

動作範囲の広いサイリスタアバランシェモードスイッチの開発

DEVELOPMENT OF A THYRISTOR AVALANCHE MODE SWITCH WITH A WIDE OPERATION VOLTAGE

内藤孝[#], 明本光生

Takashi Naito[#], Mitsuo Akemoto

KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

A pulse current over 1kA is used at the kicker magnet of the accelerator. A gas discharge tube called a thyratron is used as the pulse power source. Attempts to replace the thyratron to semiconductors are being tested in many laboratories. We are developing a circuit using avalanche mode thyristors (AMTs). It has following futures, a faster switching speed for the normal mode switching and does not have trigger circuit. We already confirmed a hicurrent pulse of 1.5 kA or more can be generated. The AMTs must apply an appropriate operation voltage, which means the operation range is limited. In the case of the kicker application, the pulse current needs to be variable as an accelerator device. This time, we have developed the circuit of the avalanche mode thyristors with a wide operating range. In this report, we report on the development status.

1. はじめに

加速器のキッカーマグネットなどで使用する大電流、高電圧のパルス電源には、これまでサイラトロンと呼ばれるガス放電管が使われてきた。サイラトロンは大電流、高電圧のスイッチが可能である反面、寿命があり放電特性も周囲の温度に影響されるなどの問題があるため半導体に置き換える試みが多く、の研究所などで行われてきた[1, 2]。我々は以前より開発している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[3, 4]を使ったパルス電源を開発し、サイラトロンを使ったパルス電源と置き換えることを提案している。サイリスタは Fig. 1 に示すように通常アノードとカソードの間に電圧 V を印加しておきゲートに電流 I_G を流すことでアノード-カソード間 (A-K 間) の電圧がオフ状態からオン状態に移行することによって電流が流れる。ゲート電流 (I_G) が大きいと印加電圧が低くても容易にオン状態になる。反対に印加する電圧が高いと I_G が低くてもオン状態になる。さらに印加電圧が大きくなると I_G がゼロであってもオンになる。この I_G がゼロであってもオンになる電圧をブレイクオーバー電圧 (Break over voltage) と呼ぶ。このような動作はバイポーラ半導体ではよく知られ電流が半導体内部で電子雪崩をおこすことからアバランシェモードスイッチと呼ばれる。我々はこのモードでスイッチするサイリスタをアバランシェモードサイリスタ (AMT) と呼び、AMT を使った大電流、高電圧のスイッチを開発している。通常のゲート電流によるスイッチと比較して AMT は高速でスイッチする特性を有しているが、スイッチ動作は A-K 間に印加される電圧によって決まるため、動作電圧が限定される。加速器のパルス電源として使用する場合、低い電圧で調整運転する場合があり動作電圧が限定されるのは使い勝手が悪い。こ

の問題を解決するためにサイリスタの回路構成を変え動作電圧の広い回路を開発した。

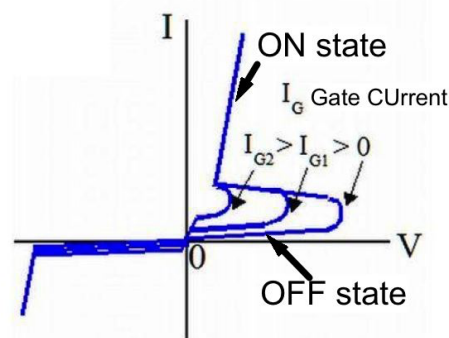


Figure 1: Layout of ATF accelerator.

2. AMT を使ったスイッチ回路

Figure 2 に AMT を使ったスイッチ回路を示す。この回路の動作について説明する。最下段のサイリスタは通常のゲート入力によるスイッチ回路であり、2 段目以降はゲート入力をショートした AMT である。試験は MMIX1H60N150V1 (IXYS 社) のサイリスタを用いた。

各段にはあらかじめ十分な電圧が印加されており、初段がゲート信号によってスイッチして A-K 間の電圧が下がると 2 段目にはあらかじめ印加されていた電圧に加えて初段に印加されていた電圧が印加される。この電圧がブレイクオーバー電圧を超えると 2 段目もオン状態となり同様に A-K 間の電圧がゼロになる。以降 3 段目には印加電圧+初段, 2 段目の電圧が印加されて 3 段目もオン状態となり最上段まで連続的にオン状態になる。この様にして最下段のサイリスタにゲート信号を入力するだけで直列接続され

