

アバランシェサイリスタスイッチを用いた高電圧スイッチの保護回路の開発 DEVELOPMENT OF HIGH VOLTAGE SWITCH PROTECTION CIRCUIT USING AVALANCHE THYRISTOR SWITCH

内藤孝#, 明本光生

Takashi Naito#, Mitsuo Akemoto

KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Thyratron switches, which have been used as high-voltage, large-current switches, are being made into semiconductors, and we are developing a semiconductor switch that uses the avalanche mode of a thyristor. In avalanche mode, the switch does not operate unless a voltage above a certain level is applied, so a circuit that performs the switching operation only when a voltage above a certain level is applied is required. Further, when a failure occurs in a part of a semiconductor connected in multiple stages, a short circuit occurs in most cases, and the voltage of the failed semiconductor is also applied to the normal semiconductor, which may induce further failure. We developed a protection circuit to solve this problem. Furthermore, we have developed a circuit that detects self-destruction, where the output is output without an input trigger for some reason, and misfire, where the output is not output even with the input trigger. Report on its operation.

1. はじめに

我々はサイリスタのアバランシェモードを使った大電流スイッチ(Avalanche mode thyristor, AMT)を開発している。この大電流スイッチは加速器のキッカーマグネットで使用されているサイラトロンスイッチの代替することを目指している[1, 2]。サイラトロンスイッチはガス放電管であり、キッカーマグネット電源の場合、印加電圧 30 kV、スイッチ電流 2 kA を超える動作をしている。これを半導体スイッチで実現するには、単体では耐圧がないため Fig. 1

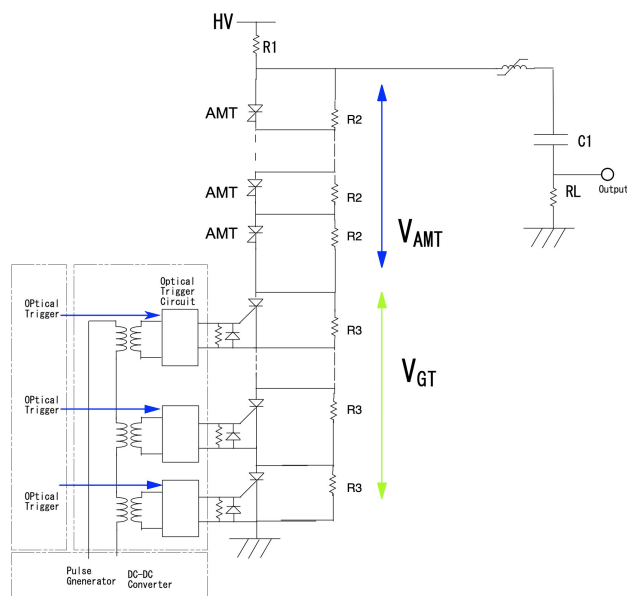


Figure 1: Circuit diagram of high voltage, high current switch using Avalanche mode thyristor (AMT). [3]

#takashi.naito@kek.jp

のように直列接続にする必要がある。また電流が十分でない場合並列接続にする必要がある。直列接続の場合、高電圧電位の半導体にトリガー信号を送る回路も複雑になる。AMT を使用した場合、アノード-カソードに印加する電圧で電子雪崩が発生する動作を利用するためトリガー回路が必要ない。そのため回路構成はシンプルになる。反面、印加電圧に制限がありスイッチ条件を整える必要がある。

AMT を使用した大電流スイッチは、既に実際のキッカーマグネット負荷を接続したテストベンチで試験を行ない 1.5 kA パルスを作れることを確認している[3]。サイラトロンスイッチを代替するためには、長期の使用に問題がないことを評価する必要がある。特にサイリスタを Avalanche mode で使用した事例はなく、半導体に寿命があるのかも調べられていない。そのため種々の条件で評価を行う必要がある。長期試験をする上でスイッチにトラブルがあった場合、適正に停止し原因を把握出来るようにする必要がある。今回、開発した保護回路は 1)適正電圧が印加されるまでトリガー入力を停止する回路、2)サイリスタに異常があった場合、トリガー信号を停止する回路、3)トリガー信号に対して出力が出ない(Misfire)、トリガー信号がないのに出力が出る(Self-fire)を検出する回路である。特に 3)の回路はサイラトロンスイッチでよく発生する問題でありサイラトロンスイッチを使用している電源の評価にも使用することを想定している。

