

ILC 用 MARX 電源の最適化

OPTIMIZATION OF THE MARX GENERATOR FOR THE INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER

鈴木 隆太郎^{#,A)}, 林 拓実^{A)}, 佐々木 尋章^{A)}, 江 偉華^{A)}, 徳地 明^{B)}, 澤村 陽^{B)}, 明本 光生^{C)}, 中島 啓光^{C)}, 川村 真人^{C)}

Ryutaro Suzuki^{#,A)}, Takumi Hayashi^{A)}, Hirofumi Sasaki^{A)}, Jiang Weihua^{A)}, Akira Tokuchi^{B)}, You Sawamura^{B)}, Mithuo Akemoto^{C)}, Hiromitsu Nakajima^{C)}, Masato Kawamura^{C)}

^{A)} Nagaoka University of Technology

^{B)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

A high power, long pulse modulator aimed at application to International Linear Collider (ILC) is being developed. The target parameters are: 120 kV ($\pm 0.5\%$), 140 A, 1.7 ms, and 5 pps, with consideration on compactness, reliability, and cost control. A solid state, chopper controlled pulsed power generator using Marx-topology has been proposed.

1. はじめに

現在、世界最大規模の加速器である International Linear Collider (ILC) 計画が、世界中の研究者によって推進されている。ILC 計画は全長 31km、電子-陽電子衝突型のレプトン型直線加速器であり、500GeV で衝突させる大型の実験装置である。この ILC は地下 100m にトンネルを建設し、そこに設置される予定である。荷電粒子の加速には 10MW マルチビームクライストロンが使用される。このマルチビームクライストロンは、主加速器用に 380 台が使用され、それらを駆動するパルス電源も同数使用される。このクライストロンに要求されるスペックを表 1 に示す。また、パルス電源には高信頼性、小型化、軽量化、低コスト化が求められる。表 1 の要求スペックは一般的な高電圧パルス電源と比較して、高精度で長パルスの電源となる。我々はこの要求を満たすために Marx 回路を用いたパルス電源を提案している。本研究では、試作した Marx 電源についての試験結果について報告する。

Table 1: Request Specs of Klystron^[1]

Output Voltage	-120 kV
Current	140 A
Flat top part	1.7 ms
Repetition rate	5 pps
Ripple rate	< $\pm 0.5\%$
Rise time and Fall time	<0.1 ms

2. 回路構成

Marx 電源には、半導体スイッチングデバイスが用いられる。さらに、チョップ回路と Marx 回路を組み合わせ、

[#] r_suzuki@etigo.nagaokaut.ac.jp

PWM 制御と位相制御を用いて長パルス電源を実現させていく。

2.1 コンデンサバンク

コンデンサは、放電時間につれて出力電圧が指数関数的に減少し、ドループが発生する。長パルス電源のドループは式 (1) のように示すことができる。

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta Q}{V \cdot C_0} \quad (1)$$

V は出力電圧、Q は放電した電荷、 C_0 はコンデンサの静電容量を示す。この式からリップル(電圧変動率)を低減させようとするにはコンデンサ容量を大きくする必要があるが、この場合コンパクトで低コストのパルス電源の実現が難しくなってしまう。コンデンサに貯まったエネルギー(入力エネルギー)を W_c 、コンデンサからの出力エネルギーを W_p 、ドループ率を D とすると図 1 のような関係が成り立つ。

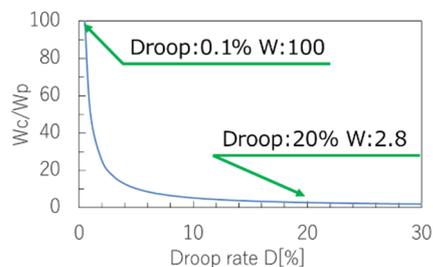
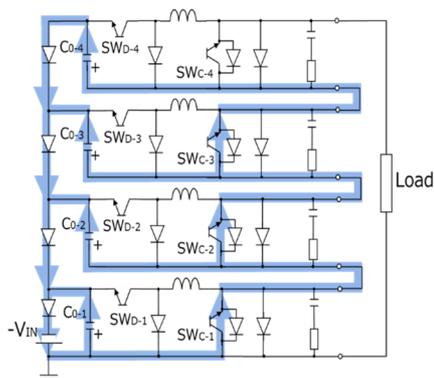


Figure 1: Input/output energy and droop.

