

LONG-PULSE MODULATOR DEVELOPMENT FOR 10 MW KLYSTRON IN THE SUPERCONDUCTING RF TEST FACILITY(STF) AT KEK

Mitsuo Akemoto¹, Hiroyuki Honma, Hiromitsu Nakajima, Tetsuo Shidara, Shigeki Fukuda
High Energy Accelerator Research Organization(KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

This paper describes the second long-pulse klystron modulator that is recently developing for the Superconducting RF Test Facility(STF) at KEK. The modulator has a direct-switched-type design with a 1:15 step-up transformer and a bouncer circuit to compensate the output pulse droop within $\pm 0.5\%$; it can drive a klystron up to 10 MW peak power, 1.5 ms rf pulse width, and 5 pps repetition rate. The main features of this modulator are four 50 kW switching power supplies in parallel to charge storage capacitors to 10 kV, self-healing-type storage capacitors to realize a compact capacitor bank, and a highly reliable IGBT main switch which enables elimination of a crowbar circuit. Design considerations and the performance using a 5 MW klystron load are presented.

KEK超伝導加速器試験施設 (STF) に於ける10MWクライストロン用 長パルスモジュレータの開発

1. はじめに

国際リニアコライダー(ILC)^[1]の主ライナックの高周波源には、1.3 GHz、10 MWクライストロンが560本使用される。これを駆動する電源として、ピーク電圧120 kV、ピーク電流140 A、パルス幅1.7 ms、パルス平坦度1%(p-p)、繰り返し5 Hzの大電力長パルスを発生するパルス電源が要求される。使用台数の規模とトンネル内で使用することから、特に電源の高信頼化、小型軽量化、低価格化することが求められる。ILCの基本概念設計(BCD)ではこの電源として、バウンサー型^[2]と呼ばれる電源方式が採用された。この電源のパルス発生方式は、オンオフ機能をもったスイッチでパルスを直接つくるダイレクトスイッチング方式(ハードチューブ型パルス電源)である。これにバウンサー回路(サグ補償回路)と組み合わせることによって、電源が必要なコンデンサバンクの容量を飛躍的に小さくすることができ、電源の小型軽量化、低価格化することができる。

KEKでは、この型のパルス電源の開発を超伝導加速器試験施設(STF)^[3]の建設と同時に2005年度から開始した。第1号機^[4]は費用をかけないで早期に開発を進めたいことから、核燃料サイクル機構から移管した10年以上たった古いクライストロン電源を改造して製作した。現在、超伝導空洞の評価試験、空洞用カップラーの大電力試験やSTFのRFシステムで使用するためのコンポーネントの大電力試験等に使用されている。次に、2007年度に第2号パルス電源^[5]の製作を行った。この電源は新規に製作することから、電源全体にわたって小型軽量化、高信頼化を考慮した本格的な設計を行った。いろいろなトラブルがあつて完成には少し時間を要したが、2009年4月に、

5 MWクライストロンの長期安定運転ができる状況になった。本稿では、この第2号パルス電源について報告する。

2. 第2号パルス電源

2.1 概要

新規に設計することから、より高信頼化、小型軽量化、低価格化を狙った独自の設計を行った。主な特徴を下記にまとめる。

(1) 将来、高耐圧、大電流スイッチ素子によるコンパクトな主スイッチ^[6]を使用することを考慮して、パルストランスの昇圧比は1:15を選択した。(BCDでは1:12である。)

(2) 小型軽量化のため、充電電源にはスイッチング電源を採用した。また蓄積用コンデンサにはSH(Self-Healing)型高密度エネルギーコンデンサ^[7]を開発した。

(3) 主スイッチは保護機能を強化することによって高信頼化し、本来の主スイッチ(シリーズスイッチ)の機能を活かしてクローバ回路を除去した。

(4) パルストランスは、1.7 ms幅の長いパルスであるのでパルスの立ち上がり時間を約0.1 msで最適化して鉄心の小型軽量化に務め、また低価格化のために鉄心の板厚を厚いものにし、製造が容易な製法を選択した。

