

## SuperKEKB 用フラックスコンセントレータ電源の開発

### DEVELOPMENT OF FLUX CONCENTRATOR MODULATOR FOR SUPERKEKB

明本光生<sup>#</sup>, 福田茂樹, 本間博幸, 紙谷琢哉, 道園真一郎, 中島啓光, 設楽哲夫

Mitsuo Akemoto<sup>#</sup>, Shigeki Fukuda, Hiroyuki Honma, Takuya Kamitani, Sinichiro Michizono, Hiromitsu Nakajima, Tetsuo Shidara

High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

#### Abstract

We are developing a modulator for the SuperKEKB positron source flux concentrator which requires 12 kA in a sinusoidal half wave current for a pure inductive load, at 50 Hz. A prototype modulator has been built by revising from the existing S-band modulator. A peak current of 6 kA with a width of 5  $\mu$ s has been successfully generated at 50 pps. The 12 kA modulator is under construction, which is based on the prototype modulator design, and will be completed in Feb., 2014. We have a plan to develop a solid-state switch to replace thyristors, which improves the reliability and maintainability of the modulator.

#### 1. はじめに

SuperKEKB 計画に向けて電子陽電子入射器<sup>[1]</sup>の改造<sup>[2]</sup>が進められている。本稿ではこれに向けた陽電子生成標的直後においてビームを強く収束するためのフラックスコンセントレータ(FC)型パルスソレノイド<sup>[3]</sup>にパルス電流を供給する電源の開発について報告する。

#### 2. 仕様と設計

FC 負荷コイルのインダクタンスは約 1  $\mu$ H で、約 30m の高圧同軸ケーブルを通して地上部に設置されたパルス電源に接続される。そのパルス電源のパルス出力仕様は約 5  $\mu$ s 幅の半正弦波形でピーク電流 12 kA、繰返し 50 Hz、安定度 0.3%(P-P)である。

開発経費と時間を削減し、また同時に運転経費も削減したいことから、入射器で使用されている S バンドクライストロンパルス電源の技術を全面的に使用することにした。S バンドクライストロンパルス電源は通常ピーク電圧 22.5kV、ピーク電流 4.8kA、パルス幅 5.6 $\mu$ s、50Hz で運転されているサイラトロンスイッチを使用したパルス電源である。今回の FC の半分相当の電流を発生させることが可能である。

FC 用ソレノイドコイルの開発を進めるにあたってその磁場分布測定や大電流通電試験ができる 6kA 程度の FC 電源がすぐ必要で、FC 電源の開発は 2 段階で行う。第一段階に、S バンドクライストロンパルス電源を改造して FC の半分に相当するピーク電流 6 kA の半正弦波形の発生する電源を開発する。改造といってもパルス成形回路(PFN)を取り替えるだけで、その他すべてそのまま流用する。技術的なリスクが小さく、短期間で改造することができ、スピーディーな開発を進めることができる。第二段

階は、プロトタイプのパフォーマンスを確かめて新規に実機 FC 電源を一年かけて製作する。但し、基本となる回路方式は変えない。S バンドクライストロンパルス電源の構成ユニットはすべて使用する。

#### 3. プロトタイプ 6kA Modulator

##### 3.1 概要

プロトタイプとして入射器で使用されているクライストロンパルス電源の PFN 回路をコンデンサバンクに改造してピーク電流 6kA の FC 電源を製作した。当然、この回路を戻せば元のクライストロンパルス電源として使用することができる。

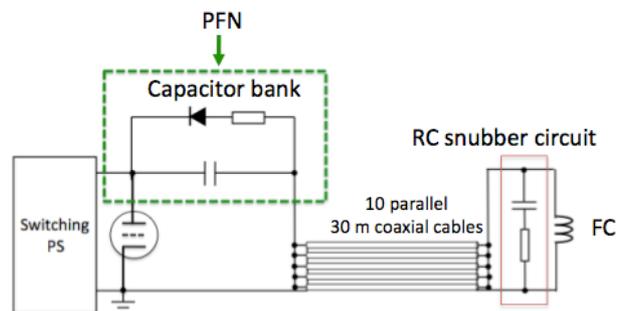


Figure 1: Simplified schematic diagram of the prototype 6 kA modulator.

Figure 1 にプロトタイプ FC 電源の回路構成を示す。PFN 回路がコンデンサバンク回路に置き換わっている。コンデンサバンク回路は 0.5 $\mu$ F の放電コンデンサとそれに並列接続されたシャント回路（シャントダイオードとシャント抵抗）で構成される。この回路構成は IHEP 等使用されている。

コンデンサはスイッチング電源で最大 20kV まで充電され、サイラトロンで放電される。放電された電流は長さ 30m、特性インピーダンス 25  $\Omega$ 、耐圧

