

## ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源の現状

### PRESENT STATUS OF CHOPPER-TYPE MARX MODULATOR FOR ILC KLYSTRON

中島啓光<sup>#, A)</sup>, 明本光生<sup>A)</sup>, 川村真人<sup>A)</sup>, 夏井拓也<sup>A)</sup>, 松本修二<sup>A)</sup>, 松本利広<sup>A)</sup>, 徳地明<sup>B)</sup>, 澤村陽<sup>B)</sup>,  
生駒直弥<sup>B)</sup>

Hiromitsu Nakajima<sup>#, A)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>A)</sup>, Masato Kawamura<sup>A)</sup>, Takuya Natsui<sup>A)</sup>, Shuji Matsumoto<sup>A)</sup>,  
Toshihiro Matsumoto<sup>A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>B)</sup>, Yo Sawamura<sup>B)</sup>, Naoya Ikoma<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup> Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

#### Abstract

A Chopper-type Marx modulator is being developed to drive a 10MW L-band multi-beam klystron for the International Linear Collider (ILC) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK). The modulator consists of 20 units in series to provide the klystron with a -120kV 140A 1.65ms pulse at a repetition rate of 5pps. Currently, this modulator is being used as the power source for an 800 kW klystron, which is the RF source for the L-band resonant ring in Superconducting RF Test Facility (STF) at KEK. This paper describes the present status of the Chopper-type Marx modulator for ILC klystron.

#### 1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) では、高周波源として 10 MW マルチビームクライストロンを使用する予定となっている。10 MW マルチビームクライストロンの電源には、低コスト、高信頼性、高効率などの要求があり、ILC の Technical Design Report (TDR) では、ベースラインデザインとして、SLAC National Accelerator Laboratory (SLAC) で開発された P2 Marx を指標としたマルクス型の電源が採用されている[1, 2]。

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、10 MW マルチビームクライストロン用の電源として、チョッパ型マルクス電源の開発を進めてきており、基本性能の試験を 5 MW クライストロン (Thales TH2104) を負荷として行い [3]、その後、2020 年から STF において L バンド-レゾナントリング [4] の高周波源である 800 kW クライストロン (Toshiba E37501) 用の電源として運転に使用している。現在までの ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源の運転時間は、約 880 時間となり、その間の運転において明らかとなった問題点の改善等を行ってきた。

#### 2. チョッパ型マルクス電源

ILC で使用する予定の 10 MW マルチビームクライストロン用のパルス電源に要求される主な仕様を Table 1 に示す。ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源は 20 ユニットで構成され、各ユニットは Fig. 1 に示すような降圧チョッパ回路を組み込んだ 4 段のマルクス回路で構成されている。各マルクス回路のコンデンサ  $C_m$  は、充電用のスイッチ  $S_c$  を ON することによりダイオード  $D$  を介して並列に充電され、放電用のスイッチ  $S_d$  を ON することで各マルクス回路の  $C_m$  の充電電圧が直列に重ね合わされ出力される。各マルクス回路は、最大 -2 kV まで充電され、各コンデンサ  $C_m$  の充電電圧が低下することによる出力電圧の補正を放電用のスイッチ  $S_d$  を 50 kHz で

PWM 制御することにより、1 ユニットで最大 -6.4 kV、1.65 ms のフラットな出力パルス電圧が得られる。また、各ユニット内の 4 段のマルクス回路の PWM 制御の位相を 5  $\mu$ s ずつずらし、20 ユニット間でも位相をずらすことで出力パルス電圧のリップルを低減している。

Table 1: ILC Klystron Modulator Parameters

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

ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源の各ユニットは、制御基板 1 枚とマルクス基板 4 枚で構成されている。制御基板は、マルクス基板 4 枚に充電用のゲート信号、PWM 制御された放電用のゲート信号の供給、過電圧、過電流などの高速で動作する必要のあるインターロックの制御等を行なっている。各ユニットの制御基板は、光ケーブルによって Ethernet に接続されており、制御用の PC から Ethernet 経由で HV 及び TRIG の ON/OFF、充電電圧の設定、PWM のパターンの設定などを行う。

ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源の各ユニットの充電は、インバーターユニットにより絶縁トランスを介して 20 kHz の高周波で電力が供給され、各ユニット内にある整流回路で整流される。充電電圧の制御は、各ユニット内の制御基板により行われ、充電電圧をモニターしインバーターユニットに充電 ON/OFF の信号を光ケーブルで送信している。設計では、各ユニットに 1 台のインバーターユニットで電力を供給するものとなっているが、現在は、10 台のインバーターユニットのみとなっており、1 台のインバーターユニットから 2 台のユニットに並列に電力を供給している。

<sup>#</sup> hiromitsu.nakajima@kek.jp

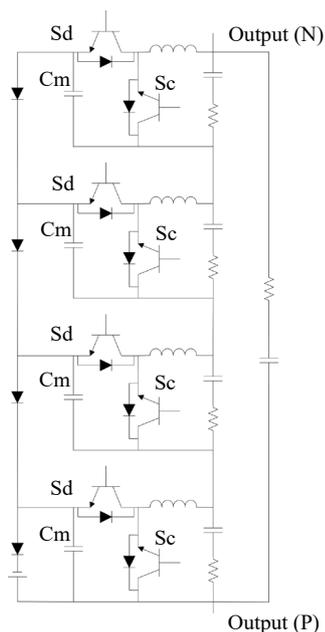


Figure 1: Simplified schematic of the Chopper-type Marx modulator.

現在、ILC クライストロン用チョップ型マルクス電源は、Fig. 2 に示すように L バンド-レゾナントリングの高周波源である 800 kW クライストロン用の電源として運転に使用されており、運転値は最大で出力電圧:60 kV、出力電流:18 A、パルス幅:1.65 ms、繰り返し:5 Hzとなっている。

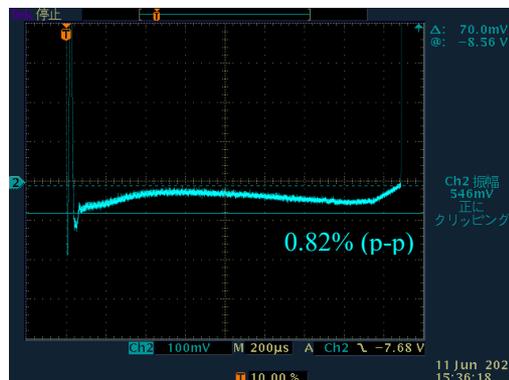


Figure 2: Photograph of the Chopper-type Marx modulator with 800 kW klystron for L-band resonant ring.

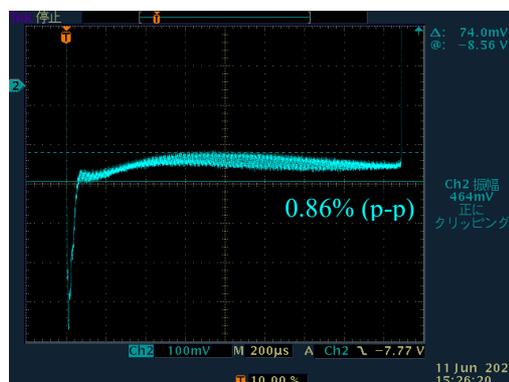
### 3. 出力パルス電圧補正方法の変更

各ユニットのコンデンサ  $C_m$  の充電電圧の低下に伴う出力電圧の補正は、20 ユニット全てのユニットで放電用のスイッチ  $S_d$  を PWM 制御することで補正を行うが、PWM のデューティの変化でマルクス回路間にスパイク電圧が発生することが問題となっている。対策として、16 ユニットは、デューティ比 100% (ON/OFF の制御のみ) とし、4 ユニットのみ充電電圧を下げて PWM 制御することで出力電圧を補正する試験を行った。その結果、Fig. 3 に示すように PWM 制御を 4 ユニットのみにしてもパルス電圧の平坦度は、要求される仕様を満たしていることが確認できた。また、出力電圧のオーバーシュートを抑えるため、ON/OFF の制御のみを行う 16 ユニットに関

しては、Fig. 4 に示すように降圧チョップ回路の L に並列に抵抗を追加し、ユニットのスナバ回路を取り外す改造を行った。



(a) 20units PWM controlled



(b) Only 4 units PWM controlled.

