

半導体クローバスイッチのための自己給電回路の開発

DEVELOPMENT OF A SELF-POWER FEEDING CIRCUIT FOR SEMICONDUCTOR CROWBAR SWITCHES

生駒直弥^{*,A)}, 亀崎広明^{A)}, 森均^{A)}, 徳地明^{A)}, 小野 礼人^{B)}, 高柳智弘^{B)},
不破康裕^{B)}, 篠崎信一^{B)}, 堀野光喜^{C)}, 植野智晶^{C)}

Naoya Ikoma^{*,A)}, Hiroaki Kamezaki^{A)}, Hitoshi Mori^{A)}, Akira Tokuchi^{A)}, Ayato Ono^{B)}, Tomohiro Takayanagi^{B)},
Yasuhiro Fuwa^{B)}, Shinichi Shinozaki^{B)}, Koki Horino^{C)}, Tomoaki Ueno^{C)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory

^{B)} J-PARC/JAEA

^{B)} NAT Corporation

Abstract

We have been developing a semiconductor crowbar switch for the J-PARC LINAC klystron power supply to replace ignitrons. A semiconductor crowbar switch consists of many semiconductor devices connected in series. A self-power feeding circuit based on a flyback converter has been developed to drive semiconductor devices floating at high voltages. A switching test of the semiconductor crowbar switch equipped with the self-power feeding circuit was conducted and switching at rating voltage of -30 kV was successfully demonstrated.

1. はじめに

加速器用大電力パルス電源におけるスイッチングデバイスには、高電圧、大電流、高速といった非常に厳しい性能が要求されるため、日々の調整が欠かせず短寿命であるにも関わらず、従来より真空管・放電管が広く使用されてきた。しかし近年、半導体デバイスの高耐圧化・高速化に伴い、それらの特性を活かした半導体パルスパワー技術が登場し、加速器における最も重要な要素技術の1つである大電力高周波源の分野でも、電源の半導体化の研究が進んでいる。

Figure 1 に、変調アノード型クライストロン電源の概略図を示す。カソード及び変調アノードに DC-110 kV が印加されており、スイッチを閉じたときにカソード-変調アノード間に生じる電位差によって、電子ビームが引き出される。このような電源では、負荷短絡（クライストロン内部での放電）の際にコンデンサバンクからの短絡電流がクライストロンを流れ、電極を損傷するのを防ぐために、クローバ回路が設けられる。クローバ回路は、短絡による電流の

増加を CT で検出し、水銀を封入した放電管の一種であるイグナイトロンを点弧させ、短絡電流をバイパスする。このように、クローバ回路はクライストロンの保護に欠かせないが、水銀を使用した機器への規制強化により、イグナイトロンに代わるスイッチングデバイスの開発が求められている状況にある。

我々はこれまで、J-PARC LINAC のクライストロン電源への応用を目指し、MOS ゲートサイリスタと呼ばれる半導体素子を用いたクローバスイッチの開発を進めてきた [1-6]。このようなスイッチでは、半導体素子を多数直列にすることで放電管に匹敵する高い定格電圧を得るが、高電圧に浮いた素子に対し、それらのゲート駆動電力を如何に供給するかが重要な開発課題となる。この度、DC かつ 100 kV を超える電位に浮いた素子に対し、半導体素子を実装した基板モジュールに印加された高電圧から自身の駆動電力を得る「自己給電回路」を開発したので、報告する。

2. 半導体クローバスイッチ

半導体クローバスイッチの仕様を Table 1 に示す。1 枚の基板 (Fig. 2) に対し、MOS ゲートサイリスタ (IXYS 社製, MMIX1H60N150V1, 定格電圧 1.5 kV) が 3 直列、16 並列で実装されている。この基板を 10 枚で 1 ユニット (定格 30 kV) とし、それらをさらに 4 ユニット、油タンク中で直列に接続することで、120 kV、40 kAp のスイッチを実現する。現在の開発状況については、本会議の小野礼人氏の発表 (TUP038) を参照されたい。

3. 自己給電回路

高電圧に浮いた基板に対して、地上から電力を供給するためには、一般的に Fig. 3 (左) のように絶縁トランスが用いられる。しかし、電圧が DC かつ数 10 kV を超える場合、一次巻線と二次巻線及びコア間

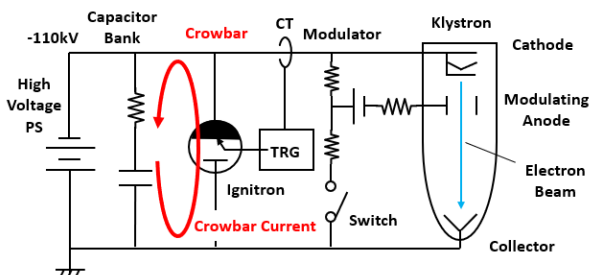


Figure 1: A schematic of a klystron power supply.

