

PRESENT STATUS OF KLYSTRON MODULATORS FOR THE KEK ELECTRON-POSITRON INJECTOR LINAC

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 present status of klystron modulators for the KEK electron-positron injector linac. A total of 60 klystron modulators are under continuous operation for KEKB experiment and synchrotron radiation experiments. The accumulated high-voltage run-time of the modulators has reached approximately 68 k hours in June 2008. The status of 50 kV, 30 kJ/s switching power supplies for C-band klystron modulator is also presented.

KEK電子・陽電子入射器用クライストロン電源の現状

1. はじめに

KEK電子・陽電子入射器は1998年秋よりB物理実験のためにKEKBリングに8 GeVの電子ビームと3.5 GeVの陽電子ビームを入射している。またPF及びPF-ARにそれぞれ2.5 GeV及び3 GeVの電子ビームを供給している。入射器はRF源として最大50 MW、パルス幅4 μ s、繰り返し50ppsのマイクロ波を出力するSバンドクライストロンを使用し、それを駆動する60台のPFNタイプのパルス電源が設置されている。その運転時間（高圧印加時間）は約68 k時間（1998年9月から2008年6月末まで）に達する。

現在、SuperKEKB計画のための陽電子8 GeV化を目的としたC-band加速システムの開発が進められている。このシステムではクライストロン電源の小型化が要求され、そのためPFNの充電電源として19インチラックに収まる小型の50 kV、30 kJ/sスイッチング電源を採用した。これによって現行の電源の約1/3のサイズになり要求を満たすことが出来た。2003年より入射器の4-4ユニット部でシステムの試験運転が続けられている。

本稿では2007年度を中心に、クライストロン電源の運転状況、現在開発中のスイッチング電源の状況について報告する。

2. 運転の状況

現在、入射器は年間運転時間が7,000時間を超える運転が順調に行われている^[1]。2007年度、運転中に発生したクライストロン電源に直接関係するトラブルは57件で、図1にその内訳を示す。但し、CTと4-4ユニット部のスイッチング電源のトラブルに関連したものは含まれていない。一番のトラブルはサイラトロン関係で、全体の約6割を占める。その中身はキープアライブ電流の調整等(20件、サイラトロン関係内63%)、サイラトロン不良による交換(10件、31%)、冷却ファン交換等(2件、6%)である。サイラ

トロン^[2]については3章で詳しく述べる。二番目におおいいのはIVR(誘導電圧調整器)で、その内約8割(6件)が機械的な不良によるトラブルであった。ナイフスイッチのトラブルは主電力AC200V,3相のナイフスイッチの接触部で60度を超える発熱トラブルである。現在、IVRとナイフスイッチは重故障を未然に防ぐため、非接触の放射温度計で温度異常がないか、1ヶ月定期検査を実施している。

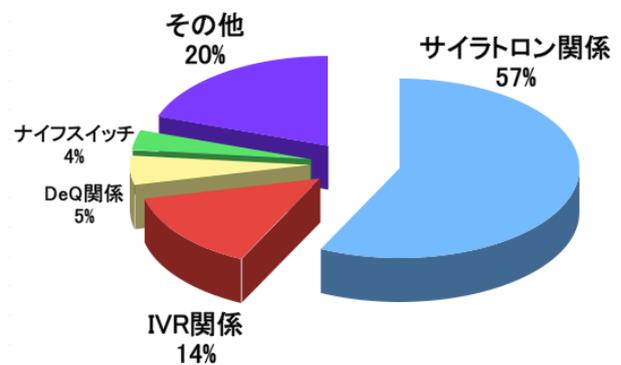


図1：クライストロン電源トラブルの内訳

3. サイラトロン

3.1 概況

過去10年間に於いては毎年平均13本サイラトロンを購入している。2004年度より、すべてのサイラトロンは受け入れ試験を実施し合格したもののみを使用している。運転に大きな影響を与える重要な電源で使用されるサイラトロンについては寿命故障による運転停止を避けるために、2年置き(約14,000時間運転)に事前交換(合計8台)を2001年度より実施し

