

## PULSE MODULATOR FOR X-BAND KLYSTRON AT GLCTA

M.Akemoto<sup>1</sup>, H.Honma, H.Nakajima, T.Shidara, S.Fukuda  
High Energy Accelerator Research Organization(KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

This paper presents an X-band klystron modulator recently constructed for the Global Linear Collider Test Accelerator(GLCTA) at KEK. The modulator is a thyratron-switched line-type design, and operates two klystrons up to 75 MW peak power, 1.6 $\mu$ s rf pulse width and up to 150 Hz repetition rate. The major goals of the modulator are reasonably compact size and high reliability. One notable feature is the use of eight 30kJ/s switching power supplies in parallel to charge the pulse forming network. These supplies are a major contributor to compact size of the modulator. The design, specifications and results of performance tests of the modulator are described.

## GLCTAのXバンドクライストロン用パルス電源

### 1. はじめに

現在、GLCを推進するためのXバンド大電力試験設備(GLCTA)の整備(平成15~17年の3年計画)が、KEKアセンブリホールで急ピッチに進められている。ここでは、XバンドRFシステムの試験が計画<sup>[1]</sup>されており、75MW PPM Xバンドクライストロン2本が新たに装備される。今回、それを駆動するパルス電源を製作した。

限られたスペースと短期間で立ち上げなければならないことから、ピーク出力電力283MW、平均出力電力194kWと大電力でありながら、小型で信頼性の高いパルス電源が要求される。また、RFシステムとして長期間運転するので、運転・保守・管理が容易にできることも求められる。本稿では、新規に製作したパルス電源の設計・製作及び性能試験について報告する。

### 2. 設計の指針

信頼性を重視することから、電源方式はGLCで目標とするタイプとは異なるラインタイプ方式を採用した。この方式のパルス電源は充電部、放電部、パルストランスから構成される。充電部は、高周波化することによって、トランス、平滑コンデンサなどの主要部品が大幅に小型・軽量化することが可能で、インバータ電源を採用する。放電部のサイラトロンの選定は、設計において最重要で、実績がありまた維持・保守の点も考慮して、KEK電子・陽電子リニアックで使用しているサイラトロンを採用した。要求される出力電力からサイラトロンは2本使用する。サイラトロンの許容アノード電圧・電流及びパルス成形回路(PFN)のインピーダンスを考慮してパルストランスの昇圧比を1:24及び4並列のPFNに決定した。パルストランスの1次側インピーダンスが1.5 $\Omega$ と低インピーダンスになるのでパルストランスと接

続する伝送ラインはパルス伝送特性の優れた3重平行平板線路を採用した。また、パルス幅が短いので立ち上がり特性の優れたパルストランスの設計を行った。

表1: 75MW XバンドPPMクライストロンの仕様

周波数	11.424 MHz
RFパルス幅	1.6 $\mu$ s
ピーク出力電力	75 MW
ビーム電圧	500 kV
ビーム電流	283 A
パービアン	0.8 $\mu$
繰返し	150 Hz
効率	53%

表2: クライストロン電源の仕様

ピーク出力電力	283 MW
パルストランス昇圧比	1:24
1次側出力パルス電圧	21 kV
1次側出力パルス電流	13.6 kA
PFN総容量	1.464 $\mu$ F
パルス立ち上がり時間(10-90%)	< 0.9 $\mu$ s
パルス平坦度	$\pm$ 0.5%
パルス幅(平坦部)	>1.6 $\mu$ s
パルス幅(半値幅)	4.5 $\mu$ s
サイラトロンアノード電圧	42 kV
サイラトロンアノード電流/1本	6.8 kA
最大パルス繰返し	150 Hz

主要装置はユニット化して装置の増設及び保守が容易になるようにした。この電源の基本設計はKEK電子・陽電子リニアックCバンド化計画で開発された小型パルス電源<sup>[2]</sup>に基づいている。表1にGLCの

<sup>1</sup> E-mail: mitsuo.akemoto@kek.jp

RF源用として開発している周期永久磁石(PPM)集束を用いた75MW級クライストロン<sup>[3]</sup>の主な仕様を示す。また表2に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

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、42kVまで2つのPFNユニットを充電する8台のインバータ電源ユニット、各PFNユニットを放電するための2本のサイラトロン、500kVに昇圧する1:24のパルストランス(油中使用)から構成される。