第2号パルス電源の負荷は、開発段階であることから5 MW(Thales製TH2104)と10 MW(東芝製E3736)クライストロンが想定されている。それぞれのクライ

¹ E-mail: mitsuo.akemoto@kek.jp

ストロンとそれに必要な電源の仕様を表 1、2にまとめている。電源本体のサイズは、設置場所の制限から、幅4.2 m、奥行2.2 m、高さ2.2 mとしている。図1に完成したパルス電源の外観写真を示す。全体制御を行うプログラマブルロジックコントローラ (PLC) は19インチラック筐体に収納され、図1では後部に設置されている。

表 1 : クライストロンの仕様

クライストロン	TH2104	E3736
周波数 (GHz)	1.3	1.3
RFパルス幅 (ms)	1.5	1.5
ピーク出力電力 (MW)	5	10
ビーム電圧 (kV)	130	120
ビーム電流 (A)	92	140
パービアンス (μ)	2.0	3.4
繰返し (pps)	5	5
ビーム数 (本)	1	6
効率 (%)	42	60

表 2 : 10 MW クライストロン運転時でのパルス電源の仕様(括弧内の数値は5 MW運転時)

ピーク出力電力	16.8(12.0) MW
パルストランス昇圧比	1:15
2次側出力パルス電圧	120(130) kV
2次側出力パルス電流	140(92) A
コンデンサバンク総容量	2000 μ F
パルス立ち上がり時間(10-90%)	< 0.2 ms
パルス平坦度	< \pm 0.5%
パルス幅(平坦部)	> 1.5 ms
パルス幅(半値幅)	1.7 ms
主スイッチ電圧	8.8(9.1) kV
主スイッチ電流	2100(1380) A
ガン放電時クライストロン許容	
注入エネルギー	< 20 J
最大パルス繰返し	5 pps

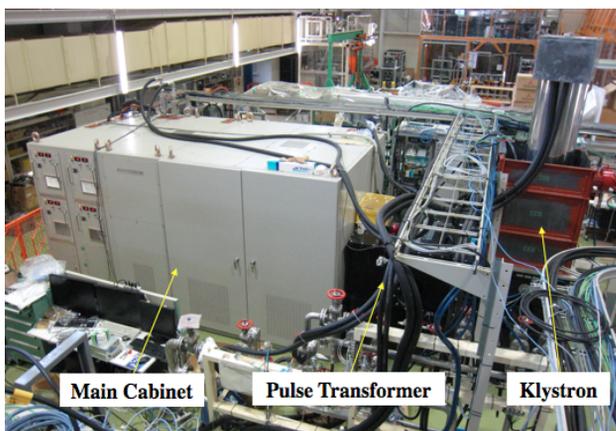


図 1 : STF第2号パルス電源とクライストロン (TH2104)の外観

2.2 回路構成

図2にパルス電源の主な回路構成を示す。420V 3相50Hzを受電し、4台のスイッチング電源方式の高圧充電ユニット(1台当たりの充電能力50 kJ/s)が2 mFのSH型コンデンサバンク (エネルギー密度270 kJ/m³) を最大10 kVまで充電する。電圧安定度は0.2%以下である。主スイッチはIGBTモジュール (三菱電機製CM600H-24H: 定格電圧1200V, 直流電流: 600 A) を使用して4並列20直列で構成している。1:15のパルストランス (油中使用) はリーケイジインダクタンスを極力抑えるために、低圧側と高圧側の2台のパルストランスに分割し、1次側は並列接続、2次側は直列接続する構成になっている。バウンサー回路は共振用コンデンサ (2 mF) とリアクトル (0.3 mH)、充電ダイオード、回路を起動させるサイリスタスイッチから構成する。サイリスタスイッチは主スイッチより少し早めにトリガーされる。出力パルス電圧のサグ20%にたいして1%以下で補償できるようにLCの値を決定した。出力パルスの平坦部分の1.5 msを十分カバーできるように共振の半周期は2.4 msである。

