.

コネクタ等の耐圧を超えているため、損傷の原因となっていたと考えられる。

この信号をスペクトラムアナライザを用いて測定した結果を Figure 5 に示す。50MHz 付近に最大のピークがあり、この高周波振動成分が大きなエネルギーを持っている事が確認できる。

4. 問題解決のためのフィルタ回路の実装

4.1 設計

以上に述べた調査の結果より、機器の故障の原因となっているサージの特徴は、主に G1 と G2 のトリガパルスの周波数成分と比較すると高周波成分を持つことである。故に、トリガ回路および TVS ダイオードの破損防止には LPF(Low pass filter) と HPF(High pass filter)の組み合わせによる、低周波のトリガ成分のサイラトロンへの通過およびサージの高周波成分の通過の阻止および接地への還流がもっとも有効であると考えられる。

この要求を実現すべく、以下の点に留意してフィルタ回路を設計した。

- 1) トリガ信号を劣化させず信号伝送方向に伝達できる帯域を確保する。
- 2) 高周波成分を反射した場合、グリッド電位が上昇し放電や部品破損の恐れがあるため、信号伝送方向に反射せず吸収する。
- 3) 油中に実装でき、耐電圧やサージ耐性を考慮した信頼性の高い部品で構成する。

G1 トリガパルスの主成分は 2MHz 以下であり、トリガパルスの低伝送損失を確保しながらサージ低減効果を十分に得られるように、フィルタのカットオフ周波数を 2.5MHz に設定した。一方で、G2 トリガパルスは立ち上がりの早さから 10MHz 付近までその高調波成分が広がっている。フィルタのカットオフ周波数を低く設定すると、波形が鈍りタイミングジッターに影響を及ぼす可能性がある事から、カットオフ周波数を 10MHz に設定した。また、G1、G2 それぞれのフィルタ回路において LPF と対称となる形で HPF および終端抵抗をサイラトロン側に配置し、終端抵抗で信号方向と逆方向に伝わるサイラトロンからの高周波サージを接地に吸収する構成とした。これによりサイラトロン側から見たインピーダンスが広い帯域でほぼ一定となり、反射による電圧の発生が防止される。Figure 6 にフィルタ回路の回路図を示す。

4.2 実装

Figure 7 には実装時の写真を示す。

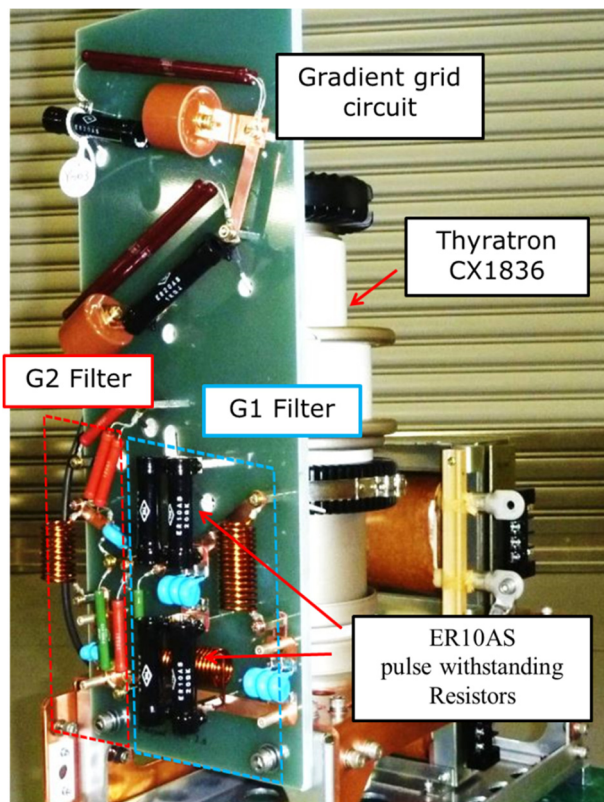


Figure 7: Photograph of the assembled filter circuits.

フィルタ回路は、サイラトロンの傍らに設置されている既存の分圧回路基板上に配置した。使用する抵抗には高サージ耐量のセラミック抵抗を、またコンデンサには 15kV 耐圧の単層セラミックコンデンサを選定した。特に G1 回路の直列抵抗は、サージが直撃する場所であるため、 20Ω 10W のセラミック抵抗(東海高熱 ER10AS)を 2 並列で使用し、電力容量に余裕をもたせた。

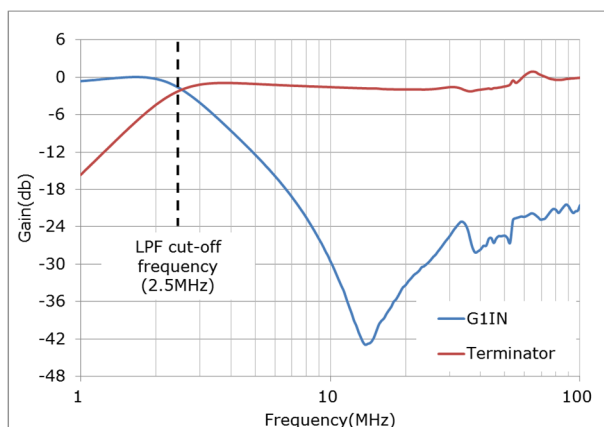


Figure 8: Frequency response of the transmission from the thyatron G1 grid to G1IN port through LPF (blue), or to the 10 ohm terminator at HPF side (red).

