

## 高精度充電器の開発

### DEVELOPMENT OF HIGH PRECISION SWITCHING POWER SUPPLY

田中豊<sup>#, A)</sup>, 三宅克馬<sup>A)</sup>, 熊澤伸彦<sup>A)</sup>, 佐藤和行<sup>A)</sup>, 篠原己拔<sup>A)</sup>, 近藤力<sup>B)</sup>, 稲垣隆宏<sup>B)</sup>, 大竹雄次<sup>B)</sup>  
Yutaka Tanaka<sup>#, A)</sup>, Katsuma Miyake<sup>A)</sup>, Nobuhiko Kumazawa<sup>A)</sup>, Kazuyuki Sato<sup>A)</sup>,  
Kibatsu Shinohara<sup>A)</sup>, Chikara Kondo<sup>B)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>B)</sup>, Yuji Otake<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Nihon Koshuha Co., Ltd.

<sup>B)</sup> RIKEN

#### Abstract

A high precision switching power supply was developed for the PFN modulator of RIKEN SACLA. The maximum output voltage is 50kV, and the maximum repetition rate is 120 pps. The switching power supply consists of main and sub switching circuits. In the sub circuit, the pulse-width-modulation (PWM) method was used in order to obtain high precision charging voltage stability ( $< 100$  ppm\_pp). The switching power supply was tested, and a charging voltage stability of 1 Vpp (20 ppm\_pp) and a repetition rate of 120 pps were achieved.

#### 1. はじめに

理化学研究所 X 線自由電子レーザー施設 (SACLA) のクライストロンモジュレータの PFN コンデンサを充電するための高精度充電器を開発した。本充電器の主な仕様を Table 1 に示す。ショット毎の充電電圧安定度は、充電電圧 50kV において、5Vpp(100ppm\_pp) 以下と極めて高い安定度としている。この安定度を得るために、充電電圧の整定回路にパルス幅変調 (PWM) 制御を用いて速応性や安定性を高めている[1]。さらに、高い繰り返し充電である 120pps を実現するために、直列共振回路を使用した大電力スイッチング回路を搭載している。本発表では、機器や回路の構成について、実機で得られた通電結果について報告する。

Table 1: Specification (for 470nF load)

Input voltage	AC420V $\pm$ 5% (3-Phase)
Output voltage	50kV(max)
Output current	2.8A(ave.)
Output power	70kJ/s(max)
Repetition rate	120pps(max)
Stability	$< 100$ ppm_pp
Cooling water	15L/min
Efficiency	$>80\%$

#### 2. 機器概要

##### 2.1 機器構成

本充電器は充電部と制御部で構成され、充電部は

床置き型、制御部はラックマウント型とした。充電部と制御部は、IGBT ゲート信号、インターロック信号、モニタ信号等のケーブルで接続される。接続ケーブルは最大 10m まで伸ばすことができ、充電部と制御部の設置の自由度の高さが特徴である。Figure 1 に充電部の外観写真を示す。充電部の大きさは、幅 950mm、奥行き 1100mm、高さ 1200mm で、重量は約 1000kg である。充電部はリフターで移動可能であるが、専用治具を使いクレーンでの釣り上げも可能である。正面側に冷却水の取り合いや各種メータがあり、背面側に制御部への接続ケーブルや高圧ケーブルコネクタや受電用端子台が用意されている。



Figure 1: Appearance of the switching power supply.

