

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 presents the second long-pulse klystron modulator that is recently developing for the Superconducting RF Test Facility(STF) at KEK. The modulator is a direct-switched type design with a 1:15 step-up transformer and a bouncer circuit to compensate for the output pulse droop within $\pm 0.5\%$ during the rf drive period: it can drive a 10 MW multi-beam klystron as well as a 5 MW single-beam klystron with up to 1.5 ms rf pulse width and up to 5 pps repetition rate. The main features of this modulator are the use of four 50 kJ/s switching power supplies in parallel to charge the storage capacitors to 10 kV, self-healing-type capacitor to realize a compact storage capacitor bank, and a highly reliable IGBT switch to eliminate a crowbar circuit.

KEK超伝導試験設備 (STF) に於ける10 MWクライストロン用 パルスモジュレータの開発

1. はじめに

LCのための超伝導加速器技術の確立と推進を行う試験設備^[1] (STF)の建設がKEKで2005年から始まり、現在進行中である。STFのRF源^[2]として5 MWと10 MWのLバンドクライストロン合計3本を使用する。まずは2006年に5 MWクライストロンを駆動する第1号パルス電源^[3]が製作され、現在、空洞用カプラの大電力試験、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利用されている。第1号パルス電源は製作費用を抑えるためまた早期に整備したいことから、核燃料サイクル機構から移管した10年以上たったクライストロン電源システムを改造して製作した。しかし、第2号パルス電源は新規に製作することから、電源の小型、軽量化、高信頼化を考慮して設計を行った。現在、性能試験を行っている最中である。本稿では、このパルス電源の仕様と試験状況を中心に報告する。

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: 10MW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5MW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
最大パルス繰返し	5 pps

2. 第2号パルス電源の設計

パルス電源方式としては第1号と同様でILCの基本方式であるパルストランスとLC共振バウンサー回路を備えたダイレクトスイッチング方式のパルス電源^[4]である。初期の計画では5MWクライストロン用電源であったが、今後の進展を考慮して10MWマルチビームクライストロンも駆動できる仕様にした。新規に製作するので、より小型、軽量化、高信頼化、低価格化を狙った設計を行った。小型、軽量化には充電電源としてスイッチング電源を採用した。また蓄積コンデンサ、バウンサー用コンデンサにはSH型高密度エネルギーコンデンサを開発した。主スイッチは保護機能を強化することによってスイッチの高信頼化し、クローバ回路を除去した。パルストラ

¹ E-mail: mitsuo.akemoto@kek.jp

スに於いては1.7ms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0.1msで最適化して鉄心の小型、軽量化に務め、また鉄心の板厚を厚くし製造が容易な製法を選択して低価格化した。また将来、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^[5]を開発することを考慮してパルストランスの昇圧比を1:15を選択した。

表 1、2 に5 MW(Thales製TH2104)と10MW(東芝製E3736)クライストロンと第2号パルス電源の主な仕様をまとめた。

3. 回路構成と特徴

3.1 回路構成と外観

図1にパルス電源の主な回路構成を示す。420V 3相50Hzを受電し、10 kVまでコンデンサバンクを充電するための4台のスイッチング電源方式の高圧充電ユニット、パルス波形に変換する主スイッチ、パルス平坦部を補償するバウンサー回路、120kVに昇圧する1:15のパルストランス(油中使用)から構成される。

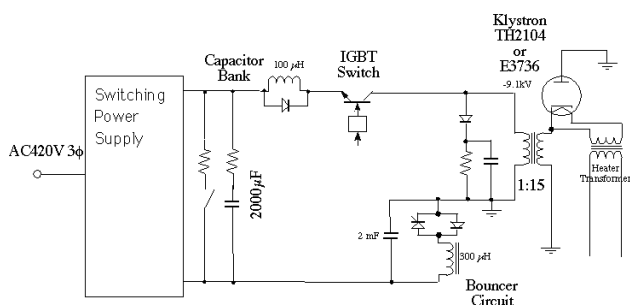


図1: パルス電源の回路構成

図2にパルス電源の外観写真を示す。電源本体と右側はパルストランスである。電源本体のサイズは幅4.5 m、奥行2.2 m、高さ2.2 mである。全体制御を行うPLCは19インチラック筐体に収納され、図2では後部に設置されている。