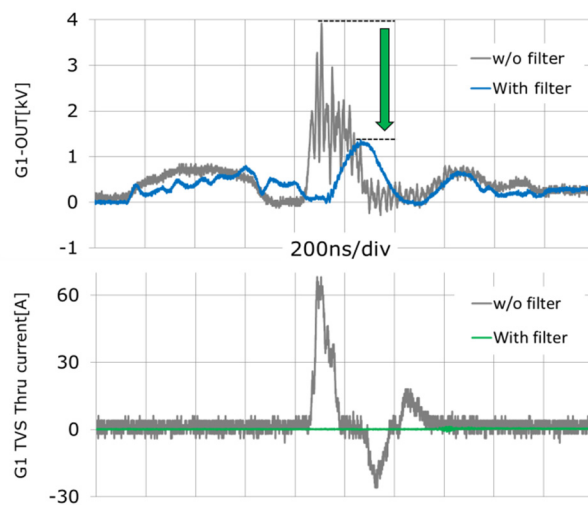


Figure 9: Comparisons of the G1OUT Voltage and TVS thru current wave forms, with the filter (blue and green) and without the filter (gray).

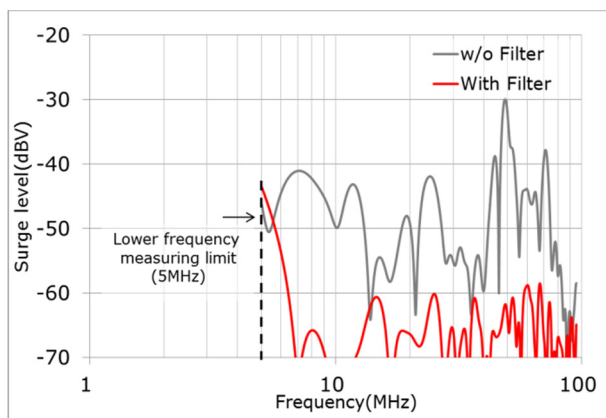


Figure 10: Frequency spectra with the filter circuit (red) and without the filter circuit (gray), measured at G1OUT port.

4.3 性能確認

製作したフィルタ回路が設計通りの性能を実現できている事を確認するため、ネットワークアナライザを用いて周波数特性の測定を行った。

信号源をサイラトロン側とし、サイラトロン～G1 入力端子間およびサイラトロン～HPF 終端抵抗間の通過特性を測定している。(Figure 8)

2.5MHz をカットオフ周波数として、50MHz において 20dB 以上の減衰が見られる。また、HPF 側は 3MHz 以上の周波数で安定して通過し、終端抵抗へ伝達する事が確認された。

4.4 実機試験

製作したフィルタ回路をモジュレータに実装し、Figure 4 と同じサイラトロンを用いて測定を行った。Figure 9 には波形データを、Figure 10 には周波数成分を示す。フィルタ無しの状態と比較し、G1OUT

端子におけるピーク電圧は4kVから1.4kVへと大幅に減少している。TVS 通過電流も68Aから2.3Aまで減少しており、定格の範囲内となった。50MHz付近に見られた高周波サージは、フィルタ設置前に比べて20dBV以上減衰していることが確認された。この構成において連続運転を行ったところ、フィルタ装着前では数時間でTVS破損が起こっていたのに対し、フィルタ実装後は8時間の連続運転を問題無く行う事ができた。

これらの確認を経て、運転に使用しているモジュレータ電源へ本フィルタを試験的に導入した。サージが大きく、通常は使用ができなかったサイラトロンをこのフィルタ回路と共に組み込み、問題なく運転できる事を確認した。2015年7月までに延べ1500時間の運転を行ったが、TVSの破損等の問題は発生しておらず、フィルタ回路がサージの抑制に有効であることが実証された。

5. まとめ、および今後

劣化したサイラトロンの導通時に発生する高周波サージを吸収し、かつ、トリガ信号を劣化せずに伝達するフィルタ回路を設計、製作した。このフィルタ回路によりピーク電圧の抑制および高周波サージ成分が低減できる事が確認された。

また、劣化によりサージが発生しているサイラトロンに、本フィルタを導入することによって、TVSダイオードの破損を防止し継続して運転に使用できることを確認した。今後、SACLAで使用している約70台のサイラトロンに対し、フィルタ回路を順次導入する計画である。

なお、調査の過程でG1トリガパルス幅の延長によりサージが低減される可能性が見出された。今後、より詳細に調査を行い、有効性を確認して行きたい。

参考文献

- [1] T. Ishikawa et. al., "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region", nature photonics 2012.141, (2012).
- [2] 稲垣隆宏, 他, "SACLA 主加速器の運転と保守の状況", 本学会年会, (2015).
- [3] 益田邦和, 他, "SACLA でのサイラトロンのトラブルと対策", 第11回日本加速器学会(2014).
- [4] 近藤力, 他, "XFEL/SPring-8 向けクライストロン用パルス電源の開発", 第5回加速器学会,(2008).
- [5] OHO 2013 年 テキスト「大電力高周波源」稲垣隆宏.
- [6] E2V Technologies CX1836 データシート.
- [7] E2V Technologies MA2709A. データシート.
- [8] E2V Technologies "Hydrogen Thyratrons Preamble".
<http://www.e2v.com/products/rf-power/thyratrons/>