Figure 3: Waveform of the flat-top of output voltage.

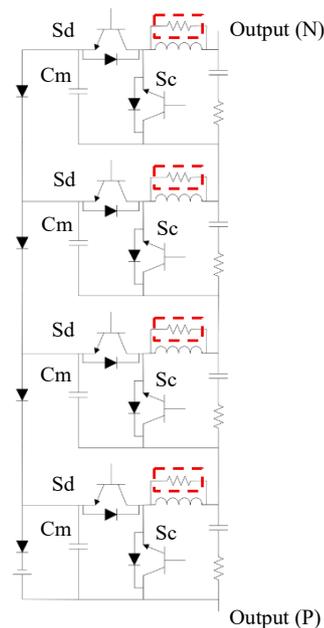


Figure 4: Simplified schematic of the Chopper-type Marx modulator modified to prevent overshoot.

現在、Lバンド-レゾナントリングの運転では、16ユニットは、ON/OFFのみの制御、4ユニットは、0-100%のPWM制御で行って行っており、充電電圧はそれぞれ最大で900V(16ユニット)と200V(4ユニット)となっている。

#### 4. ソフトウェアの改修

長時間運転の中で、出力電圧が低下する現象が確認された。また、入力過電圧のインターロックの誤動作により、HV OFF となってしまうことがあり、ソフトウェアの改修を行った。

出力電圧が低下する件について調査を行なった所、10分に一度程度の頻度で Fig. 5 に示すように5%程度出力電圧が低下しており、その際には充電電圧も低下していた。各ユニットの充電は、パルス出力中には充電を停止しているが、制御系の誤動作によりパルス出力後に充電開始されないことがあることが確認できた。対策として、各ユニットの制御ソフトウェアをパルス出力時も充電を停止せずに常時充電するように改修することにより、出力電圧が低下することはなくなった。

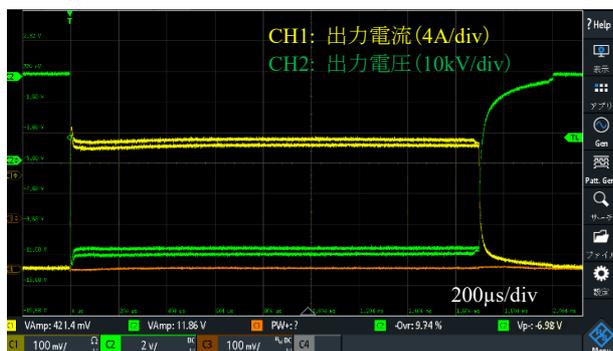


Figure 5: Waveforms at reduced output.

入力過電圧のインターロックの誤動作に関しては、誤動作時の入力電圧モニターを確認すると Fig. 6 に示すように電圧の瞬間的な上昇が確認できた。Figure 6 から電圧モニター系のノイズによる誤検出と考えられるため、ADコンバーターの測定値に対して時間方向で100~200µs程度の移動平均をとり、過電圧を検出するようにソフトウェアの変更を行なった。また、パルス出力時のノイズによって誤動作することも明らかになったため、パルス出力時には、入力過電圧にマスクをかけるように変更を行なった。今後、対策を行ったソフトウェアに書き換えて、動作試験を行う予定である。

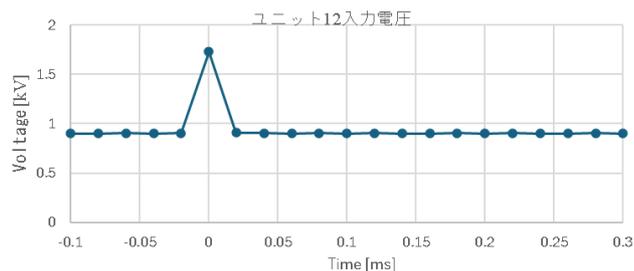


Figure 6: Input voltage monitor at detected input over voltage.