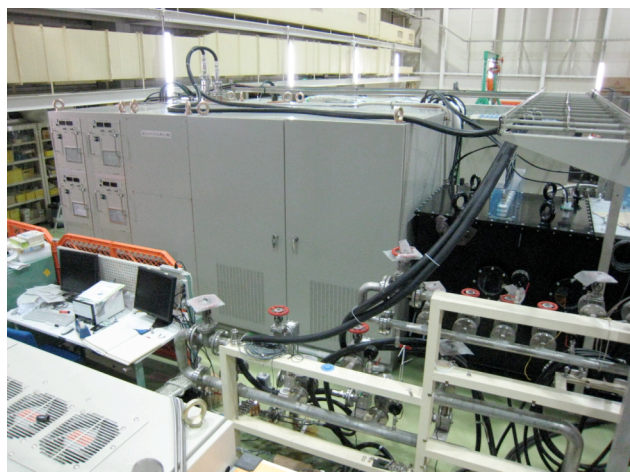


図2: パルス電源の外観

3.1 充電ユニット

充電電源の小型、軽量化及び制御機能強化を考慮してスイッチング電源方式を採用した。各ユニットは10kV、50 kJ/sの電力供給能力があり、4台並列接続して使用される。スイッチング電源はスイッチング素子としてIGBTを使用したフルブリッジインバータ方式で、動作周波数は20 kHzでフル運転での電圧安定度は1%以下を実現している。冷却は水冷方式を採用した。

3.2 コンデンサバンク

コンデンサを小型、軽量化するために、コンデンサバンク用としてSH(Self-Healing)^[6]型コンデンサを開発した。コンデンサバンクは定格電圧11kV DC、容量500 μFのコンデンサ4台を並列接続して使用する。コンデンサの大きさは電位傾度の二乗に反比例するので、小型化には高い電位傾度が要求される。今回ニチコンで開発したコンデンサは誘電体にポリプロピレンフィルムを使用し、その表面に薄い金属で特殊なパターンで蒸着したものである。この方法によって、繰り返し5ppsのフル運転での設計寿命約10万時間に対して設計電位傾度は $\sim 300V/\mu m$ まで上げることができた。この値は通常のNH(Non-Healing)タイプと比較して2倍以上の電位傾度で、またエネルギー密度は $270kJ/m^3$ になり体積は1/4まで小型、軽量化できた。また特殊な蒸着パターンの手法で絶縁破壊がおきてもNHタイプと異なり健全なコンデンサとして維持ができるため安全面でも優れている。

3.3 主スイッチ

主スイッチはスイッチ素子として、IGBTモジュール(三菱電機製CM600H-24H: 定格電圧1200V、直流電流: 600A)を使用して、20S4Pで構成する。スイッチの構造を簡素化するために、ゲート駆動回路の電力は主回路から供給し、ゲートトリガーは光ケーブルで送る。主スイッチの保護は、スイッチ各並列回路4ヶ所、一次側出力回路1ヶ所、2次側クライストロン回路1ヶ所計6ヶ所に検出器を置き、またそれぞれの保護回路の故障を補償するために回路系を2重化した過電流保護システムを構成している。さらにスイッチの保護機能を強化するために、各素子に素子短絡故障検出機能(コレクターエミッタ間の電圧がスイッチ開時50V以下なら異常)を付加し、素子に1つでも異常が検出された場合、スイッチを高速遮断し、直流高圧電源を停止するインターロックも合わせて設けている。このようにインターロックシステムを多重化することによってスイッチの高信頼化を実現し、クローバ回路を削除した。

3.4 LCバウンサー回路

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%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1.5msを十分カバーできるように共振の半周期は2.4msである。

3.5 パルストランス

長パルス大電力用パルストランスは鉄心が大きくなるため大型になり高価なものになってしまう。そのため、小型化と低価格化が重要な課題である。鉄心の小型、軽量化を計るため、鉄心の断面積はリーケイジインダクタンスの平方根に逆比例することから、パルスの立ち上がり時間(10-90%)を0.1ms程度(2次側換算値でリーケイジインダクタンスが39mH程度)で最適設計した。また鉄心を低価格化するためより安価な板厚0.3mmの方向性硅素鋼板を使用し、製法に於いてもこれまでやられたラップ方式でなく、製造費を抑制できる積層鉄心方式を採用した。