<sup>#</sup> yut\_tanaka@nikoha.co.jp

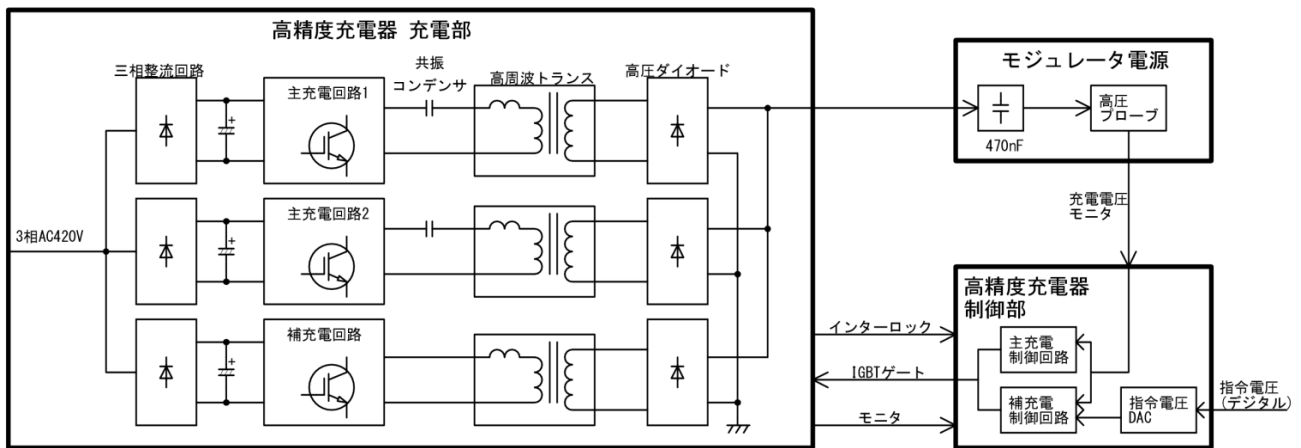


Figure 2: Block diagram of the switching power supply.

## 2.2 回路構成

Figure 2 にブロック図を示す。充電部は、三相整流回路、主充電回路、補充充電回路、共振コンデンサ、高周波トランス、高圧ダイオードで構成されている。各ブロックの特徴は以下の通りである。

- 3 系統の三相整流ダイオードを設け、各系統の相互干渉を抑制した。
- 主充電回路では、共振コンデンサと高周波トランスの漏れインダクタンスで直列共振回路を構成し、IGBT のスイッチング損失を低減させ、大電力での充電を可能とした。35kJ/s の主充電回路 2 回路を並列運転させ、合計 70kJ/s の出力とした。
- 共振コンデンサに高耐電圧 (2000Vac) のフィルムコンデンサを使用し、共振コンデンサの信頼性を高めた。
- 補充充電回路ではパルス幅変調 (PWM) 制御で高速・高精度に整定を行う。スイッチング周波数 40kHz、パルス幅 1 $\mu$ s でスイッチするため、高速な IGBT やゲートドライブ回路を使用した。
- 高周波トランスでは、高周波特性の良いフェライトコアを採用した。また、リッツ線を使用し、銅損を抑制した。
- 高圧ダイオードに放熱フィンを取り付け、冷却性能を向上させた。
- オイルタンクでは、低粘性の EHV ケーブル油 (JX 日鉱日石エネルギー(株))を使用した。また、流体シミュレーションで絶縁油の温度や対流を確認し、オイルタンク内部の構造を決定した。

制御部は、主充電制御回路、補充充電制御回路、指令電圧生成回路 (DAC) 等で構成されている。制御部の特徴は以下の通りである。

- 主充電制御回路は CPLD を用いたデジタル制御とし、パラメータの変更を容易にした。
- 補充充電制御回路はこれまで実績のあるアナログ制御とした。
- 主充電から補充充電への切り替えを精密に行うため、主充電期間の末期で IGBT ゲート幅を狭め、

PWM とすることで、充電速度を緩やかにした。

- 充電電圧の指令電圧は、外来ノイズ等による指令電圧の変動を防止するために、上位から指令電圧をデジタル信号で受け、筐体内の DAC で生成した。
- 制御回路系は恒温水による水冷を行い、温度安定化し、温度ドリフトを抑制した。

## 3. 実機動作

### 3.1 主補切り替え

120pps の繰り返し充電では 7ms 以内に充電を完了する必要があるため、実機で主充電時間を確認した。Figure 3 は充電電圧と充電電流の波形であり、充電電圧は 50kV である。50kV までの充電時間は約 5ms であり、十分な充電速度が得られていた。

補充充電回路で使用している高速な IGBT は、出力容量が低く、主充電の様な充電速度は得られない。主充電の充電末期で充電速度を落とし、補充充電をスムーズに開始する必要がある。そこで、主充電末期では、IGBT のゲート幅を狭めて、共振充電から PWM 充電へ切り替えることにした。その主補切替時の波形が Figure 4 である。緑線は、差動アンプを使用して、50kV 付近の充電電圧を拡大した波形である。主充電では、49.7kV まで共振モードで充電し、49.7kV から 49.9kV まで PWM モードで充電している。PWM モードでの充電時間は約 300 $\mu$ s である。共振モードでの充電速度は 10kV/ms、PWM モードでの充電速度は 1kV/ms となり、1/10 に低下させることができた。補充充電では、49.9kV からの残り 100V を約 400 $\mu$ s で充電し、その後、充電電圧を整定している。

