

IGBT 半導体スイッチモジュールを用いた大電力パルス電源

明本光生¹、陳 栄浩、坂本 裕

高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

クライストロンパルス電源の高信頼化、高効率化及び低価格化の新たな方式としてモジュール化した小電力のパルス電源（半導体スイッチモジュール）を多直列接続して、各モジュール電源のスイッチを直接オン・オフしてパルスを作り、それらを電圧加算合成して大電力パルスを発生する方式のパルス電源を KEK で開発中である。

1. はじめに

JLC 計画の X バンド線形加速器システムに使用されるクライストロン電源はパルス電源の(1)高信頼化(2)高効率化(3)低価格化することが要求されている^[1]。この要求を満たすために半導体スイッチモジュールを使用した新方式のパルス電源を開発している。

本稿では、この方式による JLC 電源及びこの方式による 10 段の IGBT 半導体スイッチモジュールで構成する試作パルス電源の試験結果について報告する。

2. 電源構成と機能

2.1 電源設計

JLC 用クライストロン電源の主な仕様を表 1 に示す。このパルス電源は、現在開発中の 75MW-PPM クライストロン 2 本を運転する^[2]。

表 1：JLC 用クライストロン電源の主な仕様

Parameter	Value
Peak Klystron Voltage	500 kV
Total Peak Current	530 A
Pulse width(flat-top)	1.5 μ s
Pulse Top Flatness	2%
Energy Efficiency(Goal)	70%
Repetition rate	150 Hz

図 1 に現在開発中の JLC 用クライストロン電源の回路構成を示す。この電源はモジュール化した小電力のパルス電源（半導体スイッチモジュール）を多直列接続して、各モジュール電源のスイッチを直接オン・オフしてパルスを作り、それらを電圧加算合成して大電力パルスを発生する方式のパルス電源である。ここでは、パルス発生部が 2 つのユニットに分けて 50 kV、2650 A のパルスをつくり、それぞれ

の 1 次分割型パルストランスの 1 次巻き回路に接続される。それぞれのパルスはこのパルストランスで合成し、また 5 倍に昇圧して要求されたパルスをクライストロンに印加する。各半導体スイッチモジュールはコンバータ・インバータ方式の電源システムで DC 電力が供給される。

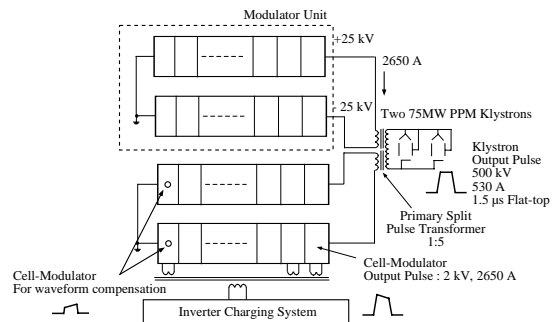


図 1：JLC 用半導体スイッチモジュールを使用したクライストロン電源の回路構成図

2.2 半導体スイッチモジュールと機能

半導体スイッチモジュールは図 2 に示すように半導体スイッチ、蓄積コンデンサ、バイパスダイオードから構成されるダイレクスイッチ方式のパルス電源である。DC 電源はトランス結合で外部から供給される。このモジュールの基本動作は、スイッチが OFF 時ではバイパスダイオードによって、モジュールは全体の出力回路から分離され（図 2(a)参照）、スイッチが ON 時では、モジュールは全体の出力回路に加わりモジュールの持つ電圧・電流が出力回路に加算される（図 2(b)参照）。

この方式は従来のラインタイプ方式の電源に比べて次の特徴がある。

- (1) 半導体スイッチモジュールの出力パルスが小電力のため、モジュール電源が完全に半導体化でき、小型で高い信頼性と効率の良いパルス電源を製作することができる。
- (2) 半導体スイッチモジュールの出力パルスを各々独立して制御することによって、容易に必要なとする平坦なパルス波形を実現することができる。
- (3) 半導体スイッチモジュールが独立分離できる回路なので、一部のモジュールに故障が生じても他の

¹ E-mail: mitsuo.akemoto@kek.jp

モジュールがそれを補うことで全体の機能を維持することが可能となる。

(4) 負荷短絡等の異常時に対し、半導体スイッチを高速に切断することで自己保護のみならず、負荷への流入エネルギーを止めることが出来るため、負荷保護機能に優れている。