<sup>#</sup> mitsuo.akemoto@kek.jp

40 kV の同軸ケーブル 10 本並列接続されたケーブルを通して FC 用ソレノイドコイルに流れる。FC 用ソレノイドコイルには波形補償用 RC スナバ回路が接続されている。ソレノイドコイルから戻ってきた電流はコンデンサバンクのシャント回路ですべて吸収される。シャント抵抗の値はシャント電流及びサイラトロン逆電圧を決める重要なパラメータで、逆電圧が 10 kV 以下になるよう  $3 \Omega$  に決定した。また、戻ってきたエネルギーは全て吸収するため抵抗器は水冷式定格電力 7 kW(東海高熱工業製 WD-5、4 台並列接続)を採用した。Table 1 にプロトタイプ 6 kA 電源の主な仕様を示す。

Table 1: Specifications of prototype 6 kA modulator

Capacitance	$0.5 \mu\text{F}$
Load inductance	$\sim 1 \mu\text{H}$
Total inductance	$\sim 3 \mu\text{H}$
Charging voltage	17 kV
Peak current	6 kA
Pulse width	$5 \mu\text{s}$
Repetition rate	50 Hz

Figure 2 にプロトタイプ FC 電源の放電管体内部を示す。本来 PFN 回路架台が置かれている場所に、そのまま、コンデンサバンク回路架台を置き換えられるようになっており、簡単に置き換えが可能である。架台は絶縁板で作られていて、上に放電コンデンサ、シャントダイオード、抵抗器、電流モニター及び出力同軸ケーブル等すべてのものが取り付けられている。

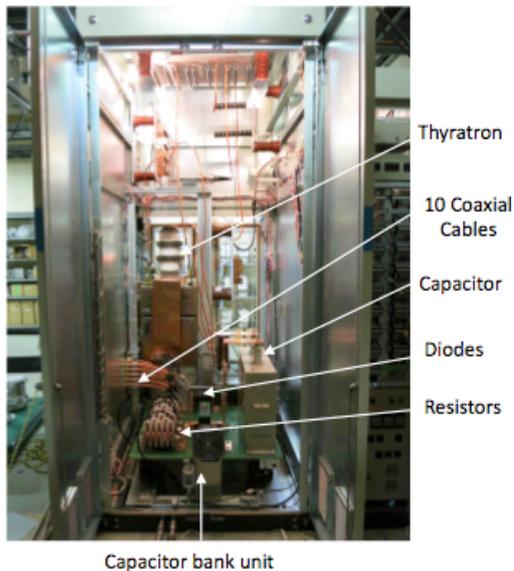


Figure 2: Inside view of the prototype modulator.

### 3.2 波形補償用 RC スナバ回路

パルス電源とコイル負荷との接続に 30m の同軸ケーブルを使用している。そのため負荷のミスマッチングで同軸ケーブルの間で反射を起こして FC 負荷コイルの電流波形が歪んでしまう。そのため波形を補償するための RC スナバ回路を Micro-Cap9 でシミュレーションして評価した。特性インピーダンス  $25 \Omega$  の同軸ケーブルを 10 本並列接続で使用することから抵抗値を  $2.5 \Omega$  として容量 C の値を変えて調べた。Figure 3(a)は波形補償用 RC スナバ回路がない場合である。波形はかなり歪んでいることが分かる。Figure 3(b)は容量  $100 \text{ nF}$  の RC スナバ回路が付加した場合で、かなり波形が補償されることが分かる。容量を大きくすればするほど、ますます波形は補償されるが、一方コンデンサの容積、抵抗器のロス電力量が増大する。波形の歪み程度を見て、また回路のサイズ等を考慮して、容量の値を  $100 \text{ nF}$  に決めた。

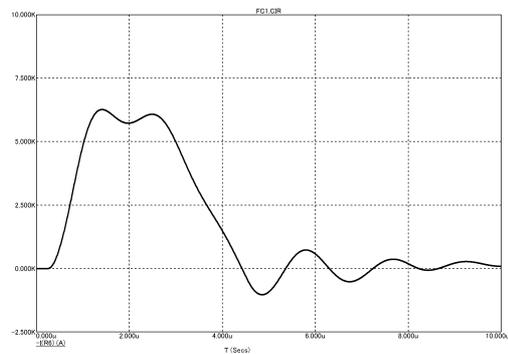


Figure 3(a): Load current waveform without RC snubber circuit. (V:2.5kA/div., H:2 $\mu\text{s}$ /div.)

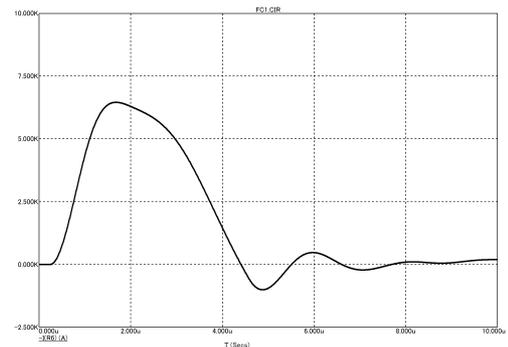


Figure 3(b): Load current waveform with RC snubber circuit. (V:2.5kA/div., H:2 $\mu\text{s}$ /div.)

