

# アバランシェサイリスタスイッチを用いたキッカー電源の動作試験 OPERATION TEST OF KICKER POWER SUPPLY USING AVALANCHE THYRISTOR SWITCH

内藤孝#, 明本光生

Takashi Naito#, Mitsuo Akemoto

KEK, High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

The SuperKEKB accelerator in KEK uses multiple kicker power supplies for MR injection. Stable operation of the kicker power supplies is required for the stable beam injection. We prepared a kicker power supply test bench for evaluating thyatron switches and optimizing circuit constants. This time, we conducted an operation test in which the thyatron switch was replaced with an avalanche thyristor switch in order to evaluate the possibility of converting the thyatron switch into a semiconductor. We will report on the test results on the Kicker power supply test bench.

## 1. はじめに

サイリスタの Avalanche mode を使用した大電流スイッチを開発し、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]。今回、キッカー電源のテストベンチを整備し、サイリスタスイッチでの試験を開始した。Figure 1 は高エネルギー加速器研究機構 SuperKEKB 加速器で使用されているキッカー電源である[3]。SuperKEKB 加速器の入射には Low Energy Ring/High Energy Ring(LER/HER)それぞれのリングで 3 台 x 2 のキッカーが使われており、ビーム入射時にバンプ軌道を作っている。バンプ軌道はその領域以外には軌道の変化がない様に複数台のキッカーの蹴り角を調整してあるが、キッカー電源の 1 台が誤動作を起こすと、その下流のビーム軌道は大きく振動するためビームがコリメータに当たり消失してしまう。SuperKEKB 加速器では蓄積電流の増加に共なって、このビームロスが深刻な問題になりつつある。消失したビームは加速器のコンポーネントにダメージを起こすほどのパワーであるため、サイラトロンスイッチの誤動作などによるキッカーの異常を可能な限り少なくする必要がある。改善策の一つとして有望視されているのが、一台のキッカー電源で 2 台のキッカーマグネットをドライブするダブルキッカーである。2 台のキッカーマグネットを蹴り出す方向と蹴り戻す方向のペアにすることによって、キッカー電源が誤動作してもバンプ軌道の高さが変わるだけで下流のビーム軌道に大きな影響を与えない。しかし、ダブルキッカーに構成を変えるのは大きなシステム変更であり、事前にテストベンチで評価を行う必要がある。我々は 2022 年にサイラトロンスイッチの評価や誤動作問題に対処するためにキッカー電源のテストベンチを構築した。このテストベンチは、かつて高エネルギー加速器研究機構 フォトンファクトリー(PF)リングの入射に使われていたキッカー電源を使用している[4]。PFN やキッカーマグネットのパラメータなどは少し違っているが、ほぼ同じ容量の電源でありサイラトロンスイッ

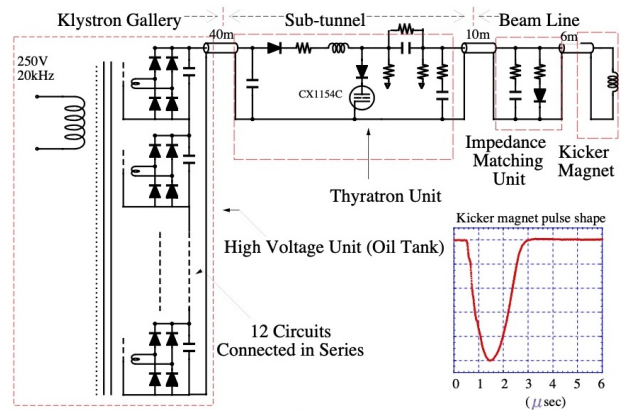


Figure 1: SuperKEKB Injection kicker system power supply[3].