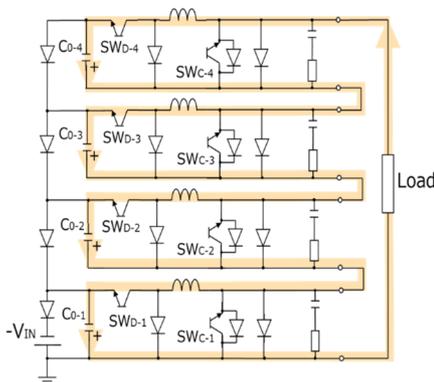
この図は、電圧がドループ率 D で減衰した場合、放電エネルギー W_p に対して、入力エネルギーがどれほど必要か比であらわしたグラフとなる。例えば、ドループ率 0.5% である場合、入力エネルギーは出力エネルギーに対して、100 倍のエネルギーが必要となる。つまり、本研究の目標であるリップル率 1% ($\pm 0.5\%$) を達成するためには、出力エネルギーの 50 倍のエネルギーを貯めることができるコンデンサが必要となる。エネルギーとコンデンサ容量は比例するため、かなり大きなコンデンサが必要となることがわかる。しかし、図 1 を見るとドループ率 20%

以上では、エネルギー比がほぼ変わっていないことがわかり、静電容量があまり変わらなくなることが言える。そこで、本研究ではドループ率が 20% の場合に対するコンデンサ容量で設計した。これにより発生するドループは、後述する Marx 回路の特徴を生かして、補償する。

2.2 チョップパ型 Marx 電源



(a) The charge current path.



(b) The discharge current path.

Figure 2: Circuit of chopper-Marx generator.

我々が提案するチョップパ型 Marx 電源の回路を図 2 に示す。放電用スイッチングデバイス (SW_D) と充電用スイッチングデバイス (SW_C)、ダイオード、コンデンサ (C) から構成される。(a) は充電時の経路を示す。それぞれの段のコンデンサが、入力電圧 $-V_{in}$ まで並列に充電されていく。(b) に放電時の経路を示す。各コンデンサには $-V_{in}$ が充電されているので、入力電圧の段数倍の出力電圧が負荷に印加される。^[2] この Marx 回路は、同じ設計の基板をスタックしていく構成であり、量産に向いている。また、各段ごとに制御することができ、様々な波形を生成することができる。放電時に PWM 制御することにより高精度な出力電圧を補償する。しかし、数十 kHz でスイッチングすることにより、リップルが発生してしまう。リップルによる電圧変動を減少させるには、図 2 中のインダクタンスやコンデンサを大きく方法がある。リップル電圧 V_{p-p} および応答時間 t_r と L, C の関係を式 (2) に示す。

$$V_{p-p} \propto \frac{1}{LC}, \quad t_r \propto \sqrt{LC} \quad (2)$$

しかし、式 (2) から L, C を大きくするとリップル電圧が減

少することがわかるが、応答時間が増加してしまう。そこでチョップパ型 Marx 電源では、各段の出力電圧の位相をずらすことによりリップルを軽減させる位相制御を行っている。図 2 の放電スイッチ SW_D のゲート振動に、PWM 周波数 $\times 1/(\text{Marx セル段数分})$ の位相差を持たせることで、それぞれの段での出力電圧は位相がずれ、それらを足し合わせると図 3 のように各段でのリップルはキャンセルされ、リップルが低減する。この方法を用いることで、LC が小さくても高精度のパルス電圧を得ることができる。

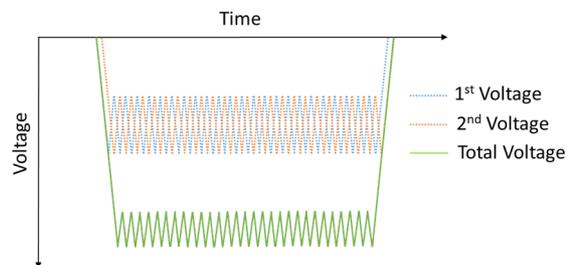


Figure 3: Image of ripple cancellation.



(a) Marx board cell.



(b) Marx unit.



(c) Marx modulator

Figure 4: Prototype Marx modulator.

3. 試作 Marx モジュール

3.1 Marx モジュール

図 4 に試作した Marx モジュールを示す。(a)は 1 段の回路を基板化したものである(1 セル基板)。-2.0kV を充電して、出力電圧-1.6kV, パルス幅 1.7ms のパルス電圧が出力される。これを 4 枚重畳したものが、(b)の 1 ユニットの構成となる。出力電圧は 4 枚重畳されたものとなるため、-6.4kV となる。この 4 枚の基板の位相は、PWM 周波数を 50kHz だとすると、それぞれ 5 μ s ごとにずれており、リップルを打ち消すようにスイッチングする。この 1 ユニットの 20 ユニット重畳したものが 1 モジュールとなる。このモジュールには、セルが 80 セル挿入されており、それぞれのスイッチングのタイミングが異なることで、最終的な出力電圧のリップルを打ち消している。

3.2 浮遊容量

Marx モジュールは箱筐体を含むパルス電源装置であるため、ユニット間やユニットと筐体間に浮遊容量が発生してしまう。さらに、Marx ユニットの充電には高周波トランスを用いているのだが、トランスの浮遊容量も存在している。それらを合わせると、図 5 のように浮遊容量は存在していると考えられる。