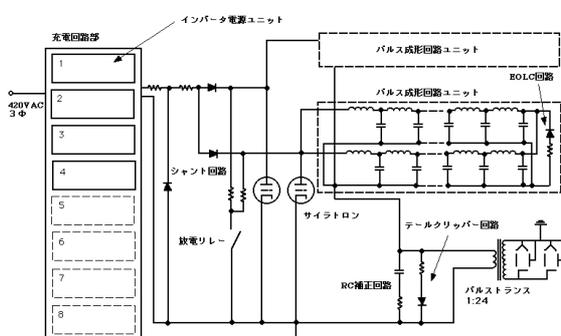


図1：パルス電源の回路構成

図2に外観写真を示す。パルス電源の筐体は放電部、充電部、制御部の3部で構成される。放電部の筐体(写真右側)はPFNユニット、サイラトロン等の高圧関係が収納されている。裏側も対称的な配置になっている。充電部の筐体(写真左下側)は前面に4台のインバータ電源ユニット、裏側に同様に4台のインバータ電源ユニットが収納できるようになっている。制御部の筐体(写真左上側)は操作性を考慮した高さがあり、運転に必要な制御、モニターが全てできるようになっている。その裏側には受電した電力の配電盤が置かれている。サイズは幅3.5m、奥行2.3m、高さ2.3mである。

#### 3.2 インバータ電源ユニット

各ユニットは50kV、30kJ/sの電力供給能力があるインバータ電源<sup>[4]</sup>で、クライストロン2台のフル運転では8台のユニットが並列運転される。また各ユニットは19インチラック装着構造で、脱着が容易になるよう高圧ケーブル及び制御ケーブルがコネクタ接続できるようになっている。小型化するために冷却は水冷却方式を採用している。サイズは奥行630mm、高さ450mmである。

インバータ電源は主スイッチ素子にIGBTを使用したフルブリッジインバータ方式で、約33kHzのスイッチング周波数で効率85%、安定度 $\pm 0.1\%$ を実現している。50Hzの低繰返しの負荷条件においても85%以上の高力率が維持できるよう力率改善回路を設けている。

運転制御はマスター・スレーブ方式で、所定の充電電圧の93%まで全ユニットで運転し、その後高精度の電圧安定度を得るためにマスターユニットのみ運転する。

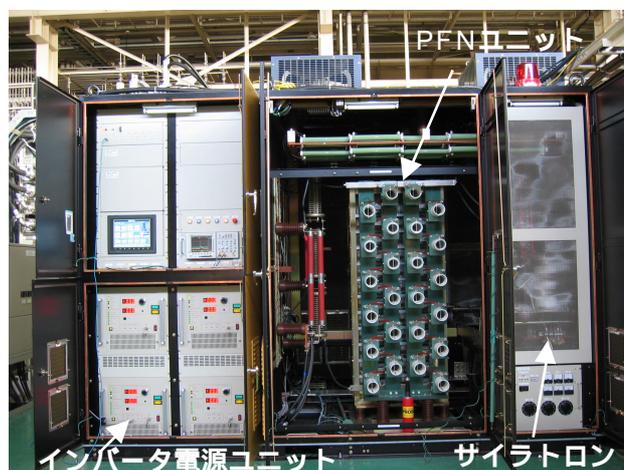


図2：パルス電源の外観

#### 3.3 PFN回路

PFN回路は2つのユニットで構成される。各ユニットはユニット交換が容易にできるように車輪がついた箱にEOLC回路を除くPFN回路が収納されており、特性インピーダンス $3.0\Omega$ で2並列12段で構成している。従って、各列の特性インピーダンスは $6.1\Omega$ で、各段のインダクタンス及びコンデンサの容量は $1.2\mu\text{H}$ 、 $30.5\text{nF}$ である。各段のインダクタンスは可変で十分波形調整が可能な値になっている。

PFNコンデンサの小型化は電源の小型化だけでなく良好なパルス波形を作るのに重要である。また残留インダクタンスは出力波形の特性に大きく影響するので極力低減しなければならない。そのためブッシングを持たないプラスチックケースのNH(Non-Healing)型フィルムコンデンサ(140x110x250mm)と2重ブッシングで金属ケースのSH(Self-Healing)型<sup>[5]</sup>フィルムコンデンサ(本体240x90x182mm)の2種類が開発された。またPFNユニットの接続配線のインダクタンスも波形の特性に大きな影響を与えるので、接続ラインは幅の広い板を多用し、低インピーダンス化に努めた。

#### 3.4 サイラトロン

サイラトロンの性能から、PFNユニット1台を1本のサイラトロンでスイッチする。サイラトロンはe2V社製CX2410K又はLitton社製L4888Bで、KEK電子・陽電子リニアックで59台使用されているものである<sup>[6]</sup>。またこのサイラトロンはSLACでアノード電圧・電流は46kV、6.2kA、繰返しは120Hzで運転されている。空冷で使用する。

#### 3.5 パルストランス

コア材は厚さ $50\mu\text{m}$ の硅素鋼板を使用し、Iso巻で

標準的なバスケット型バルストランスでクライストロンオイルタンクに設置される。1次側は特性インピーダンス $3.0\Omega$ の3重平行平板線路(誘電体は油)を2並列接続した伝送ラインを通してPFN回路に接続される。また2次側は、550kV耐圧とし、バイファイラ巻きで2本のクライストロンに各々独立の巻線で接続され、各々ヒータの調整ができるようになっている。