#### 5. DC-DCコンバーターの故障対策

各ユニット内の4段のマルクス回路には、パルス出力時には最大で1段につき2kVの電圧が印加され、4段目には最大で8kVの電圧が印加される。各ユニット内の4枚のマルクス基板への制御電源は、ユニット内の制御用電源から絶縁型のDC-DCコンバーターにより耐圧を持たせて供給されている。絶縁型のDC-DCコンバーターは、市販のものであり、データシート上の耐電圧はDCで10kVのものである。しかし、長時間の運転でこのDC-DCコンバーターの耐圧不良による故障が発生してきており、原因の調査と対策の検討を行なった[5]。

使用しているDC-DCコンバーターの耐電圧は、DCで10kVであるが実際の回路では、パルスの電圧が印加されるため、新品のDC-DCコンバーターに8kV、1.7msのパルス電圧を150Hzで印加する試験を行なった所、約11.8Mショットで耐電圧不良が発生した。実際に使用する5Hzに換算すると約650時間となり、長期間の運転では、耐電圧が十分ではないことが判明した。対策として、市販品でより耐電圧の高いものに変更することも検討されたが、データシートからはパルス電圧に対する耐電圧が確認できないため、Fig. 7 に示すように高周波絶縁トランス方式に変更することとした。現在、1ユニットを高周波トランス方式に改造し、今後その評価試験を行う予定となっている。

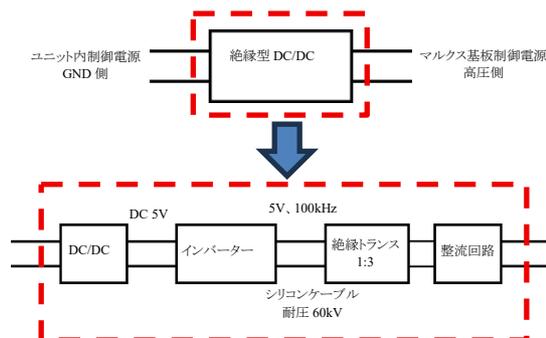


Figure 7: Block diagram of the isolated control power supply.

#### 6. まとめ

ILCクライストロン用チョップパ型マルクス電源は、現在Lバンド-レゾナントリングの運転に使用されており、その運転時間は、約880時間となった。長時間の運転において、ソフトウェアの問題、ハードウェアの問題が明らかとなり、その対策を行ってきた。また、現在、ユニット単体での長時間運転が可能なテストスタンドの構築に向けて、準備を進めている。

#### 参考文献

- [1] ILC Technical Design Report Volume 3 – Accelerator, 2013, <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] M.A. Kemp *et al.*, “The SLAC P2 Marx”, Pulse Power Proceedings of International Power Modulator and High Voltage Conference, San Diego, CA, USA, 2012.

**PASJ2025 FRP062**

- [3] H. Nakajima *et al.*, “Present status of the Chopper-Type Marx modulator development at KEK”, Proceedings of the 2019 IEEE Pulsed Power & Plasma Science, June 23-29, Orlando, FL, USA, 2019.
- [4] K. Ishimoto *et al.*, “Construction of L-band Resonant ring for high power testing of ILC waveguide components”, Proc. PASJ2021, Takasaki (Online meeting), Oct. 2021, pp. 360-363.
- [5] Y. Sawamura *et al.*, “Improving the reliability of the control power supply in the ILC Marx modulator”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, THP054, this meeting.