そこで、浮遊容量を考慮したシミュレーションをシミュレーションソフト micro-cap10 を用いて行った。まず、浮遊容量を考慮せず、理想的な 1 モジュール(20 ユニットの)状態で、各セルの充電電圧:-2.0kV, PWM 周波数:

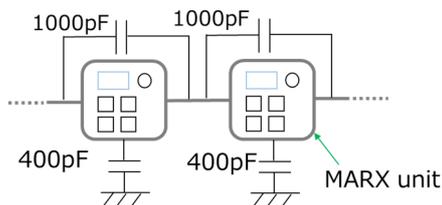


Figure 5: Image of stray capacitor.

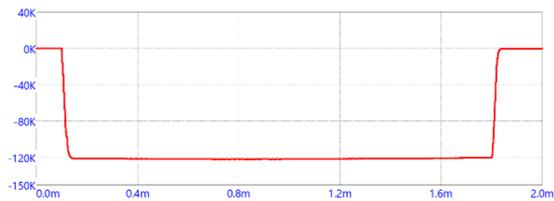


Figure 6: Image of stray capacitor.

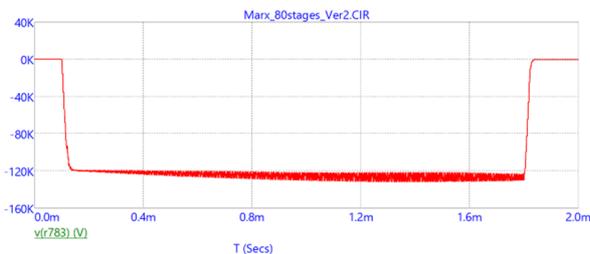


Figure 7: Image of stray capacitor.

50kHz, Duty 比:74.0%から 97.0%, 負荷抵抗:857.1 Ω としてシミュレーションを行った。シミュレーション波形を図 6 に示す。理想状態だとリップルは $\pm 0.05\%$ であった。つぎに、先ほどと同じ条件で、浮遊容量を考慮したシミュレーションを図 7 に示す。浮遊容量は各ユニットの出力端などに模擬的に 400pF と 1000pF を挿入してシミュレーションを行った。この状態でのリップルはワーストで $\pm 3.8\%$ となった。このシミュレーションから、浮遊容量の影響はかなり大きいと言える。本研究では増加してしまったリップルの対策についても報告する。

4. 試作 Marx モジュール評価試験

4.1 Marx ユニット試験

図 8 は、Marx セル 1 段を-1.8kV 充電し、PWM 制御を行わず、スイッチング周波数 50kHz で Duty サイクル 85% 一定にした場合の出力電圧の波形である。この場合のリップルは、 $\pm 26.0\%$ となった。

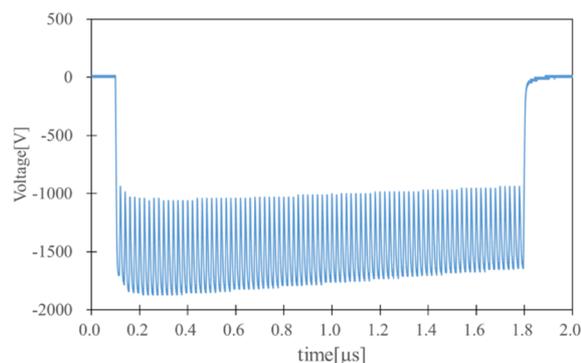


Figure 8: Waveforms of Marx 1 cell without PWM control.

図 9 は、Marx1 ユニット、つまり Marx セル 4 枚重畳した場合の出力波形である。充電電圧-1.8kV や PWM 制御無しなどの条件は同じであるが、それぞれの段のスイッチングタイミングは、1/4 ずつずれており、出力電圧のリップルは $\pm 3.0\%$ となった。

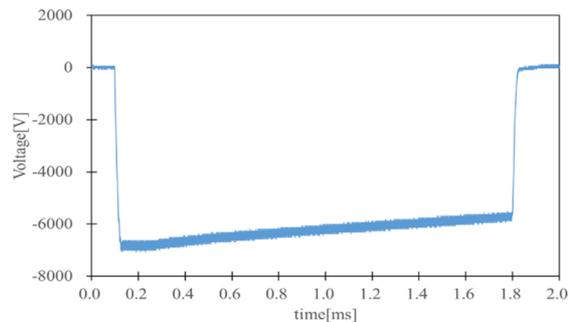


Figure 9: Waveforms of Marx 1 unit without PWM control.