2. 保護回路

2.1 印加電圧検出

AMTはバイポーラ半導体の二次降伏電圧を超えて電圧が印加された時、ゲートに入力がない状態でもオン電流が流れる効果を利用している。予め AMT に二次降伏電圧に近い電圧を印加しておき、下段のスイッチによって一気に電圧を印加する必要がある。AMT に印加する電圧が十分でない場合、スイッチ動作に移行しないばか

りか、オフ状態に過大電圧が印加されるため半導体内部で絶縁破壊が起こる可能性があり危険である。このような状態にならないために印加電圧が一定値を超えた時初めてトリガー信号が入力される回路を製作した(Fig. 2)。

Figure 2 の回路で R4 の電圧は印加電圧 HV の分圧電圧であり、この電圧が V_{th} を超えたかをコンパレータで比較してトリガー入力を制御している。実際にはサイリスタスイッチが動作した時は大きなパルスノイズが発生するため、R4 とコンパレータの間にはチョークコイルを入れ、パルスノイズがコンパレータの動作に影響がないようにする必要がある。

サイリスタの分圧抵抗は、動作範囲を広げるために AMT の抵抗値を変えてあり、HV が低い場合でも AMT に多めの電圧が印加されるよう設計している。HV が高い場合でも印加電圧が超過しないよう Zener Diode も用いている。そのため R4 の電圧は印加電圧に対して非直線になる。

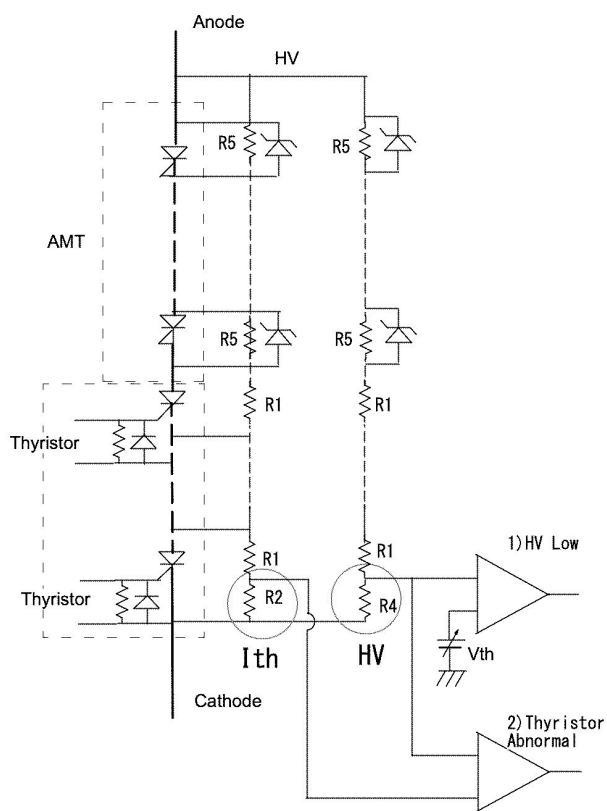


Figure 2: Circuit diagram of High Voltage Detection / Thyristor abnormal detection: Two comparators detect 1) the apply voltage exceeds the lower limit and 2) the thyristor has low isolation resistance which means abnormal thyristor.

2.2 サイリスタ異常検出

多段接続の AMT を含むサイリスタの一個に故障が生じた場合、その段の絶縁抵抗が低下し高電圧が印加されなくなる。高電圧は残りのサイリスタで分圧されることになり、それぞれの分圧電圧が大きくなり残りのサイリスタも故障する可能性が高まることになる。そのまま運転した場合、ドミノ倒しのように連鎖的に故障する場合もある。このような状況を回避するために一個でも異常が検出されれば停止するために検出回路が必要となる。この異常を検出するために高電圧電位にある各半導体の電圧を測定・検出して光信号等で検出信号を送る方法が提案されているが、回路が複雑になり、コストの問題もある。