### 3.3 試験運転

模擬負荷として  $1 \mu\text{H}$  のコイルを使用して試験運転を実施した。コイルの低圧側には電流モニター用の CT を取り付けした。Figure 4 に充電電圧 17 kV、50 Hz でのコイルの電流波形を示す。ピーク電流 6.4 kA の  $5 \mu\text{s}$  の半正弦波形が測定された。ほぼシミュレーション通りの波形が得られた。

ピーク電流 6 kA、50 Hz 連続運転試験で温度が最

も上昇した部品は RC スナバ回路の抵抗器であった。この抵抗器は自然空冷のため表面温度が 100°Cまで上昇した。その他は大きな上昇はなかった。スナバ回路で使用している抵抗器の限界は 200°Cまでであるが、大きな温度上昇は好ましくないので、水冷式に変更する予定である。

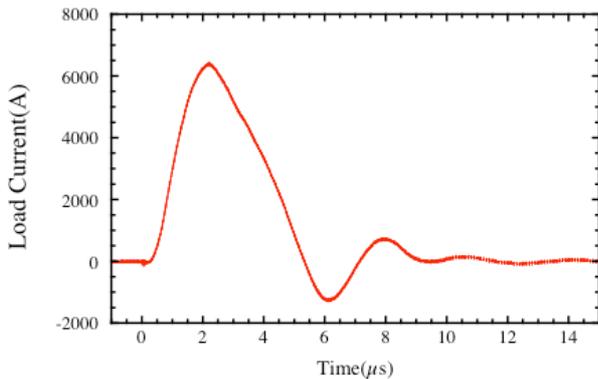


Figure 4: Typical load current waveform at 17 kV.

## 4. 12 kA Modulator

### 4.1 設計概要

FC 電源開発の第二段は 12 kA の実機の製作である。設計が現在進行中で、来年 2014 年 2 月に完成する予定である。Figure 5 に基本の回路構成を示す。基本的にプロトタイプ回路方式を 2 回路使用する方式である。もちろん S バンドクライストロンパルス電源の構成ユニットはすべて共通使用する。従って、サイラトロンをはじめ、ユニット類すべて入射器のものと共通使用するため、電源の保守費用や価格に大きなメリットが生まれる。

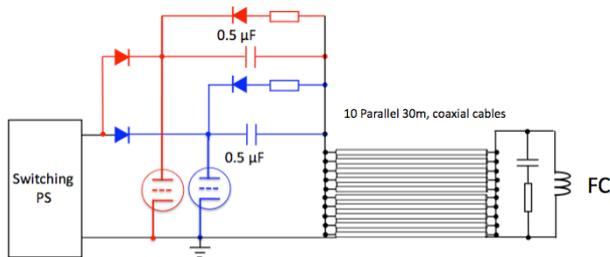


Figure 5: Simplified schematic diagram of 12 kA modulator.

Figure 6 に現在検討中の実機の筐体内の配置図を示す。サイラトロンは前側に配置し、出力ケーブルは筐体上部に出すようになっている。筐体のサイズは 1.8m(W)x1.5m(D)x2.4m(H)である。

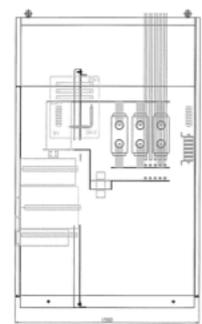
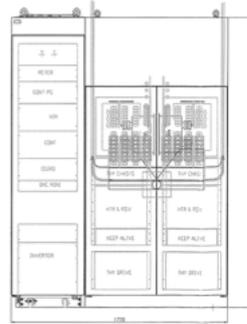
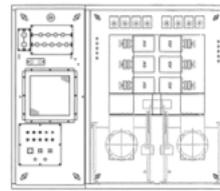


Figure 6: 12 kA Modulator cabinet.

### 4.2 サイラトロンの半導体化

サイラトロンは電子管であるが故に動作が不安定で、寿命に大きなばらつきがあり比較的短いことなどから保守が大変である。最終的には運転コストの増大に繋がる。そこでサイラトロンを半導体スイッチに置き換えることを検討している。最近、小型の静電誘導型サイリスタを多直列、多並列接続した 25 kV、5 kA の半導体スイッチ<sup>[4]</sup>が開発された。この応用も検討したい。

## 5. まとめ

SuperKEKB で使用するフラックスコンセントレータ型パルスソレノイドにパルス電流を供給する電源の開発を進めている。プロトタイプ (6kA) 電源は秋からのビームコミッシングで使用される。12 kA 実機の電源は来年 2014 年 2 月に完成する予定である。

## 参考文献

- [1] M. Akemoto, et al., "The KEKB injector linac", Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A002.
- [2] 夏井拓也, 他, "SuperKEKB に向けた入射器アップグレード", these proceedings, SAOT01.
- [3] 紙谷琢哉, 他, "SuperKEKB に向けた陽電子源増強の現状", Proceedings of the 9<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 1084pp, 2012.
- [4] 磯山悟郎, 他, "クライストロンモジュレータ用ハイパワー半導体スイッチの開発", these proceedings, MOOT11.