* ikoma@myppj.com

の絶縁確保のためにトランスが大型化・大質量化する。一方で、Fig.3 (右) のように、基板自身に印加されている高電圧（我々の場合は 120 kV/40 枚=3 kV）から、降圧比の非常に大きな DC/DC コンバータによって 5 V の電圧を作り、基板自身の駆動電力を得る手法も考えられ、このような手法を「自己給電（又は主回路給電）」と呼ぶ。

我々は、DC/DC コンバータのうち、少ない部品点数で構成できる「フライバックコンバータ」をベースとした自己給電回路を開発した。まず、印加電圧 800 V までは、定電流回路によりフライバックコンバータのゲート駆動回路に給電する (Fig. 4, 青のライン)。そして、800 V を超えると、フライバックコンバータが起動し、そちらからの給電に切り替わると同時に、定電流回路は停止する (Fig. 4, 赤のライン)。

なお、今回の用途では降圧比が 1/600 と大きく、スイッチング周波数は一定で duty を変化させる PWM (Pulse Width Modulation) 制御では、定格電圧付近において duty が小さくなりすぎ、動作が不安定になることが判明したため、パルス幅一定 (4 μ s) で周波数を約 70 kHz \sim 5 kHz まで変化させる PFM (Pulse Frequency Modulation) 制御を採用した。

また、直列スイッチにおいては、ただ給電出来れば良い訳ではなく、各段の分圧を均等に維持しなければならないという要求もある。当初、それぞれの自己給電回路基板内にフィードバック制御回路を設けていたが、各々の基板が自身の基板の出力電圧の

みを最適化するようにバラバラに動作した結果、分圧のアンバランスが生じた。すなわち、あるタイミングにおいて各段の消費電力にバラツキが生じ、消費電力の小さな（高圧電源から見るとインピーダンスの大きな）基板に電圧が集中した。そこで、1 段目の出力電圧のみを監視、地上でフィードバック制御し、全ての段を同じ周波数、タイミングで駆動する「マスタースレーブ制御」を採用した。

開発した自己給電回路基板を Fig. 5 に示す。

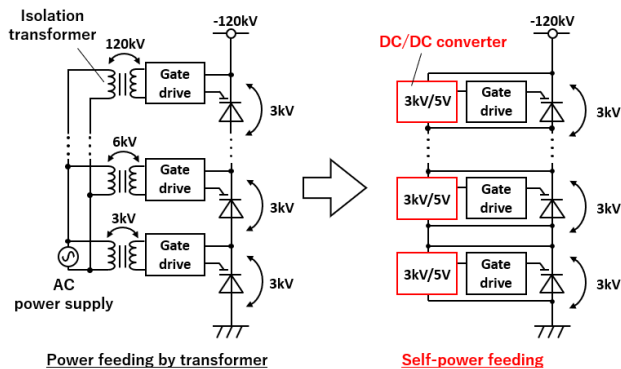


Figure 3: Two types of power feeding method.

Table 1: Requirements for the J-PARC LINAC Crowbar Switch

Voltage	-120 kV
Current	40 kAp
Pulse width	50 μ s
Switching device	MOS-gated-thyristor (IXYS, MMIX1H60N150V1)
Switch configuration	3s16p/board \times 40 boards
Repetition	Single shot

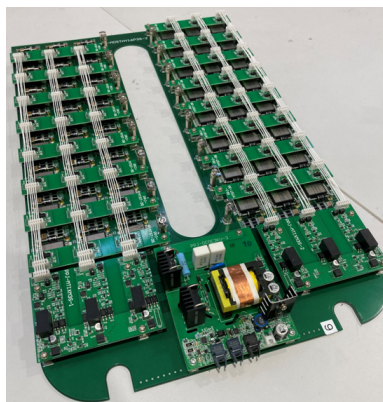


Figure 2: A picture of a semiconductor crowbar switch board.

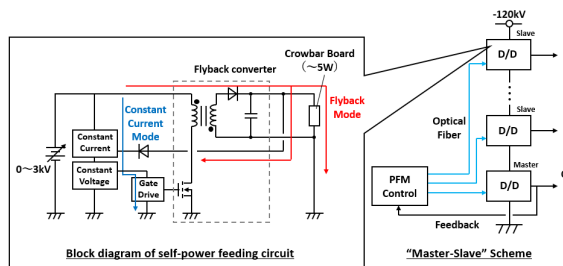


Figure 4: A schematic of a developed power feeding circuit.

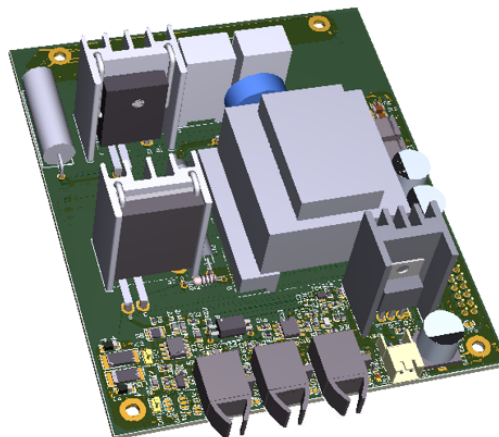


Figure 5: 3D model of a developed self-power feeding board.