¹ E-mail: mitsuo.akemoto@kek.jp

ている。2007年度はその年で、8台を交換した。交換したサイラトロンはスタンバイ用電源等に再使用する。サイラトロンの維持管理で大変重要なのはサイラトロンの定期的な検査、調整である。入射器では年1回(9月ごろ)のレンジング(リザーバ電圧調整)、年3回(3,6,12月末)のクライストロン出力波形測定によるジッタの測定と調整、トリガータイミングの確認を実施している。

3.2 寿命と故障状況

図2に1998年9月～2008年2月までの故障したサイラトロン74台の寿命分布を示す。平均寿命は33.4k時間である。このデータからサイラトロンの品質は大変大きなバラツキがあることが分かる。運転管理に於いては、十分な予備球を準備する必要がある。

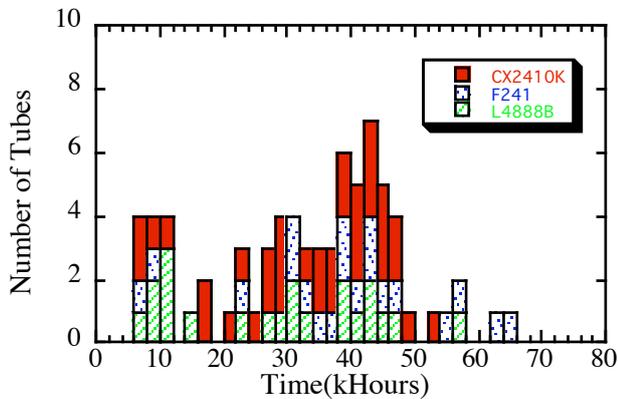


図2：故障したサイラトロンの寿命分布

図3に故障したサイラトロンの内訳を示す。耐圧不良が約3割を占める。この故障は寿命が短いものが多く属している。キープアライブ故障はキープアライブ電流が流れない状態になって、スイッチングが不安定になるもので、寿命が長いものが多く属している。G1放電はCX2410K特有の故障で、G1電極接続端子とカソードフランジでアーク放電する。これはG1カソードの構造に起因した問題であることが判明したので、これを改善した新しいサイラトロンCX2411Kを、CX2410Kの後継サイラトロンとして2007年度より使用している。

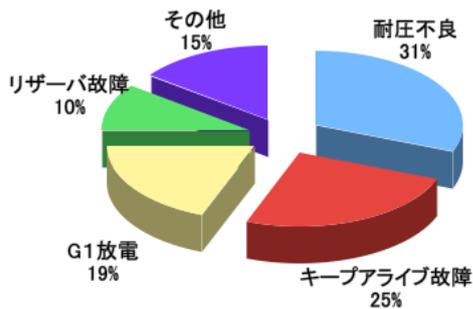


図3：故障したサイラトロンの内訳

4. スイッチング電源

4.1 概要

現在使用しているスイッチング電源は、東芝電波プロダクツが開発した50 kV, 30 kJ/sスイッチング電源^[3]をベースにして開発を進めている。表1にスイッチング電源の主な仕様を示す。2002年度に1号機が完成して以来、これまでに合計11台が製造された。図4にCバンドクライストロン電源^[4]に装着したスイッチング電源を示す。この電源は一体型の19インチラック装着構造で、脱着を容易するため、高圧ケーブル及び制御ケーブルがコネクタ接続になっている。電源に異常があった場合、交換によってすぐ運転復帰できるメンテナンス性を重視した設計になっている。

表1：スイッチング電源の主な仕様

| | |
|--------|---|
| 定格出力電圧 | 50 kV |
| 出力電力容量 | 30 kJ/s |
| 電圧安定度 | 0.2%(P-P) |
| 効率 | 80% 以上 |
| 力率 | 85% 以上 |
| 入力 | AC420V, 50Hz, 3相 |
| 冷却方式 | 水、5 l/min. |
| 寸法 | 幅：19インチラック マウントタイプ 奥行：630 mm 高さ：449 mm |
| 運転方式 | 並列運転も可 |



図4：Cバンドクライストロン電源

図5にスイッチング電源の回路構成を示す。方式はIGBTを使用したフルブリッジインバータ回路方式である。AC420Vラインからの電力を先ずDCに変換し、それを約33 KHzのスイッチング周波数でインバータした後、高圧パルストランスに入力して昇圧し、その後高圧整流ダイオードを通して整流して最大電圧50 kVまでPFNを充電する。高圧パルストランスと高圧整流ダイオードは絶縁油の入った高圧トランスユニットに内蔵されている。