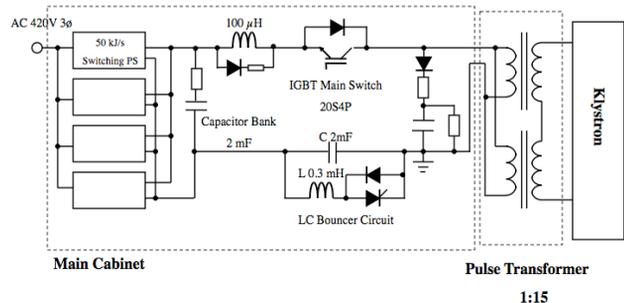


図 2 : パルス電源の回路構成

3. 運転性能

クライストロン (TH2104) を実負荷として電源の性能を調べた。まずバウンサー回路のトリガータイミングの最適化を行った。図3に、充電設定電圧 $E_s=7.0$ kV、繰返し5 ppsで、バウンサー回路を起動するトリガータイミングを変えた時のクライストロンの電圧波形平坦部の変化の様子を示す。主トリガーより0.456 ms早いタイミングが、出力パルスの平坦度を最良にする。その値よりも早くすれば前上がりのパルス波形になり、反対に遅くすれば後ろ上がりのパルス波形になる。

次に、 $E_s=9.6$ kV、繰返し5 ppsでのクライストロンのRF出力が5MW運転時でのRF出力、クライストロン電圧・電流波形の例を図4に示す。また、電圧波形の拡大を図5に示す。ピーク電圧は127 kV、ピーク電流は85.5 Aである。パルスの立ち上がり時間(10-90%)は92 μ s、平坦部1.5 msでの平坦度は0.47%(P-P)で電源のパルス出力性能仕様を満足する結果が得られた。

図6にクライストロンのエージング中に放電した

時の波形を示す。その時の条件は、 $E_s=9.0$ kV、繰り返し5 ppsであった。過電流のインターロックが正常に動作し、IGBTスイッチが正常にオフして、約400 μ s後にはクライストロンビーム電流がゼロになっている。クライストロン短絡中の注入エネルギーは、短絡中のアーク電圧を100V一定と仮定して計算すると2.0 Jで、仕様である20 J以下を十分満足している。

