PASJ2023 WEP16

# 半導体を使用した MARX 方式クライストロン電源の開発

## DEVELOPMENT OF MARX-TYPE KLYSTRON POWER SOURCE USING SEMICONDUCTORS

中山響介<sup>#</sup>, 徳地明 Kyosuke Nakayama <sup>#</sup>, Akira Tokuchi Pulsed Power Japan Lab. Ltd. (PPJ)

#### Abstract

A MARX-type solid-state klystron modulator has been developed. The specifications are an output voltage of 145 kV, an output current of 120 A, a pulse width of 10 microseconds and a repetition rate of 200 Hz. An 8-stages solid state MARX circuit using SiC-MOS FETs generates a high voltage pulse of 10 kV, which is stepped up to 145 kV by a pulse transformer. The details of this power supply are reported.

## 1. 導入

近年、パワー半導体の目覚ましい発展により、加速器 関係の設備を始めとした多くの用途に半導体が使われ 始めている。しかしながら、半導体を使用した装置の普 及率はまだまだ低迷しており、高電圧パルス電源や高電 圧・大電流スイッチデバイスには未だにパルスフォーミン グネットワーク(PFN)や真空管などといった古典的な技術 が使われ続けている。

ところで、現代の大型加速器にとってクライストロンは 欠かせない存在となっている。クライストロンとは、荷電粒 子を加速させるための大電力マイクロ波を発生する真空 管の一種である。パルス型クライストロンのエネルギ源と なる高電圧パルス発生回路は、主に充電器, PFN,サイ ラトロン、トランスで構成される(Fig. 1a)。一般的に、PFN とサイラトロンで数+kVのパルスを作り、トランスで数 kV オーダまで昇圧してクライストロンに印加する。ここではこ の回路をクライストロンモジュレータと呼ぶ。

本開発は、その内の PFN およびサイラトロンを半導体 MARX 回路に置き換える目的で進められた(Fig. 1b)。こ れには数多くのメリットが存在し、小型化、長寿命化(維持コスト低下)、高繰り返し化だけでなく、波形制御性の 向上が期待できる。

順を追って説明する。PFN は多数の大きく重いコンデ ンサとコイルで構成されており、絶縁距離確保のために 空間充填率が悪い。さらに、サイラトロンは別途付帯電 源が必要になる。また、サイラトロンはスイッチング可能な 回数が少なく(寿命が短く)ジッタが大きいにも関わらず、 入手性が悪く高価である。数百 Hz 以上の高繰り返し動 作にも向かない。それに対して、半導体 MARX 回路は 比較的小さいコンデンサと基板の積み重ねで構成され、 部品の集約度も高い。また、半導体を使用することで半 永久的に使用でき、高繰り返し化にも対応できる。加え て、FET や IGBT などの自己消弧可能な素子を使用す れば、パルス平坦部のドループ補償[1]や任意の波形の 生成[2]、ショット毎の電圧可変[3]も可能となることが実証 されている。

## 2. MARX 回路の動作原理

使用した MARX 回路を Fig. 2 に示す。回路は主にメ インコンデンサ、充電 FET、放電 FET から成る基板を複 数段積み重ねて構成される。まずは充電 FET を ON し、 全段のメインコンデンサを並列接続して充電する。次に 放電 FET を ON し、全段のコンデンサを直列に繋ぎ変え て放電する。これにより充電器の出力電圧\*段数の電圧 を持ったパルスを出力することが可能となる。

MARX 回路はその原理からも分かるように非常にシン プルで高い拡張性を持っている。充電器の電圧は比較 的低くて良く、市販の電源で済むため経済性に優れる。

## 3. 設計仕様

設計仕様値を Table 1 に示す。充電器は市販 の-1300 V 電源を負極性で使用し、MARX を 8 段に設 定することでトランスー次側の出力を-10 kV とした。それ を昇圧比 1:15 のトランスに印加し、クライストロン電圧の 目標値である-145 kV を作る。その立上り時間は 2  $\mu$ s 以 下とした。クライストロン電流は 120 A で、これとトランスの 昇圧比から MARX の定格電流値は 1800 A となった。パ ルス幅は最大 10  $\mu$ s、繰り返し周波数は 200 Hz とした。 充電器の台数は最大 13 台まで増やすことができ、 400 Hz 超までアップグレード可能である。以上から、出 力可能な最大平均電力は 72 kW となるが、実際はクライ ストロンの定格に制限されることに注意されたい。

## 4. 外観, 内観

#### 4.1 外観

外観の写真を Fig. 3 に示す。モジュレータは制御ラック、高圧ステーション、油タンクで構成される。高圧ステーションは充電器と MARX を搭載し、油タンクはトランスを内蔵する。制御ラックは高圧ステーションと光ファイバのみで接続され、電気的に絶縁した状態で操作指示を出すことができる。高圧ステーションはシールドルームになっており、外部からのノイズの影響を受けないようになっている。これにより PLC を始めとした制御系が故障するリスクを減らすことが可能となる。油タンクはクライストロンを上から差し込む構造になっている。

<sup>&</sup>lt;sup>#</sup> nakayama@myppj.com

#### Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 29 - September 1, 2023, Funabashi

### PASJ2023 WEP16



Figure 1: Comparison of circuit. From top, (a) Conventional. (b) Developed.