ちも同型のものが使われている。評価試験の一つとして、テストベンチのサイラトロンを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に交換し、運転することでサイリスタスイッチが実機としての運転に問題がないか評価を行った。

我々が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(Avalanche mode thyristor, AMT)[1, 2]は、サイリスタにブレークオーバー電圧を印加することによって、ゲート入力がない状態でもスイッチ動作を利用している。利点としてはゲート入力が必要ないため入力回路を省略出来ること、スイッチ動作が通常のゲート入力を使ったサイリスタ(Gate mode thyristor, GMT)より高速であることなどが挙げられる。注意点としては、サイリスタにブレークオーバー電圧以上の電圧を印加する必要があるため、印加する電圧の範囲が制限されることが挙げられる。そのため動作電圧の変動範囲が狭い。加速器のキッカー電源などでは出力をある程度可変にする必要があるが、この問題に対して AMT と GMT を適した比率で動作させることで動作電圧の変動範囲を広げることが出来る[4]。キッカー電源テストベンチを使ったサイリスタスイッチの実験について報告する。

#takashi.naito@kek.jp

## 2. キッカーテストベンチ

Figure 1 に SuperKEKB 加速器で使用されているキッカー電源を示す。キッカーマグネットは集中定数型でキッカーマグネットのインダクタンスとキャパシタによる LC で決まる half-sine の出力電流を生成する。サイラトロンスイッチは CX1154C/CX1174C が使われており、パルス幅は約  $2 \mu\text{s}$ (FWHM)、印加電圧/ピーク電流は最大 35 kV, 2 kA である。繰り返しは最大 50 Hz である。通常の運転では 15k V 前後で運転されている。

Figure 2 はキッカー電源テストベンチである。かつて PF リングの入射キッカーの電源として使用されていたものである。1988 年製である。PF リングの入射には入射のパラメータが変わったため新規の電源が使われ現在は使われていないため、テストベンチ用として整備を行った。この電源の仕様は、最



Figure 2: Picture of a kicker test bench which was used as the injection kicker of PF storage ring of KEK.

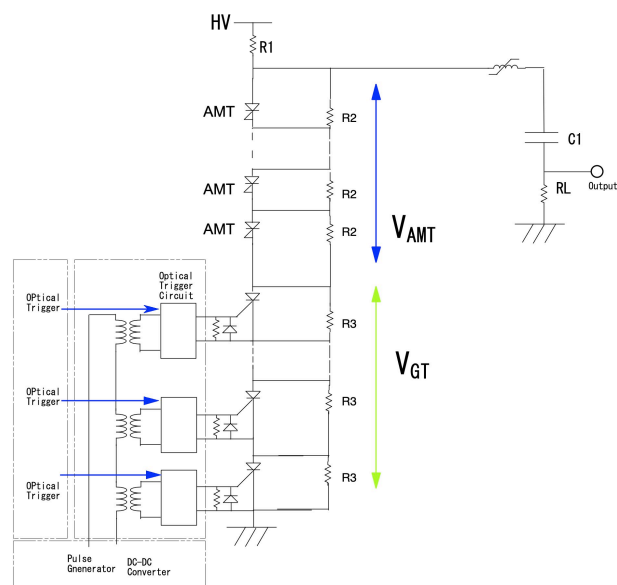


Figure 3: Circuit diagram of the AMT test circuit with a capacitor and a load resistor.

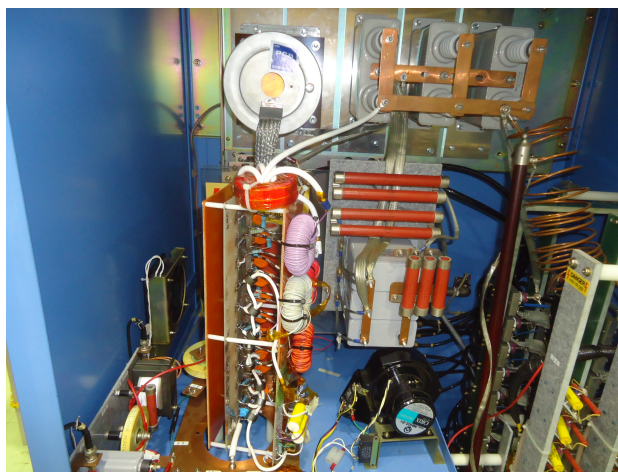


Figure 4: Picture of an AMT switch installed in the Kicker Test Bench.