図 10 は、3 ユニット接続した場合の出力波形である。充電電圧-1.8kV, PWM 制御を行い、Duty サイクルは 74%から 97%まで線形に変化させた。PWM 制御を行うことで、出力波形は 1.7ms のフラットなパルス電圧となった。

た。さらに、ユニット数を増やす、つまりセルの数が増えたことで、リップルも $\pm 1.5\%$ まで減少させることができた。

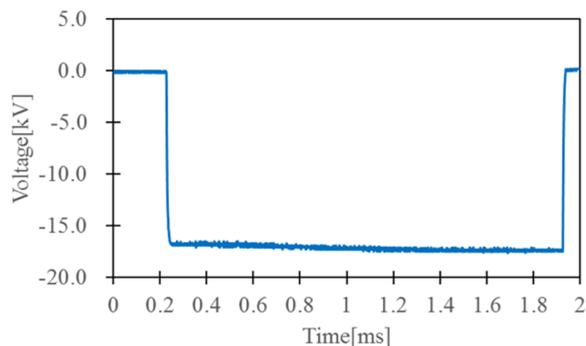


Figure 10: Waveforms of Marx 3 units with PWM control.

4.2 Marx モジュール試験

図 11 は、Marx モジュールを 1 段 80V で充電し、PWM 制御をかけて Duty サイクル 80% から 97% まで可変させた場合の出力電圧と出力電流である。3 ユニット試験ではリップルが $\pm 1.5\%$ であったのに対し、1 モジュール試験では $\pm 3.3\%$ とリップルが増加してしまっただ。シミュレーションとほぼ同様のリップルであり、実機のモジュールでも浮遊容量の影響を確認した。

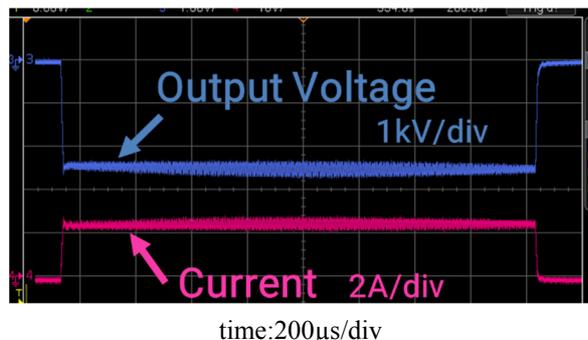


Figure 11: Waveforms of Marx module without snubber circuit.

そこで、増加してしまっただリップルを減らすために、図 12 に示すように、Marx ユニットの出力端にスナバ回路を挿入した。スナバ回路は、 $40\ \Omega$ 、 375nF を挿入した。この値は、負荷抵抗より選定した。

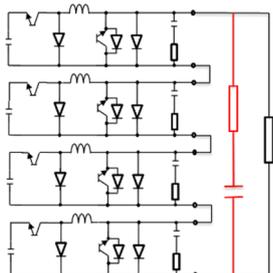


Figure 12: Marx unit circuit with snubber circuit.

図 13 は、スナバ回路を挿入した場合の出力電圧と出力電流である。それぞれのセルに -1.3kV 充電し、Duty サイクルは 80% から 97% で試験した。リップルはワースト $\pm 0.23\%$ 、平均出力電圧 -77.8kV を出力することができた。スナバ回路によりリップルを軽減させることができた。今後は、さらに電圧を上げて出力電圧 -120kV を目指していく。

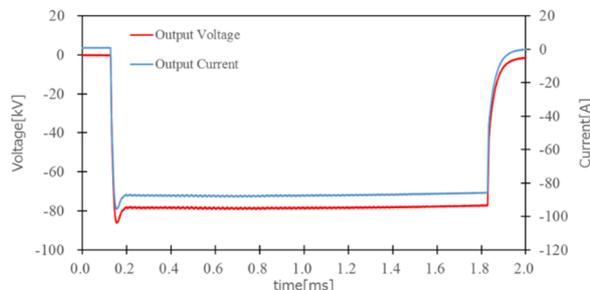


Figure 13: Waveforms of Marx module with snubber circuit.

5. まとめ

ILC マルチビームクライストロン用パルス電源にチョッパ型 MARX 電源の試作を行った。ユニットを増加させるごとにリップルの軽減が確認できた。Marx モジュール自体に発生してしまう浮遊容量の影響は、スナバ回路を挿入することで改善することができた。ただし、出力の立ち上がり時に、スナバ回路を挿入するとオーバーシュートが発生してしまい、素子の定格などの問題から、さらに高圧の試験ができない状態である。今後は、このオーバーシュートを、立ち上がり方式をソフトスイッチにするなどし、低く抑える対策をしていく。そして、モジュールの出力電圧 -120kV 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] H.Nakajima *et al.*, “KEK における ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源の現状”, these proceedings, TUP034.
- [3] T.Hayashi *et al.*, “ILC 用マルクス電源の複数段ユニットにおける定電圧制御”, these proceedings, TUP036.