パルストランスはリーケイジインダクタンスを極力抑えてコンパクトにまとめるために、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。夫々のパルストランスの巻線方式はISO巻で、独立の巻線でDCバイアスをかけて使用する。クライストロンヒーター電源は絶縁ヒータートランスで直接供給される。また、パルストランスタンクは絶縁油タンクに収納し、その上部にクライストロンが差し込まれる。

パルストランスの設計値(2次側換算値)は励磁インダクタンス92H、リーケイジインダクタンス36mH、分布容量844pF、サグ2%以下である。タンクのサイズは幅約2.2m、奥行約1.1m、高さ約1.4mである。パルストランスの総重量は8.3tで、内訳はパルストランス本体2.3tx2、タンク1.5t、油2.2tである。

4. 性能試験

模擬抵抗と模擬パルストランス(リアクトル200 μ H)を1次側出力に直列接続した模擬負荷での性能試験を行った。

まずバウンサー回路の調整試験を行った。図3に充電設定電圧 $E_s=5.5$ kV、繰り返し5ppsでバウンサー回路を起動させるトリガータイミングを変えた時の模擬負荷抵抗での電圧波形平坦部の様子を示す。主トリガーより0.4ms早いタイミングがパルス平坦度を最小(0.86%P-P)にすることが分かる。

次に、 $E_s=9.1$ KV、繰り返し5ppsでの1次側出力電圧・電流波形の例を図4に示す。模擬負荷抵抗(3.8 Ω)でのピーク電圧は-7.57kV、ピーク電流は2009Aである。パルスの立ち上がり時間(10-90%)は模擬リアクトルで決まる0.16ms、平坦度は0.86%(P-P)で電源のパルス出力性能仕様をほぼ満足している。

5. まとめ

STF第2号パルス電源は製作を終了し、1次側模擬負荷による性能試験を行った。仕様を満足するパルス波形及び平坦度0.86%(p-p)が得られた。8月上

旬にはパルストランスの2次側に模擬負荷を接続した性能試験を予定している。また今年秋にはクライストロンを使用した性能試験も予定している。

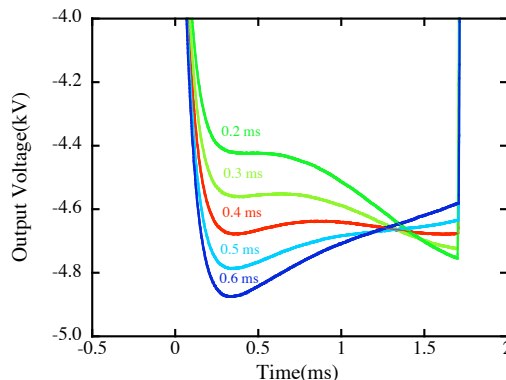


図3：1次側出力電圧波形平坦部

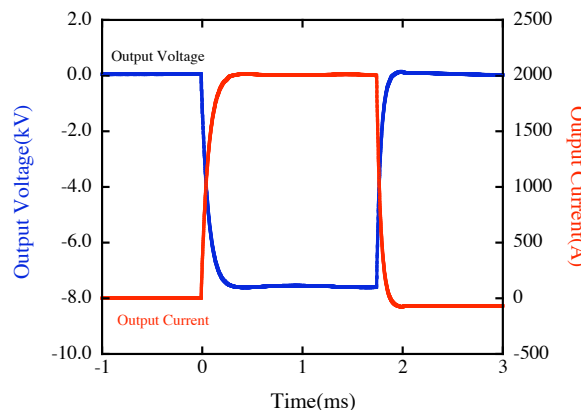


図4：1次側出力電圧・電流波形

謝辞

この電源の設計、製作にはニチコン草津(株)の方々大変お世話になりました。この場を借りてお礼を申し上げます。また、試験においてはSTF-RF関係者に大変なご協力を得ました。あらためて感謝いたします。

参考文献

- [1] 早野仁司, “超伝導RF試験設備の現状”, in these proceedings.
- [2] 福田茂樹, “KEK超伝導RF試験装置(STF)のRF源の開発”, in these proceedings.
- [3] 明本光生, “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”, Proceedings of the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.90-92, (2006).
- [4] H. Pfeffer, et al., “A Long Pulse Modulator for Reduced Size and Cost”, FERMLAB-Cnf-94/182, (1994).
- [5] 左右田学, “長パルスモジュレータ用IEGTスイッチの開発”, in these proceedings.
- [6] 辻尾周作, “長パルス電源用高エネルギー密度SHコンデンサの開発”, in these proceedings.