大 36 kV, 2.5 kA@5.8  $\mu\text{H}$ , 繰り返し 25 Hz である。ほぼ SuperKEKB 入射キッカー電源と同じパラメータであり、サイラトロンスイッチも CX1154C/CX1174C が使われている。写真左側が FPN, サイラトロンスイッチが入っているパルサー部であり、右側が充電部である。充電は共振充電方式であるため繰り返しを変えるとサイラトロンの動作電圧が変わってしまう特性がある。繰り返しに関しても安定度を気にしなければ 50 Hz 動作も可能である。その他にもマッチング回路や PFN の容量など、調整を行う必要があるが、動作試験を行うには十分である。

## 3. AMT 回路

サイリスタのゲート入力をカソードに短絡し入力電圧をゼロの状態であノード-カソード間(A-K)にあらかじめ十分な電圧が印加された状態でさらに大きな電圧を印加すると半導体内で電子雪崩が発生し、サイリスタはオフ状態からオン状態になる。このスイッチする電圧をブレイクオーバー電圧と呼ぶ。この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、スイッチを起こすにはあらかじめ印加した電圧に加えて大きな電圧を瞬時に加える必要がある。Figure 3 のような多段構成では、通常のゲートトリガーのサイリスタ回路 (GMT) を複数段構成にすることによって GMT 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最下段の AMT にブレイクオーバー電圧を超える電圧が印加される。その瞬間に最下段の AMT がオンになり、その上位の AMT にはさらに大きな電圧が印加され順次上位の AMT もオン状態となり最上段まで連続的にオン状態になる。

AMT を使ったスイッチ回路の動作範囲を広げるために Fig. 3 の回路では GMT と AMT で各段に電圧を供給する分割抵抗の割合を変えて、全体の印加電圧が低くても AMT にある程度の電圧が印加されるように設計されている。AMT が連続的にスイッチするためには各段の AMT にある程度の印加電圧をかけて

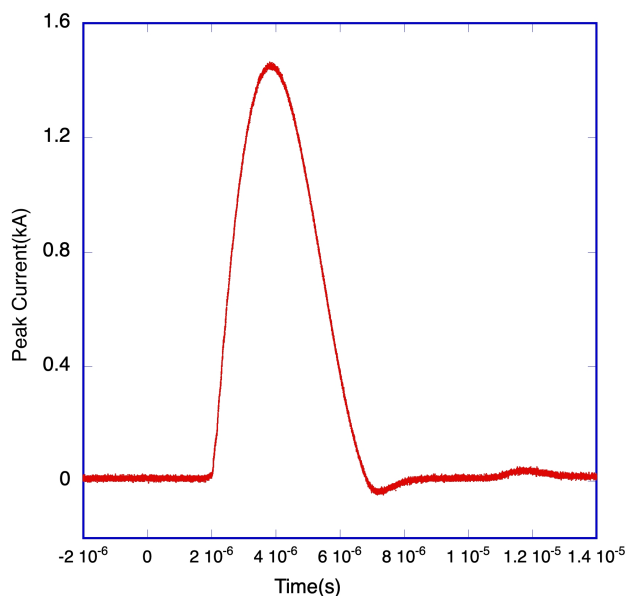


Figure 5: Waveform of the Thyristor Switch using AMT at the condition of the voltage 15 kV, the Magnet inductance 5.8  $\mu$ H and the PFN capacitor 0.2  $\mu$ F.

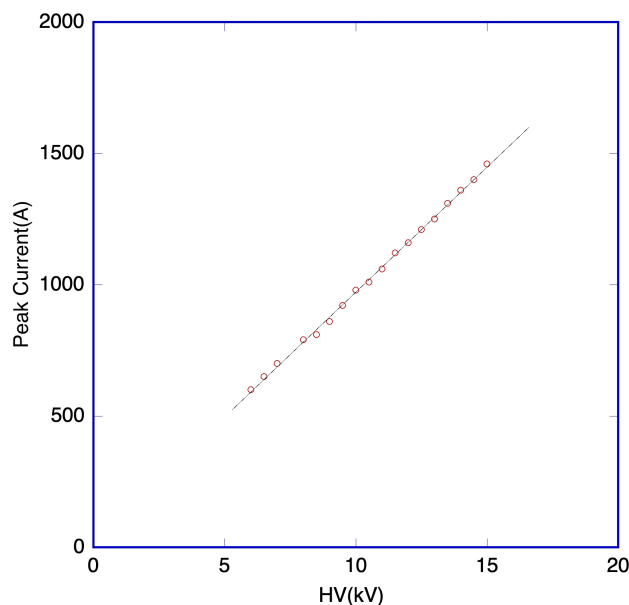


Figure 6: Characteristics of Voltage versus peak current of the Thyristor switch using AMT in the kicker power supply test bench.

