

半導体 MARX 型パルス電源における出力電圧オーバーシュート抑制方法の検討

SUPPRESSION OF OUTPUT VOLTAGE OVERSHOOT ON SOLID-STATE MARX-TYPE PULSED POWER SUPPLIES

生駒直弥^{*,A)}, 徳地明^{A)}

Naoya Ikoma^{*,A)}, Akira Tokuchi^{A)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

Abstract

Recently, there has been progress in the development of high-voltage pulsed power generators for accelerators with solid-state switches. Solid-state MARX circuits, in particular, offer waveform control and can be used for long pulse widths due to the absence of magnetic cores. For the accelerator applications, overshoot of the output voltage can often be a problem. In this study, we demonstrated overshoot suppression by waveform control and compared the effects of three trigger patterns.

1. はじめに

加速器においては、荷電粒子の発生、加速、偏向といった様々な面で高電圧パルス電源が使用されている。従来の加速器用高電圧パルス電源では、扱う電圧、電流が非常に大きいため、スイッチングデバイスとして、放電管の一種であるサイラトロンが用いられてきたが、近年は SiC-MOSFET をはじめとするパワー半導体を用いた方式の開発が進んでいる。

半導体パルス電源にはいくつかの方式があるが、中でも半導体 MARX 回路は、

- 磁性体コアを用いないため、コアの飽和によるパルス幅の制約が無い。
- 波形制御が可能。

という優れた特徴を有しており、我々はこれまで半導体 MARX 回路を採用した電子銃、クライストロン、マグネトロン電源を開発してきた [1]。

加速器用パルス電源では、負荷短絡時の電源保護のための直列リアクトルと、浮遊容量との LC 共振により、出力電圧にオーバーシュートが発生することがある。そこで今回、8 段の半導体 MARX 回路を試作し、波形制御機能によるオーバーシュート抑制方法について実験的に検討したので報告する。

2. 半導体 MARX 回路

MARX 回路そのものは、1924 年に Erwin Marx によって発明された古くからある回路で、複数のコンデンサを並列に充電し、それらをスイッチで直列に繋ぎ変えることにより、充電電圧 × 直列数のパルス電圧を発生する昇圧機能を持った回路である。古典的な MARX 回路では、スイッチングデバイスとしてギャップスイッチが使用されており、全段を同時に出力することしかできない (Fig. 1)。

しかし、ギャップスイッチと抵抗をそれぞれ MOSFET とダイオードで置き換えて半導体 MARX 回路とし、多チャンネルトリガ発生器と組み合わせることで、各段を独立に出力することができる (Fig. 2)。

出力していない段は、ダイオードを通してバイパスされるため、各段の出力タイミングがずれても故障し

ないどころか、むしろ積極的に出力タイミングをずらし、柔軟な波形制御を行うことができる。

波形制御の例として、充電電圧 -3 kV、8 段の MARX 回路で三角波を作った場合の、トリガ波形と出力電圧波形を Fig. 3、4 にそれぞれ示す。

3. オーバーシュートの発生

加速器用パルス電源では、負荷短絡時に電流の急激な増加を遅らせ、電源を保護するため、電源と直列にリアクトルを挿入する場合がある。一方、負荷には出力ケーブル等に起因する浮遊容量が並列に入っており (Fig. 5)、これらの LC 共振によって出力電圧にオーバーシュートが生じることがある。

オーバーシュートが発生すると、負荷に定格を超える電圧が印加されるおそれがあるため、従来は、リアクトルと並列に抵抗を取り付けることで、損失と引き換

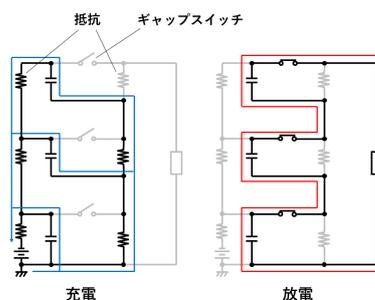


Figure 1: Operating modes of classic MARX.

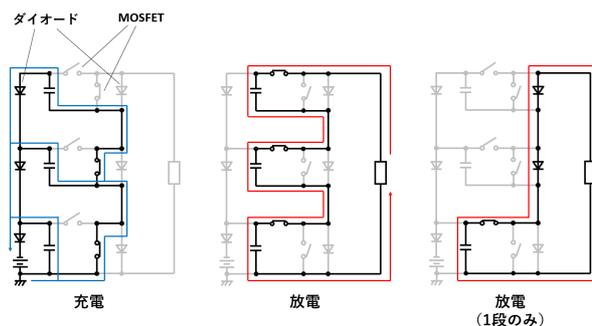


Figure 2: Operating modes of solid-state MARX.

* ikoma@myppj.com

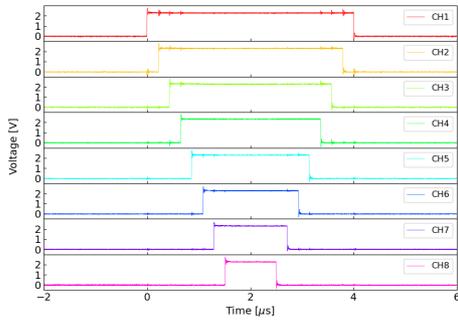


Figure 3: Trigger waveforms.

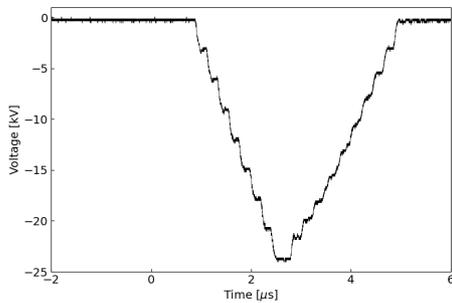


Figure 4: Output voltage of 8-layer MARX.