Figure 2: Semiconductor MARX circuit. From left, (a) Basic circuit. (b) Waveforms of gate signals and output.

Item	Target value
Charging voltage	-1300 V
Number of stages	8
Primary (Pri.) voltage & current	-10 kV, 1800 A
Secondary (Sec.) voltage & current	-145 kV, 120 A
Rising time	Less than 2 µs
Pulse width	10 µs (Max.)
Repetition rate	200 Hz (400 Hz upgrade available)

Table 1: Modulator Specifications

#### 4.2 内観

Average power

次に各部の内観の写真を Fig. 4 に示す。Figure 4a は 高圧ステーション内部の充電器と制御盤の様子である。 搭載する充電器は、現在は5 台のみだが最大13 台まで 拡張可能とした。これにより 400 Hz 超の出力を実現可能 となる。写真の制御盤は内部に PLC を搭載しており、制 御ラックに搭載された別の制御盤内の PLC と光ファイバ で接続され、操作信号やインターロック信号をやり取りす る。次に、Fig. 4b に MARX ユニットの様子を示す。見た 通り 8 段構成であることが分かり、トランスー次側までの 経路をすべて幅広の銅板とすることで可能な限りの低イ

36 kW (72 kW when 400 Hz)



Figure 3: Exterior of modulator. From left, Control rack, High voltage stand(HVS), Oil tank.



Figure 4: Interior. From left, (a) Charger and control unit. (b) MARX stack. (c) Klystron socket in Oil tank.



Figure 5: MARX Print-circuit board.

ンダクタンスを実現している。最後に、Fig. 4c に油タンクの内部を示す。クライストロンの接続方式はソケット式を 採用した。図に赤丸で示した部分がばねになっており、 クライストロンを上から挿入するだけで接続が完了する。

### 5. MARX 基板

MARX 基板は 1 枚のプリント基板で実現させた (Fig. 5)。使用した半導体は耐圧 1.7kV の SiC-MOSFET だ。基板の定格電圧は、充電電圧と同じ 1300 V, 定格 電流は 1800 A,10 µs だ。放電 FET は 16 並列で使用し、 すべての素子に個別でヒートシンクを取り付けた。冷却 方式は空冷とした。SiC の損失の少なさがこれを可能に している。 PASJ2023 WEP16



Figure 6: Output waveforms From top, (a) without transformer. Red and yellow show MARX-output voltage and current respectively. (b) with transformer. Red, yellow and blue show sec. voltage, pri. current and sec. current respectively.



Figure 7: Ripple removal. From top, (a) Before countermeasure. Pri. current (Yellow) has ripple that exceed the target rating. (b) After. Pri. current(Green) does not have the ripple.

## 6. 出力波形

6.1 MARX ユニット単体 まず、トランスを接続せずに MARX ユニットから直接 抵抗負荷に出力した時の波形を Fig. 6a に示す。なお、ト ランスは未使用だが回路上の位置づけが分かりやすい ように「1 次側」という表現を使用している。充電電圧 1250 V で MARX が 8 段のため原理通り約 10 kVp のパ ルスを得ることが出来た。抵抗負荷は約 5.6 Ω だから出 力電流は 1800 Ap で、MARX ユニット単体で仕様を満 たすことが確認できた。パルス幅は 10 μs としている。

#### 6.2 MARX ユニット+トランス

二つ目に、トランスを介してパルスを出力した波形を Fig. 6b に示す。抵抗負荷 1250 Ω として、二次電圧、一 次電流、二次電流はそれぞれの目標値を達成した。

#### 6.3 リプルの除去

三つ目に、MARX1 段でのリプルを取り除いた波形を Fig.7 に示す。Figure 7a の波形では複数のコンデンサ間 で共振が発生しており、リプルが仕様を満たしていな かった。それらのコンデンサを選定し直すことでパルス平 坦度は目標仕様を満たした(Fig. 7b)。8 段での試験は後 日行う予定である。

### 7. 結論

今回、我々は半導体を用いたクライストロンモジュレー タの開発に着手した。現在は単発動作の試験で所望の 仕様値を満たすことを確認するところまで進んでいる。

今後の展望とて、まずは連続運転を行うことが最優先 と考えている。実用化に向けて、各発熱部の温度が定格 内かどうか、また、半導体特有の問題が起こらないかを 確認することが急務である。さらには、長年使用されてき た従来技術の装置を半導体化するに当たって、最も問 題になるのが信頼性である。特に加速器関連装置では 365日24時間の中で一度でも不具合が発生してしまうと 大きな機会損失が発生してしまう。これを確保するため にも、我々は負荷短絡試験を始めとした各単一故障へ の対策を十分に行っていかなければならない。

## 参考文献

- T. Takayanagi, A. Ono, "LTD SEMICONDUCTOR SWITCH POWER SUPPLY FOR J-PARC KICKER", Proc. PASJ2021, Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp. 53-57.
- [2] J. Weihua *et al.*, "2. Pulsed Power Generation and Application Based on Pulse Adding of Linear Transformer Driver", J. Plasma Fusion Res. Vol.94, No.4 2018, pp. 192-196.
- [3] K. Nakayama, A. Tokuchi, "Development of a Highrepetition, High-voltage and Bipolar MARX Generator", EAPPC & BEAMS 2022 PROCEEDINGS, Sept. 2022, pp. 294-297.