[#]takashi.naito@kek.jp

た全てのサイリスタをオンにすることが出来る。従って、2段目以降のゲートトリガー回路は不要となる。サイリスタがオンになることでCに蓄えられた電荷はグラウンドに流れ負荷抵抗(RL)に負荷電流が流れることで出力となる。また、Fig. 2 の回路でマグネチックスイッチ(MS)は、サイリスタがオンになってから負荷電流が流れるまでの時間を遅らせる効果を持つ[5]。サイリスタはオン状態になり A-K 間の電圧が下がってもオン抵抗は十分に下がらない。チップの面積が広いのでチップ全体にキャリアが行きわたる時間が必要となる。そのためサイリスタがオンになった直後に大電流を流すと故障の原因となる。Figure 3 は、AMT 17 段の波形を示す。印加電圧 28kV、負荷電流 1.5kA を計測している。サイリスタがオンになり電圧が下がってから負荷電流が流れ始めるまで約 300ns の時間差がある。Figure 4 は負荷に PFL を接続した場合の波形を示す。立ち下がり時間は 200ns が実現されている。

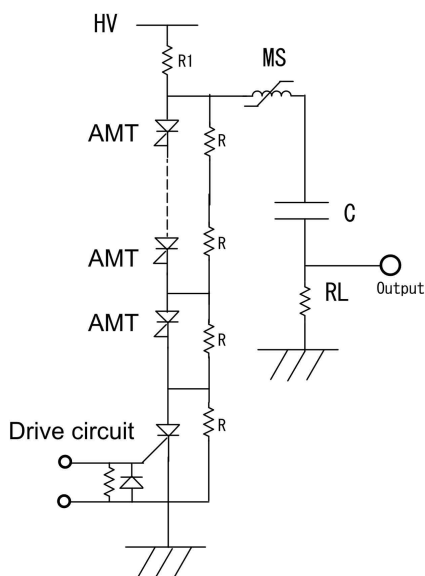


Figure 2: A circuit of the multi-stage AMT with Magnetic Switch(MS) .

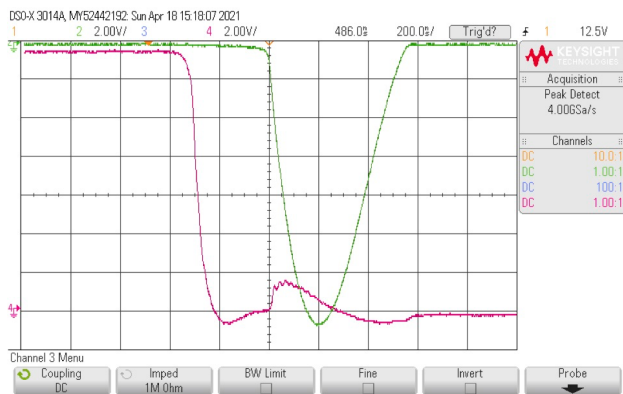


Figure 3: Waveform of the AMT test circuit with a capacitor - Anode voltage(pink): 28kV, Load current(green): 1.5kA, Horizontal time scale: 200ns/div.

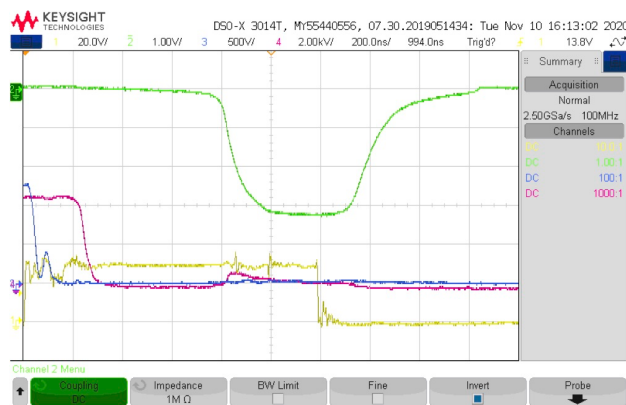


Figure 4: Test circuit of the multi-stage AMT with Magnetic Switch(MS).