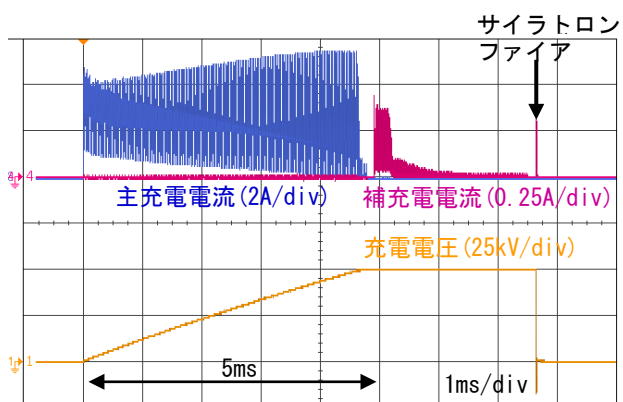


Figure 3: Charging current and charging voltage wave forms.

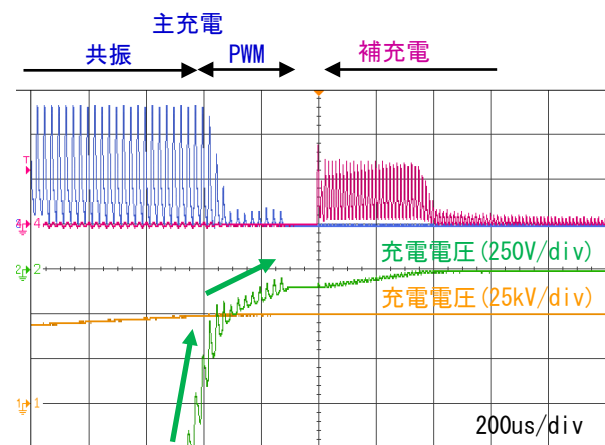


Figure 4: Expanded wave forms during main and sub charging. The yellow line is an original charging voltage. The green line is a charging voltage in an expanded scale.

### 3.2 充電電圧安定度

充電電圧 50kV、繰り返し 120pps にて充電電圧安定度を測定した。Figure 5 は補充電整定時の充電電圧波形を 1 分間重ね書きした波形である。充電電圧安定度は 1Vpp (20ppm\_pp) であり、仕様の 100ppm\_pp を十分下回ることができた。

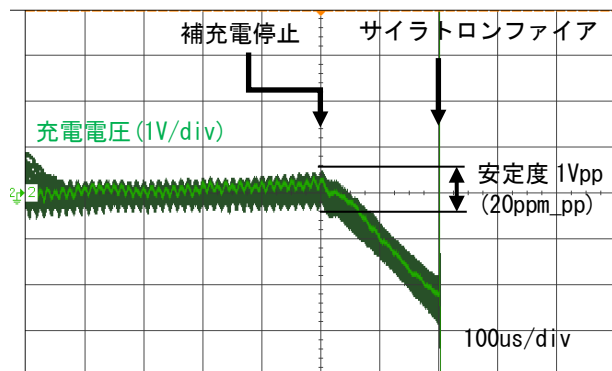


Figure 5: Charging voltage stability.

### 3.3 ランニング試験

機器の健全性や絶縁油温度を確認するために、充電電圧 50kV、繰り返し 120pps にて、24 時間のランニング試験を行った。本充電器は故障なくランニング試験を完了し、充電電圧安定度も 100ppm\_pp 以下が得られた。また、絶縁油温度は、オイルタンク上面にて約 60°C であった。

## 4. まとめ

理化学研究所 SACL A の PFN モジュレータで使用する高精度充電器を開発した。主充電末期に PWM 制御に切り替え、充電速度を減速することで、補充電にスムーズに引き渡すことが出来た。補充電を PWM でフィードバック制御し、充電電圧 50kV、繰り返し 120pps において、充電電圧安定度 1Vpp (20ppm\_pp) が得られた。

## 参考文献

- [1] C. Kondo, et al., "PWM 制御を用いた高電圧充電器の開発", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013