(5)モジュール化のため、組み立て及びメンテナンスが容易であり、拡張性にも優れている。また、量産化も可能となるため、実機製作の際はコストダウンが期待できる。

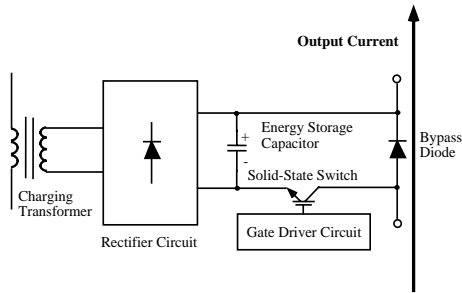


図 2 (a) : スイッチが OFF 時での半導体スイッチモジュールの動作

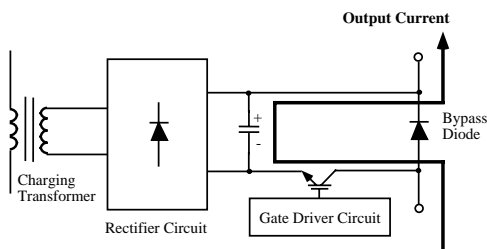


図 2 (b) : スイッチが ON 時での半導体スイッチモジュールの動作

3. 試験パルス電源

3.1 試験回路

図 3 に試験パルス電源の回路構成図を示す。IGBT 半導体スイッチモジュールを 10 段直列接続し、各段には多出力トランスで DC 電力を供給される。また多出力トランスの出力電圧は電圧調節器で調整される。負荷は抵抗負荷で、それに流れる電流は CT で測定される。図 4 に試験パルス電源の全体の写真を示す。

図 5 に IGBT 半導体スイッチモジュールを示す。モジュールの回路は IGBT スイッチ、蓄積コンデンサー、バイパスダイオードから構成される。回路部品はすべて汎用品を用いた。IGBT は三菱電機製 CM 1200-66H (定格 3300V、1200A 品) を使用した。これを駆動するトリガークロックスは光入力トリガークロックスをおこない、またこの回路にはトランス

経由で DC 電源が供給される。蓄積コンデンサーは 500V、1 μ F のコンデンサを 6 直列 104 並列で構成して、3 kV、17.3 μ F にしている。この容量は出力パルス波形が約 10% サグで収まるよう決めた。バイパスダイオードは 600V 高速ダイオードを 6 直列 20 並列で構成されている。