AMT を使った Fig. 2 の回路で高電圧、大電流のスイッチが可能であることが確認されたが、この回路は印加電圧の可変範囲が狭い。動作範囲は最大印加電圧の 70~80% 程度の電圧からである。これは AMT がブレイクオーバー電圧によってスイッチするため、各サイリスタに十分な電圧を印加した状態でないとスイッチしないためである。加速器のパルス電源として使用する場合調整などのために低い電圧で使用する場合があります、動作範囲の広いパルス電源が望まれる。

3. 動作範囲の広い AMT 回路

AMT を使ったスイッチ回路の動作範囲を広げるために Fig. 5 の回路を考案した。Figure 2 の回路では初段のサイリスタがオンになった時に、その直上段の AMT がブレイクオーバー電圧を超える必要があるが、ブレイクオーバー電圧はサイリスタの最大定格電圧の 2 倍近い電圧であるため両方に最大定格電圧に近い電圧を印加しておかなければならない。さらに上位の AMT が連続的にスイッチするためには各段の AMT にもある程の印加電圧が必要である。AMT は直流の印加電圧が低くてもドライブする電圧との合計がブレイクオーバー電圧を十分越えればスイッチするのでゲートトリガーでスイッチするドライブサイリスタの段数を増やし、 $V_{GT} + V_{AMT}$ の合計がブレイクオーバー電圧を超えるよう設計すれば低い電圧でも AMT をスイッチすることが出来る。トリガー回路には光トリガー回路を用い、ドライブサイリスタ各段のゲートに入力パルスを供給している。光受信機を含むゲート回路への電力は接地電位の発信機と高電圧電位の受信機をパルストランスで絶縁する構成の DC-DC コンバータによって供給している。実験ではドライブサイリスタ 4 段、AMT 7 段の合計 11 段構成の回路で、最低動作電圧は 7kV から 19kV まで電圧を可変出来ることを確認した。Figure 6 に電圧電流特性を示す。実験では C1 の容量を少なくしてピーク電流を少なくしてあるが、最大電圧 20kV に対して 7kV 程度から動作することを確認した。実験

ではドライブサイリスタへのゲート信号は光トリガー回路を使用した。Fig. 7 に示すようなパルストランスを用いたトリガー回路でも同等の動作が可能であることを確認している。トリガーパルスを高速度の MOS-FET を使い高電位電位のゲートに供給する。パルストランスを介することによって各段は絶縁されている。パルストランスを用いたトリガー回路は安価である反面ノイズなどの影響を受けやすい傾向がある。

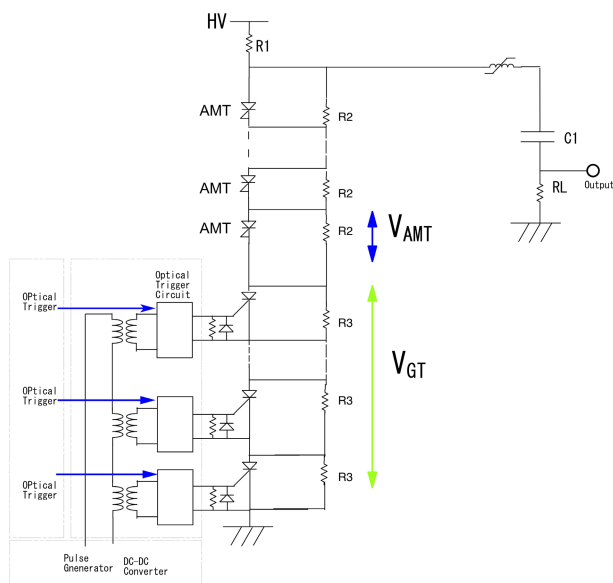


Figure 5: Waveform of the AMT test circuit with a capacitor - Anode voltage(pink): 28kV, Load current(green): 1.5kA, Horizontal time scale: 200ns/div.

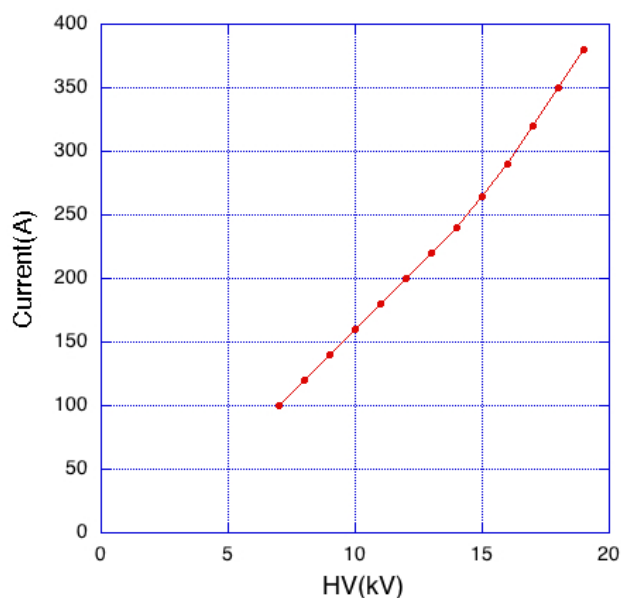


Figure 6: Waveform of the AMT test circuit with a pulse forming network - Anode voltage(pink): 10kV, Load current(green): 320A, Horizontal time scale: 200ns/div.