4. 評価試験

製作した 10 枚の自己給電回路基板に対し、クローバ基板の消費電力 (5 W) を模擬した 5Ω の抵抗を接続し、最大 3 kV までの電圧を印加し、消費電流を測定した。Figure 6 に示すように、ほぼ同じ V-I 特性が得られていることを確認した。

次に、それらを実際にクローバ基板に搭載し、10 段積み、充電電圧-30 kV での充放電試験を実施した。Figure 7 に試験セットアップを示す。臨界制動の電流波形となるように、コンデンサバンク、リアクトル、抵抗、そして半導体クローバスイッチを直列に接続した。各段にかかる電圧波形、および放電電流を高電圧プローブ、ログスキーコイルでそれぞれ測定した。放電試験の結果を Fig. 8 に示す。分圧を均等に維持しつつ、各基板に給電できており、1 ユニットの定格である -30 kV, 40 kAp でのスイッチングが達成できた。

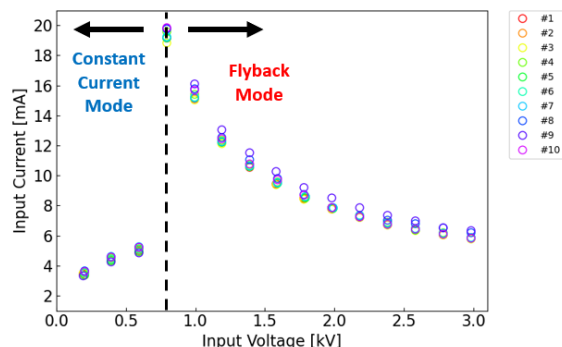


Figure 6: V-I characteristics of self-power feeding boards.

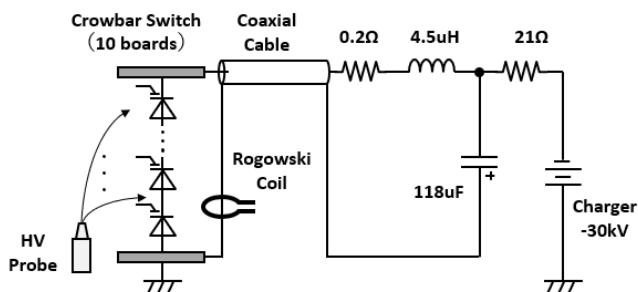
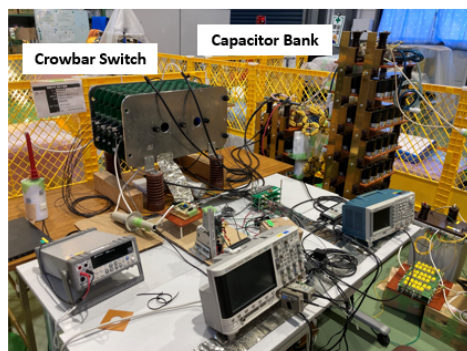


Figure 7: Experimental setup of switching test.

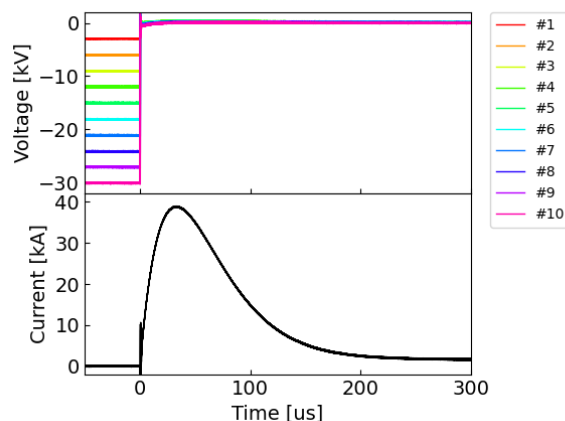


Figure 8: Waveforms of discharge voltage and current.

5. まとめと今後の予定

J-PARC LINAC 向け半導体クローバスイッチ用に、フライバックコンバータをベースとした自己給電回路を開発した。製作した 10 枚の自己給電回路基板に対し、それぞれ単体で電圧-電流特性を測定し、ほぼ同じ特性を有することを確認した。それらを実際にクローバ基板に搭載し、10 段積み、充電電圧-30 kV での充放電試験を実施し、分圧が崩れることなく給電できていることを確認した。本試験により基本的な動作は実証されたので、今後はスケールアップしていき、40 枚で定格-120 kV の動作を目指す。

参考文献

- [1] T. Takayanagi *et al.*, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, THOH02.
- [2] A. Ono *et al.*, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, WEPH038.
- [3] A. Ono *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020, THPP45.
- [4] H. Kamezaki *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020, WEPP39.
- [5] A. Ono *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Aug. 9-12, 2021, THP015.
- [6] H. Kamezaki *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Aug. 9-12, 2021, TUP046.