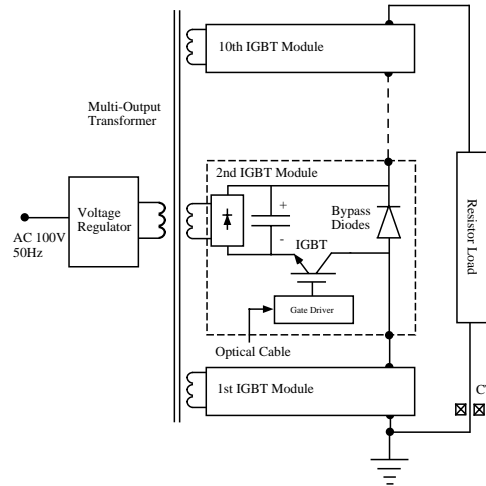


図 3 : IGBT モジュール 10 段の試験パルス電源の回路構成図

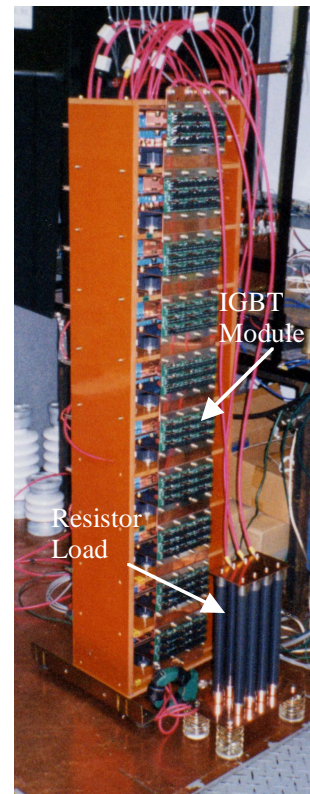


図 4 : IGBT モジュール 10 段の試験パルス電源の全体

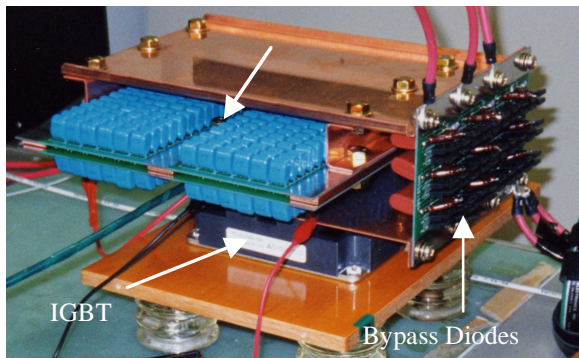


図5：IGBT 半導体スイッチモジュール

3.2 パルス出力波形

図6に出力電流波形の例を示す。この時、負荷抵抗は 5.2Ω で 17 kV (各段 1.7 kV) 充電電圧で運転した。要求される出力電流値以上の 2.89 kA のパルスを発生させることができることが確認できた。

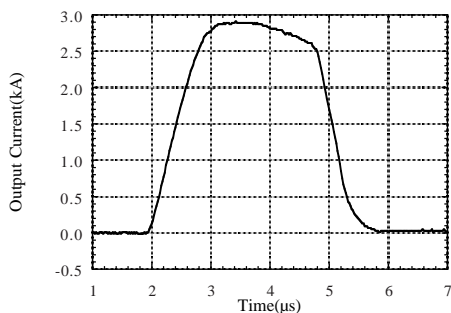


図6：試験パルス電源の出力電流波形

3.3 パルス出力波形の制御^[3]

試験パルス電源で、このシステムの最大の特徴である各段のトリガーを制御することによるパルス出力波形制御（補償）の実験を行った。ここでは、2段を波形補償用に他の8段をパルス発生用に用いた。負荷抵抗は 4.1Ω で 10 kV (各段 1.0 kV) 充電電圧で実施した。図7に補償時での各段のトリガーの時間系列を示す。

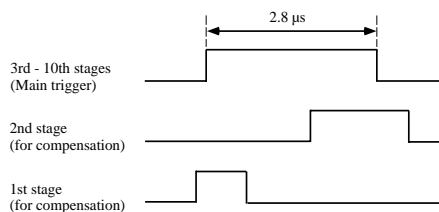


図7：各段のトリガーの時間系列

図8にこの時のパルス出力波形を補償した時としな時の出力電流波形の比較を示す。補償しない場合、フラットトップ部が垂れ下がったパルス出力波形で

あるが、補償後はこの部分がかさ上げされ平坦部を作ることが可能であることがわかる。この結果が示すように、波形補償用モジュールの段数を増やせば、また各段の出力電圧をさらに個別制御することによって広い平坦部と平坦度の高いパルス波形を整形できる。この方法によって波形効率（パルス出力波形に含まれる平坦部の割合）を上げることが可能で、パルス電源全体の高効率化につなげることができる。

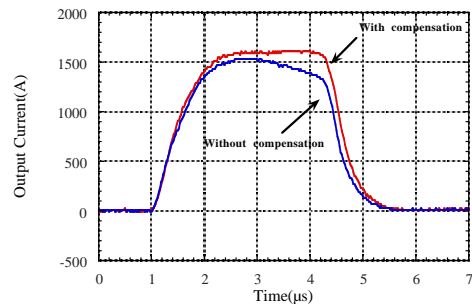


図8：パルス出力波形を補償した時としな時の出力電流波形の比較

4. 今後の予定

試験パルス電源を使用して、IGBT 半導体スイッチモジュールの負荷短絡時での回路保護システムの開発並びに1次分割型パルストランスと組み合わせたパルス出力特性の実験を予定している。また2002年までに2本の 75 MW-PPM クライストロンを 100 Hz で運転できるこの方式の原型パルス電源の開発も進めている

5. まとめ

JLC クライストロン用に IGBT 半導体スイッチモジュールを使用した新しいパルス電源の開発を行った。この方式のパルス電源を試作し、基本的な動作、特性を実験しその性能を確認した。

謝辞

この電源の技術開発には、三菱電機（株）先端技術総合研究所の方々の御協力を得ました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 峠 暢一, “JLC 計画のための X バンド線形加速器システムの開発状況”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug.1-3, 2001.
- [2] S. Matsumoto, “Design and Performance of the First KEK-Toshiba PPM-Focused X-band Pulse Klystron”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug.1-3, 2001.
- [3] M. Akemoto et al., “Improvement of Waveform Efficiency Using a Compensation Circuit,” Proc. of LINAC 2000, Monterey, California, USA(2000)769.