

チョツパ型 MARX 電源の特性改善

IMPROVEMENT OF CHOPPER-TYPE MARX MODULATOR CHARACTERISTICS

佐々木尋章^{#,A)}, 江偉華^{A)}, 須貝太一^{A)}, 徳地明^{A,B)}, 澤村陽^{B)}, 明本光生^{C)}, 中島啓光^{C)}, 川村真人^{C)}
Hirofumi Sasaki^{#,A)}, Weihua Jiang^{A)}, Taichi Sugai^{A)}, Akira Tokuchi^{B)}, You Sawamura^{B)},
Mitsuo Akemoto^{C)}, Hiromitsu Nakajima^{C)}, Masato Kawamura^{C)}

^{A)} Nagaoka University of Technology

^{B)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

^{C)} KEK

Abstract

In the International Linear Collider, 10 MW multi-beam klystron will be used as a microwave source. For multi-beam klystron power supplies, long pulse power supplies with specifications of -120 kV ($\pm 0.5\%$), 140 A, 1.65 ms, 5 pps are required. Therefore, the chopper-type MARX modulator that combines a MARX circuit with a step-down chopper circuit has been proposed. In this paper, we report the results of improving the characteristics of chopper-type MARX modulator.

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) では、マイクロ波源として 10 MW のマルチビームクライストロンが使用される予定である。マルチビームクライストロンの電源には Table 1 に示されるように、一般的な高電圧パルス電源と比較して、高精度で長パルス電源が要求されている。加えて、電源の高信頼性、高効率、小型、低コストが求められる。コンデンサだけを用いた MARX 電源や、パルスランスでこの仕様を実現しようとする、電源の大型化が避けられない。そこで MARX 回路に降圧チョツパ回路を組み合わせた、チョツパ型 MARX 電源が提案されている。1 段-2 kV 充電、-1.6 kV 出力の MARX セルを 4 段重畳して 1 ユニットとし、1 ユニットあたり-6.4 kV の出力を得る。このユニットを 20 個重畳することで-120 kV を達成する。試作したチョツパ型 Marx 電源について、出力特性を改善した結果について報告する。

Table 1: Specification of Pulsed Power Supply[1]

Output Voltage	-120 kV
Output Pulse Flat-top	$< \pm 0.5\%$
Output Current	140 A
Pulse Width (flat-top)	1.65 ms
Pulse Repetition Frequency	5 Hz
Rise time and Fall time	< 0.1 ms
Energy deposited into klystron during a gun spark	< 20 J

2. チョツパ型 MARX 電源

2.1 主回路

チョツパ型 MARX 電源の 1 ユニットの回路を Figure 1 に示す。各 MARX セルのコンデンサ C_M は、充電用の SW_C を ON することにより、並列に充電される。放電には SW_D を PWM 制御することで、MARX セルのコンデンサ C_M 電圧の段数倍とデューティー比によって出力電圧が決定される。このため、放電中に減少する C_M 電圧をデューティー比の変化によって補償することができる。また、MARX 各段の位相をずらして電圧を重畳させることで、降圧チョツパで発生するリップルを減少させることができる。

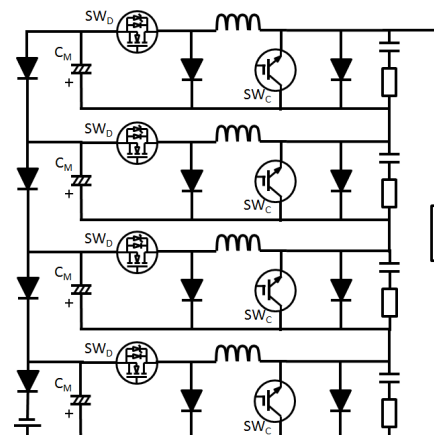


Figure 1: Simplified circuit schematic of chopper-type Marx modulator.

Figure 2 に実際のチョツパ型 MARX 電源の写真を示す。縦 4 ユニット、横 5 ユニットの合計 20 ユニットで全体のシステムとなる。

[#] Hirofumi_Sasaki@stn.nagaokaut.ac.jp



Figure 2: Photograph of the Chopper-type Marx modulator.