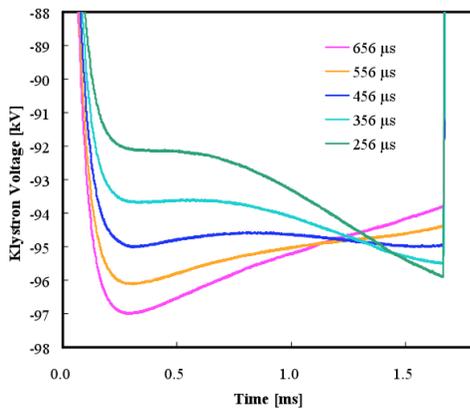


図3：バウンサートリガーの調整でクライストロン電圧波形の平坦部の変化する様子

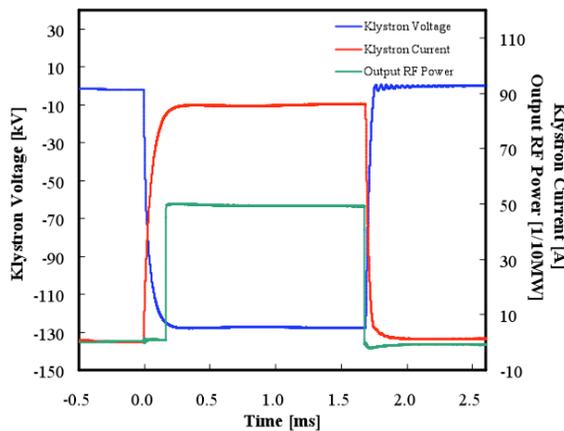


図4：5 MW運転時でのRF出力波形とクライストロン電圧・電流波形

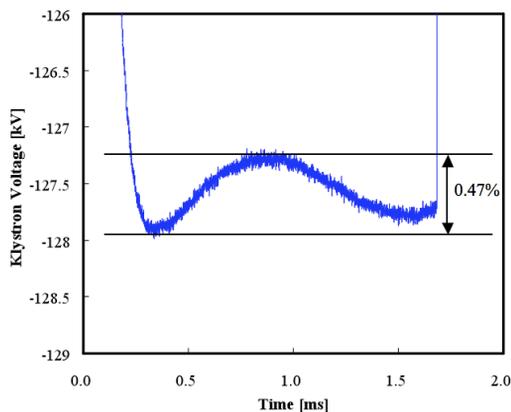


図5：5 MW運転時でのクライストロン電圧波形の拡大

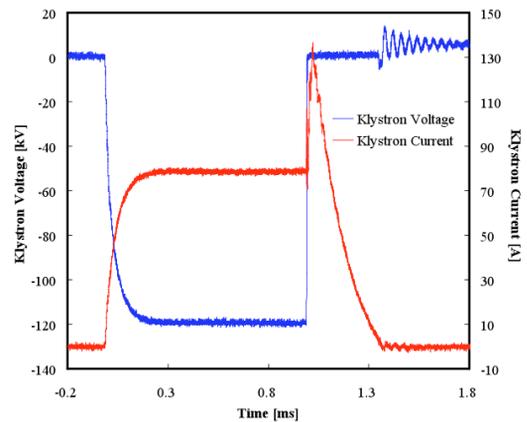


図6：クライストロン放電時時での電圧・電流波形

4. まとめ

STF第2号パルス電源は10 MWクライストロンを駆動可能な小型軽量化、高信頼化したバウンサー型パルス電源である。5 MWクライストロンを使った性能試験では仕様を満足するパルス波形及び平坦度0.47%(p-p)が得られた。現在、STFのRFシステムで使用するコンポーネントの大電力試験等に使用しながら長期運転を行っている。

謝辞

STF 2号機のパルス電源の設計、製作にはニチコン草津(株)の方々が大変お世話になりました。この場をお借りしてお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] ILC Reference Design Report, 2007.
- [2] H. Pfeffer, et al., "A Long Pulse Modulator for Reduced Size and Cost", FERMLAB-Cnf-94/182, (1994).
- [3] 早野仁司, 「超伝導加速器試験設備STFの現状」, 日本加速器学会年会.
- [4] 明本光生, 本間博幸, 中島啓光, 設楽哲夫, 福田茂樹, 「KEK超伝導試験設備(STF)に於ける長パルスモジュレータの開発」, 第3回加速器学会年会, 第31回リニアック技術研究会報告集, 90-92 (2006).
- [5] 明本光生, 本間博幸, 中島啓光, 設楽哲夫, 福田茂樹, 「KEK超伝導試験設備(STF)に於ける10MWクライストロン用パルスモジュレータの開発」, 第4回加速器学会年会, 第32回リニアック技術研究会報告集, 109-111 (2007).
- [6] 左右田学, 斉藤隆, 山崎長治, 渡辺郁夫, 明本光生, 福田茂樹, 設楽哲夫, 本間博幸, 中島啓光, 「長パルスモジュレータ用IGBTスイッチの開発」, 第4回加速器学会年会, 第32回リニアック技術研究会報告集, 100-102 (2007).
- [7] 明本光生, 辻尾周作, 「クライストロン電源用SH型コンデンサの開発」, 第5回加速器学会年会, 第33回リニアック技術研究会報告集, 879-881 (2008).