おく必要がある。GMTはゲートトリガー入力十分であれば、低い電圧でもスイッチするので GMT の合計の電圧+最下段の AMT の電圧がブレイクオーバー電圧を超えれば、全てのサイリスタはスイッチする。したがって、GMT と AMT の割合を変えることで最低のスイッチ電圧が決まる。AMT の割合が多ければゲート回路は少なくすることが出来るが、最低の動作電圧は高くなる。逆に GMT の割合が多ければより低い電圧からスイッチすることが出来る反面、ゲート回路が上位のサイリスタまで必要となる。

このような構成にすることによって、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)

#### 4. キッカーテストベンチでの試験

Figure 4 は、キッカーテストベンチのサイラトロンスイッチをサイリスタスイッチに置き換えたものである。サイリスタスイッチは GMT7 段、AMT 4 段の合計 11 段構成の回路で抵抗負荷の試験で 6 kV から 16 kV の範囲で動作することを確認している。抵抗負荷の試験ではパルス幅も 200 ns、ピーク電流 600 A 程度までしか試験されておらず、実際のキッカー電源で使用されるパルス幅数  $\mu$ s、ピーク電流 1 kA を超える運転に耐えられるかはまだ評価されていなかった。キッカーテストベンチを使うことで実機に近いパラメータでの運転での評価を行うことが出来る。

Figure 5 に CT で測定したサイリスタスイッチによる電流波形を示す。サイラトロンスイッチを使った波形とほぼ同じであることを確認した。キッカーテストベンチでは、以前 PF で使われていたキッカーマグネット (inductance 5.8  $\mu$ H) を負荷として接続し、放電用の PFN は 0.2  $\mu$ F を使用して約 4  $\mu$ s (FWHM) のパルスを生成している。15 kV の印加電圧に対して 1.5 kA のピーク電流を計測した。Figure 6 に電圧を変化させた時の電流特性を示す。6 kV~15 kV の範囲では直線的でありサイラトロンからサイリスタスイッチに変えたことによる電流の変化は見られない。

その他、マッチング回路のダイオードや抵抗などは PF で使用していた時のものをそのまま用いたため、波形の反射が不完全であるが、いずれ調整によって反射を抑える予定である。

#### 5. 今後の展望

キッカーテストベンチを使ったサイリスタスイッチの試験を行い、ほぼサイラトロンと同等の出力特性を得た。サイリスタスイッチはまだ 1 Hz 程度の低い繰り返しでの特性であり、今後 50 Hz まで繰り返しを上げて熱的な問題がないか評価する必要がある。また、長期に亘って運転しスイッチとしての寿命を評価する必要がある。

今回試験を行ったサイリスタスイッチは GMT7 段、AMT 4 段の合計 11 段構成であり、最大印加電圧は 16 kV である。最大印加電圧を 24 kV まで大きくした GMT10 段、AMT 6 段の合計 16 段構成を準備しており、キッカーテストベンチで試験を行う予定である。設計段階では、さらに多段接続することによって高い最大印加電圧を実現することを目指している。その過程で、この方式の最大ピーク電流、最大繰り返しの限界も評価されると思われる。すでに、小容量の PFN と負荷抵抗を使った小電力の試験では多段接続で 30 kV 近くの電圧を印加した試験も行っており [2]、多段接続によって最大印加電圧を大きくして多くのアプリケーションに使用することを目指している。



## 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] T. Naito *et al.*, PASJ2020 FRPP47, Aug (2020).
- [2] T. Naito *et al.*, PASJ2022 TPU037, Aug (2022).
- [3] M. Kikuchi *et al.*, “Beam-transport system of KEKB”, NIM-A 499-1 (2003) 8-23.
- [4] T. Mitsuhashi *et al.*, “Accumulation of Positrons into The Photon Factory storage ring”, Particle Accelerators 1990, Vol 33, pp 87-92.