2.2 充電系統

チョッパ型 MARX 電源の充電は、1 ユニットごとに 1 個の高周波トランスで行っている。現状では、Figure 3 に示すように、縦列 4 ユニット分の高周波トランスを 1 つのインバータで駆動し、充電を行っている。しかし、1 個の高周波トランスにつき、1 個のインバータで駆動する設計であるため、最終的にはインバータの増設を行う予定である。

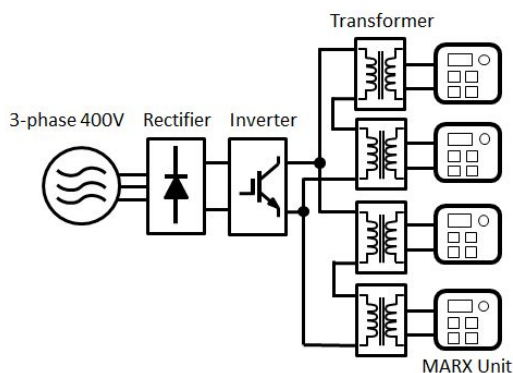


Figure 3: Charging system diagram.

3. 電源評価試験

3.1 各ユニット間の位相制御

位相制御について、理想条件では MARX 80 段の 1 段ごとに PWM 周期の $1/80$ ずつ位相をずらすことで、出力電圧のリプル率は最小になる。そのため、MARX 各段の位相制御には、ユニット内の 4 セルで PWM 周期 $20 \mu\text{s}$ の $1/4$ である $5 \mu\text{s}$ ずらす制御の設定を行う。また、各ユニット間の位相は PWM 周期の $1/80$ である $0.25 \mu\text{s}$ ずらし、全 80 セルが $1/80$ ずつ位相がずれる設定を行う。これを示したのが、Figure 4 (a) で、矢印は $0.25 \mu\text{s}$ 位相がずれていることを表している。しかし、現状の充電系統では高周波トランスの巻線間容量による結合の影響が大きいので、各ユニット間の位相制御の改善を行った。浮遊容量の結合が強い、同じインバータを用いている MARX4 ユニートを 1 グループとし、グループ内では同じ位相で動作を行わせる。これは、ユニット内の 4 セルは理想条件と同様に $5 \mu\text{s}$ ずらしているが、各グループの間の

位相は、PWM 周期の $1/20$ である $1 \mu\text{s}$ ずらす制御である。これを Figure 4 (b) 示す。矢印は $1 \mu\text{s}$ 位相がずれていることを表している。

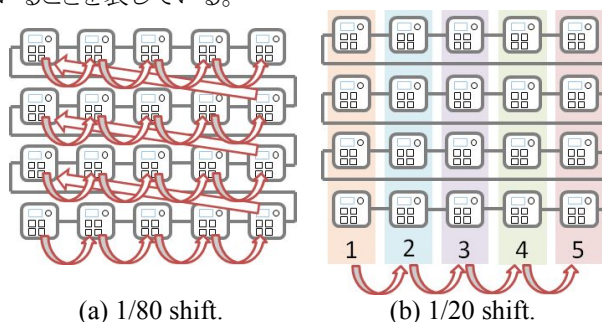


Figure 4: Diagram of phase shift.

実際に位相の制御が異なる 2 条件で出力電圧を測定した結果を示す。条件は、充電電圧 72 V 、デューティ比 $80\% \sim 97\%$ 、負荷をダミー抵抗 800Ω とした。 $1/80$ 位相をずらした時の出力電圧は Figure 5 に示され、リプル率は $\pm 2.9\%$ である。一方で、同じインバータを用いて充電している 4 ユニートを同じ位相で動かした時の出力電圧は Figure 6 に示される。リプル率は $\pm 0.7\%$ となり、理想条件ではリプルが最小になる位相制御よりリプル率が改善することを確認した。

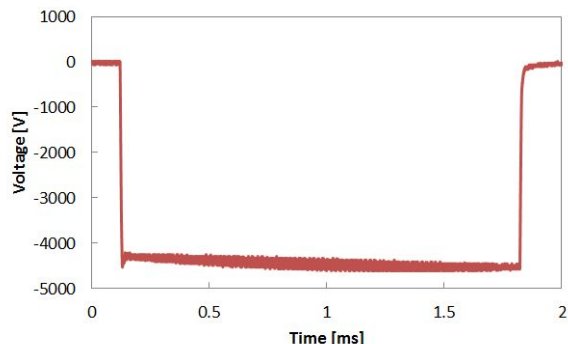


Figure 5: Output voltage at 1/80 shift.

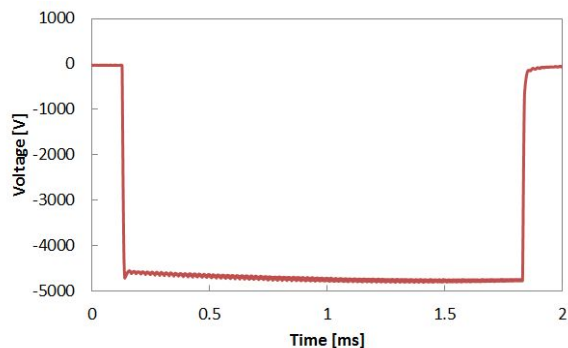


Figure 6: Output voltage at 1/20 shift.