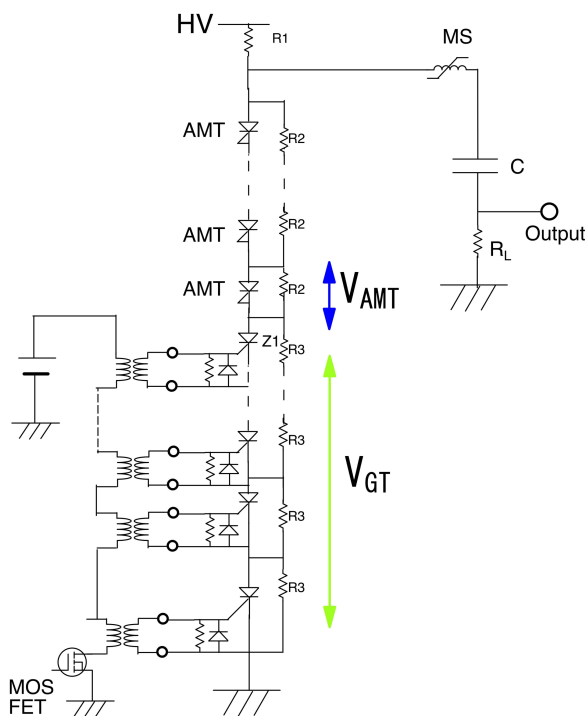


Figure 7: Test circuit of the multi-stage AMT with Magnetic Switch(MS).

4. 今後の展望

ドライブサイリスタと AMT の段数を適した段数で構成することによって動作範囲の広い AMT スイッチ回路を開発した。(特許出願中:特願 2022-117311) このスイッチによって加速器のキッカーで使用しているサイラトロンをの代替を目指す。

ドライブサイリスタと AMT の段数の割合は、最大動作電圧に対して動作範囲をどこまでとするか設計により決められる。ドライブサイリスタを多くすれば動作範囲は広がるが、トリガー回路などの付帯回路が多くなり、動作も通常のゲートトリガーに近いものになる。また、上段のドライブ回路は高電位になるため DC-DC コンバータは高耐圧のものが必要と成る。反対にドライブサイリスタを少なくするとトリガー回路が省略でき、トリガー回路は高電位まで電圧が印加されないため耐圧も低いものを使うことができる。動作も AMT の高速性が得られる反面、動作範囲が狭くなる。加速器のキッカー用パルス電源では 10kV~30kV 程度の範囲で可変に出来れば十分使用出来るので、今回の実験と同程度の比率で段数を増やし 20 段程度の構成で実現可能と思われる。

また、今回はドライブサイリスタのトリガー回路に光トリガーとパルストランスをテストした。パルストランスによる安価なトリガー回路を使ったスイッチでも動作することを確認した。用途によっては安価なスイッチとして使用されることが期待される。

謝辞

本研究は科研費 JP21K12527 の助成を受けたものです。また、本研究の一部は共同研究体「つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション(TPEC)」の事業として行われました。本研究を支援していただきました小関施設長、増澤主幹に感謝致します。

参考文献

- [1] C. Kondo *et al.*, PASJ2020 FRPP35, Aug (2020).
- [2] A. Tokuchi *et al.*, “Development of a high-power solid-state switch using static induction thyristors for a klystron modulator”, NIM-A 769 (2015) 72-78.
- [3] T. Naito *et al.*, PASJ2019 THPH030, Aug (2019).
- [4] T. Naito *et al.*, PASJ2020 FRPP47, Aug (2020).
- [5] T. Naito *et al.*, “A High Voltage Pulse Generator using Avalanche-mode Thyristors”, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.141 No.1 pp.48-55, DOI: 10.1541/ieejfms.141.48