今回製作した回路を Fig. 2 に示す。この回路の動作は、サイリスタに印加した電圧の分圧抵抗に流れる電流と印加電圧の分圧を比較することによって、サイリスタ抵抗の異常の有無を検出するものである。Figure 2 で R2 に流れる電流は各段の分圧抵抗(R1, R5)との分圧比で決まるが、サイリスタに異常があると抵抗値が下がり、R2 に流れる電流が増える。R2 の両端の電圧を印加電圧の分圧抵抗 R4 の電圧より低く設定しておくこととサイリスタに異常が発生した時、R2 の電圧が R4 の電圧を超えるため、コンパレータの出力は異常を検出出来る。この回路で検出出来るのは多段接続のサイリスタの一個または複数に異常があることで、どのサイリスタに異常があるかは解らない。サイリスタ個々の抵抗を測定すれば異常サイリスタを特定することは可能であるが、実際の運転に際しては全体を交換することを想定している。

Figure 3 は HV の電圧に対して R2 の電圧と R4 の電圧をプロットしたものであるが、AMT の分圧抵抗に Zener Diode が並列に接続されているために HV に対して非直線になっているが、R4 の分圧回路にも同じ抵抗値と

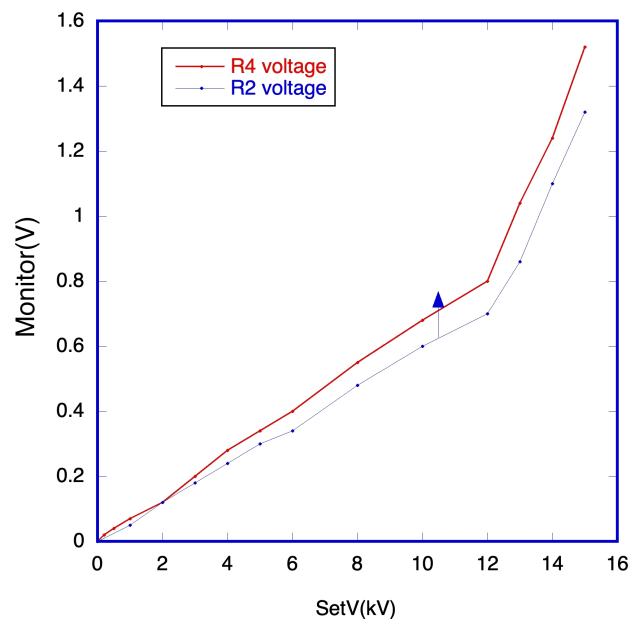


Figure 3: Set voltage versus R4, R2 voltage: The detection voltages are not linear, but the relation between two voltages is same. When the isolation impedance of the thyristor is reduced, the R2 voltage exceeds the R4 voltage.

Zener Diode が入れてあるため電圧は同様に変化している。

これらの保護回路の特徴は、サイリスタがスイッチする前のタイミングで印加電圧の条件を比較していることでノイズの影響も少なく、スイッチから比較的離れた場所におくことも可能である。

3. 自爆・無出力(Self-fire/Misfire)検出回路

サイトロンスイッチを用いた高電圧パルス回路では何らかの原因で入力トリガーのないタイミングでスイッチ動作が発生することがある。これを自爆(Self-fire)と呼んでいる。逆に入力トリガー入ってもスイッチ動作が起らず出力が出ないことがある。これを無出力(Misfire)と呼んでいる。この様な状況が頻発していれば異常であることはすぐに気づくが、非常に低い頻度で発生する場合気づかないこともある。ライナックのクライストロン用パルス電源などでは1日に数回程度自爆・無出力が発生しても許容される場合がある[4]。

サイトロンスイッチの場合は、Reservoir 電圧や周囲温度、寿命など様々な要因によって発生することが解っており、発生頻度をある程度調整することも可能である。しかし、サイリスタを用いたスイッチの場合、半導体もしくは周辺回路の異常が想定され、直ちに停止して原因を調べる必要がある。そのために自爆・無出力検出回路を製作した。

Figure 4 に自爆・無出力検出回路を Fig. 5 にそのタイミング図を示す。自爆検出は入力トリガーがないタイミングにパルス出力があった場合を検出している。無出力検出は入力トリガーがあった場合にそのタイミングの一定時間幅の内にパルス出力がなかった場合を検出している。自爆・無出力検出信号は一回でも発生すれば、リセットするまで検出信号を保持するようにしてある。この検出信