3.2 クライストロン試験

3.1 で述べたように、各ユニット間の位相制御の調整を行い、各ユニット間の出力に 40Ω と 375 nF の RC スナバをつけた状態でクライストロン負荷での試験を行った。クライストロンには Thales の 5 MW クライストロン TH2104

を使用した。充電電圧-1.2 kV、デューティー比 86 %～97 %とした時の出力波形を Figure 7 に示す。出力電圧-82.0 kV、リップル率±0.2 %、出力電流-46.5 A を確認した。しかし、現状のデューティー比の変化では、波形の立ち下がり時にアンダーシュートが発生し、クライストロンに過電圧が印加されてしまうため、ソフトスタートの導入が必要である。

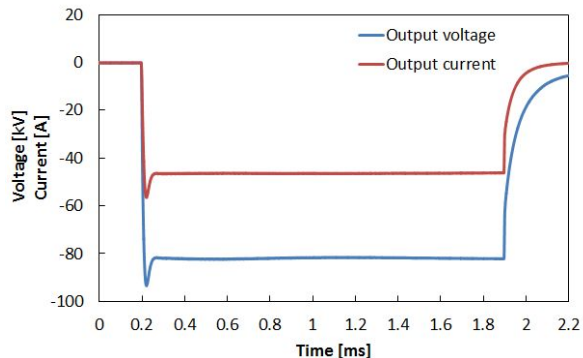


Figure 7: Measured modulator output waveform.

3.3 ソフトスタート試験

出力電圧の立ち下がり時の過電圧を抑制するために、スタート時にデューティー比を徐々に上げるソフトスタート制御を 1 ユニットで試験した。充電電圧-1 kV、デューティー比 80 %～97 %、負荷をダミー抵抗 44 Ω とした時の波形を Figure 8 に示す。一方で、スタート時の PWM5 周期分、デューティー比を徐々に上げた時の波形を Figure 9 に示す。ソフトスタートで出力電圧の過電圧発生を抑制できることを確認した。

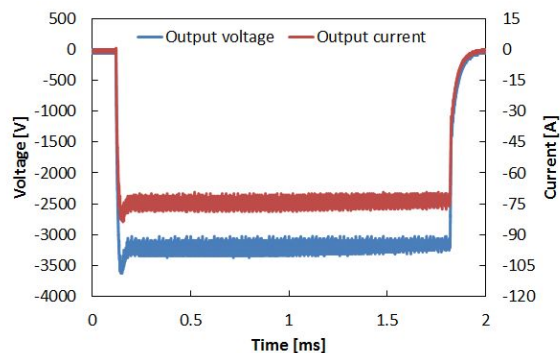


Figure 8: Without soft start control.

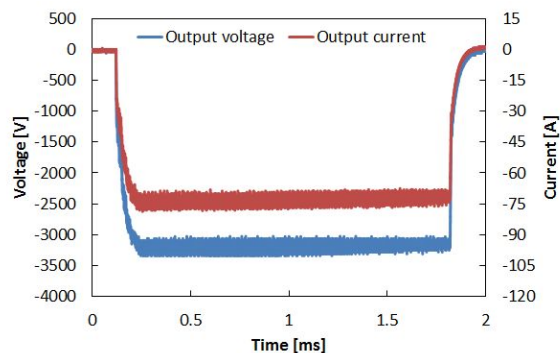


Figure 9: Soft start control.

4. まとめ

ILC で使用される予定である 10 MW マルチビームクライストロン用電源として、チョッパ型 MARX 電源の試験を行った。各ユニット間の位相シフトの調整を行い、20 ユニットで負荷にクライストロンを用いた時の出力特性を確認した。また、1 ユニットでのソフトスタートの効果も確認した。今後、20 ユニットでのソフトスタートの導入を行い、出力電圧-120 kV、出力電流 140 A、繰り返し周波数 5 Hz の運転を目指していく予定である。

謝辞

本研究は高エネルギー加速器研究機構[2][3]の共同開発研究の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report Volume 3 – Accelerator, 2013, <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>.
- [2] M. Akemoto *et al.*, “KEK における ILC クライストロン電源開発の現状”, in Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017, paper TUOL07.
- [3] Y. Sawamura *et al.*, “3.3kVSiC による ILC 用チョッパ型 MARX 電源の高耐圧化”, in Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017, paper TUP052.