出力パルス幅が $4.5\mu\text{s}$ と短いため、立ち上がり特性の優れたバルストランスを設計した。立ち上がり時間はバルストランスの漏れインダクタンスと分布容量の時定数で決まる。この時定数は2次側の巻線数に比例するので、サグ( $1.6\mu\text{s}$ で2%以下)とコアの断面積を考慮して1次、2次巻線数(72巻)を決定した。

### 3.6 制御システム

電源の制御はプログラマブルロジックコントローラ(PLC)で行い、操作はタッチパネルによるグラフィカルな画面ですべての制御及び動作状態の確認ができるようになっている。リモートコントロールはインターネット経由で行われる。

## 4. 性能試験

性能試験は、インバータ電源ユニット4台、PFNユニット1台、サイラトロン1台の構成(クライストロン1台のフル運転が可能)でPPM#5クライストロン1台の運転<sup>[7]</sup>を行った。図3に充電電圧35kV、繰返し150Hzで運転中のPFN充電電圧・電流波形を示す。スレーブのインバータ電源ユニットが充電停止後マスターのインバータ電源ユニットのみが充電している様子が見られる。図4に充電電圧38kV、繰返し50Hzで運転中のピーク電圧495kVのクライストロン電圧・電流波形(PFN調整後)を示す。立ち上がり時間(10-90%)は $0.9\mu\text{s}$ 、パルス幅は $4.5\mu\text{s}$ 、電圧安定度(短時間)は $\pm 0.15\%$ と仕様を満足する結果が得られた。

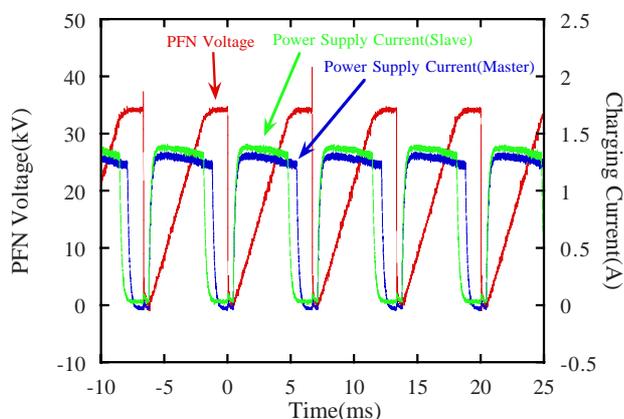


図3：PFN充電電圧・電流波形

現在、クライストロンのエイジングをしながら、電源の試験運転が続けられている。PPM#5クライ

ストロンのRFパワーは50Hzで47.5MWを達成した。

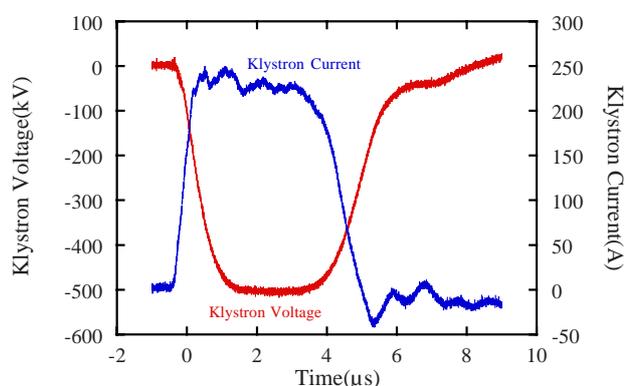


図4：クライストロン電圧・電流波形

## 5. まとめ

GLCTA用に小型で高信頼性のXバンドクライストロン用大電力パルス電源を製作した。現在、半分の能力で運転しているが、今年度後半にユニット等の増設を行いクライストロン2台のフル運転を予定している。今後、この電源はクライストロンの開発、RFシステムの試験に使用される。

## 謝辞

この電源の設計、製作には日新電機(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、運転においては、GLCTA関係者到大変な御協力を得ました。あらためて感謝いたします。

## 参考文献

- [1] S. Fukuda et al., "R&D Plan of RF Source in KEK GLCTA", in these proceedings.
- [2] 中島啓光 他, "小型パルス電源の特性と今後の課題", Proceedings of the 28<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (2003)48-50.
- [3] Y. Chin et al., "X-band PPM Klystron Development for JLC", Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, (2001)3792-3794.
- [4] 飯田謙二 他, "コンデンサ充電用インバータ電源", Proceedings of the 27<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (2002)252-254.
- [5] H. Sakaguchi, et al., "Development of SH Type PFN Capacitor for a Pulse Modulator", Proceedings of the 20<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (1995)281-283.
- [6] 明本光生 他, "KEK 8GeVリニアックでのサイラトロン使用状況", Proceedings of the 28<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (2003)321-323.
- [7] T. Saeki et al., "The PPM Klystron Operation in GLCTA", in these proceedings.