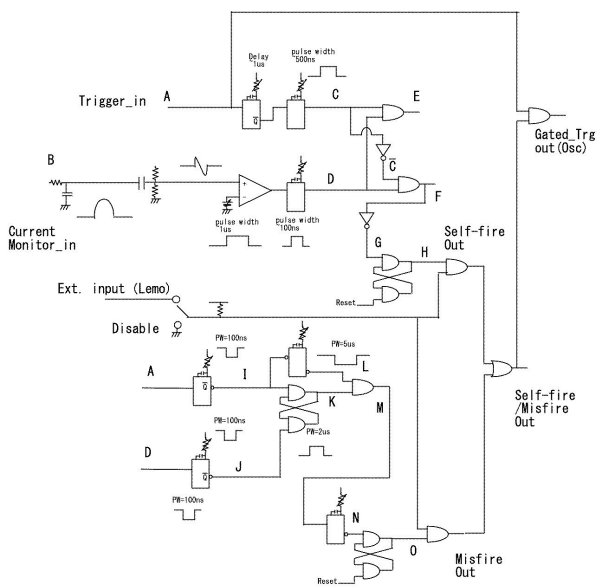
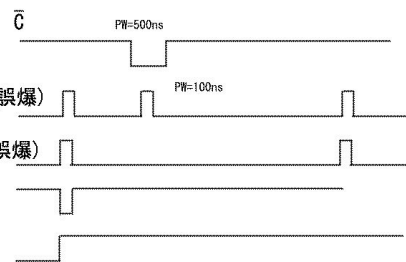
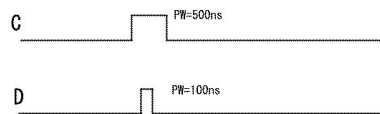


Figure 4: Diagram of the self-fire/misfire detection circuit: This circuit detects the output pulse of the high voltage pulse power supply without the trigger(self-fire) and the no-output pulse when the trigger input(misfire).

号をインターロックに用いればパルス電源を停止することも可能であり、そのまま運転する場合でもアラームを発生したり、オシロスコープにその時の波形を保持することが出来るよう設計した。

Self-fire



Misfire

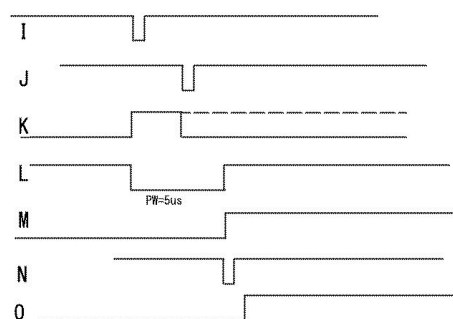


Figure 5: Timing chart of the self-fire/misfire detection circuit.

4. 今後の展望

自爆・無出力検出回路は、サイトロンスイッチを用いたパルス電源でも使用することが出来る。SuperKEKB 加速器では MR の入射キッカーに非常に低い頻度ではあるが自爆が発生し問題となっている。MR の入射キッカーでは6台のキッカーでバンブ軌道を形作っているが、そのうちの1台に自爆が発生するとバンブ軌道が閉じなくなり、周回ビームの多くを失う現象が発生している。自爆の発生頻度とサイトロンの運転条件を調べる上で、この自爆・無出力検出回路は非常に有効であると思われる。長時間の測定が必要のため、まだデータは得られていないが、この目的に使われる予定である。

サイリスタ保護回路に関しても、基本的動作は確認済みであり、実負荷を接続したキッカーテストベンチで評価を行う予定である。

謝辞

本研究は科研費 JP21K12527 の助成を受けたものです。本研究を支援していただきました小関施設長、飛山主幹に感謝致します。

参考文献

- [1] T. Naito *et al.*, PASJ2020 FRPP47, Aug (2020).
- [2] T. Naito *et al.*, PASJ2022 TPU037, Aug (2022).
- [3] T. Naito *et al.*, PASJ2023 THP16, Aug (2023).
- [4] T. Inagaki *et al.*, PASJ2012 THPS092, Aug (2012).