えにオーバーシュートを抑制する方法が取られていた。そこで今回、我々は、半導体 MARX 回路の特徴である波形制御機能によって、オーバーシュートを抑制する方法について実験的に検討した。

4. 波形制御によるオーバーシュート抑制の検討

Figure 6 のように、8 段の半導体 MARX 回路を構築し、8 ch のトリガ発生器（エルモス、AWG-100）で生成したトリガ信号を各段に入力した。充電電圧 -3 kV 、負荷抵抗 $1\text{ k}\Omega$ とし、意図的にオーバーシュートを発生させるために、半導体 MARX 回路の出力に $100\text{ }\mu\text{H}$ のリアクトルを、負荷抵抗と並列に 100 pF のコンデンサをそれぞれを取り付けた。

トリガ信号の全幅は $4\text{ }\mu\text{s}$ とし、その中で以下の 3 通りのトリガパターンを試した。

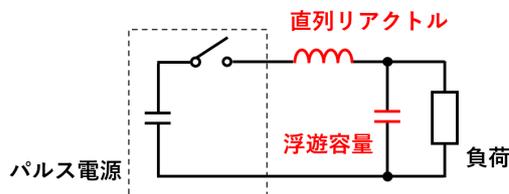


Figure 5: A cause of output voltage overshoot.

1. 7 段は同時出力、1 段のみ $0\text{--}500\text{ ns}$ まで遅延をかけて出力。
2. 6 段は同時出力、2 段のみ $0\text{--}500\text{ ns}$ まで遅延をかけて出力。
3. 各段を $0\text{--}300\text{ ns}$ ずつ、階段状に遅延をかけて出力。

出力電圧波形の測定結果を Fig. 7 に示す。まず、波形制御を行わない場合（遅延 0 ns ）、平坦部に対して約 16.0% のオーバーシュートが生じている。パターン 1、すなわち、7 段を同時出力し、オーバーシュートが発生している期間を避けて、遅れて 1 段を出力した場合、最も矩形波に近い波形は遅延 350 ns の場合であり、このときオーバーシュートは約 3.1% となった。それ以上の遅延では逆に波形に窪みが生じた。パターン 2（2 段だけ遅れて出力）の場合、同じく遅延 350 ns でオー

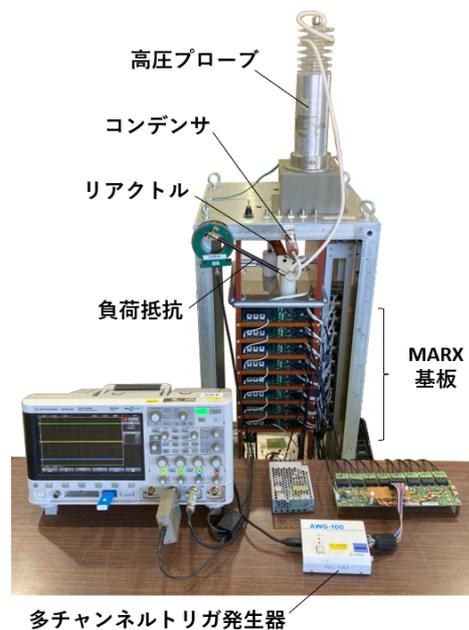


Figure 6: Experimental setup.

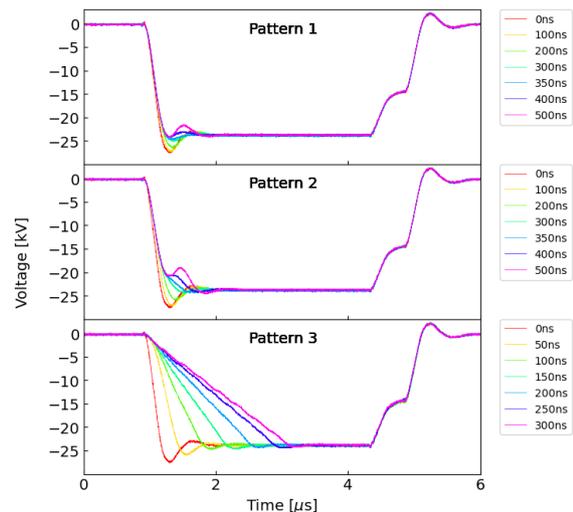


Figure 7: Experimental results.

バーシュートはより小さく約 2.0% となるが、平坦部は逆に減少した。階段状に出力して立上りを疑似的に鈍らせるパターン 3 の場合、平坦部が約 1.9 μs となる遅延 100 ns のときでも、オーバーシュートは約 4.3% に留まった。以上の結果を Table 1 にまとめる。

Table 1: Summary

	Delay [ns]	Overshoot [%]	Flat-top [μs]
Pattern 1	350	3.1	2.5
Pattern 2	350	2.0	2.2
Pattern 3	100	4.3	1.9

5. まとめ

半導体 MARX 型パルス電源において、波形制御による出力電圧オーバーシュートの抑制を実証するととも

に、トリガパターンによる抑制効果を比較した。3通りのトリガパターンを試したところ、オーバーシュートが発生している期間のみ 1 段または 2 段休ませた場合が、階段状に出力するよりも、平坦部を残しつつオーバーシュートを抑制できた。今後は、回路シミュレーションも併用し引き続きトリガパターンの最適化を行うとともに、オーバーシュート抑制の理論的な限界についても考察する。

参考文献

- [1] N. Ikoma and A. Tokuchi, "Systematic study of high-voltage pulsed power supplies for accelerators using solid-state switches", Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 142-146.