2003年度より、パルス電源の電力の増強にも容易に対応出来るように、スイッチング電源の並列運転も可能にするための制御系の改造を実施した。また、PFNの正確な充電電圧で安定化出来るように、2005年度にはPFNの電圧プローブ信号をスイッチング電源のリファレンス信号として直接入力できる方式に改造した。

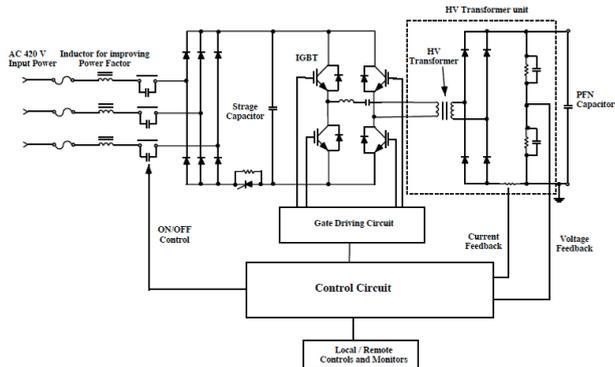


図5：スイッチング電源の回路構成

4.2 使用状況と故障

スイッチング電源は入射器のいろいろなクライストロン電源に組み込まれて使用されている。入射器のCTユニット部(仮電子入射部のプリバンチャー用)、4-4ユニット部のCバンドクライストロン電源では実運転を実施している。ここでは、故障に備えて、予備の電源を用意し、長期運転性能の評価を行っている。クライストロン組立ホールでは、Sバンドクライストロン電源、Xバンドクライストロン電源に各1台ずつ使用している。また、NextefのXバンドクライストロン電源では2台並列運転で使用している。

初期の段階では、IGBTスイッチの両導通による短絡でIGBTが破損する故障が多発した。この故障に対してはIGBTを短絡保証型に変更すると共に、ドライブ回路が誤動作しないよう保護回路を強化した。この改良によって、ほぼ起きなくなった。今、最も大きな問題になっているのは、約1,000~5,000時間運転後に、図6に示すような充電電流が充電途中で急激に減少する異常が現れ、その後定常化し、最後は所定の充電電圧に充電が出来なくなる故障である。この故障は高圧トランスユニット内の最高電位部にある高圧整流ダイオードを破損(短絡)していることが多く、中には高圧パルストランスの巻線部も破損する場合もある。この故障は約17,000時間と比較的長寿命であった2号機においても同様に起き、すべての電源で発生している。現在、この原因調査を行っている最中で、第一要因はまだ判明していない。この故障の特徴は短時間の運転では起こらないこと、そして平均出力電力の大きさに比例して故障が早く現れる傾向があることから、熱的な問題が深く関わっているものと考えられる。特に、この電源は小型化を重視したため、高圧トランスユニットの高さが大幅に制約され、高圧パルストランスを横置にし

ているため排熱において厳しい設計になっている。

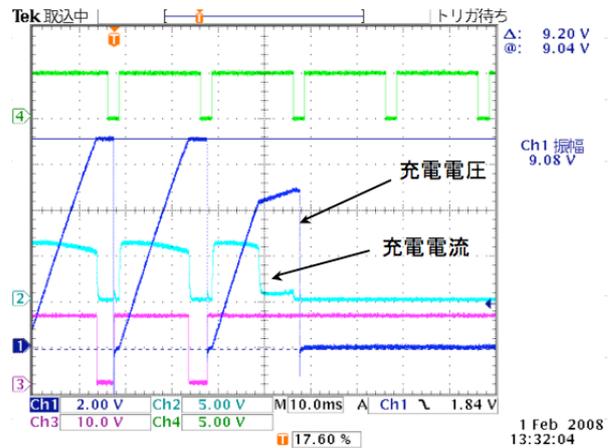


図6：充電電流の異常減少波形の例
(充電電圧:10 kV/div, 充電電流:1A/div)

4.3 今後の予定

原因究明を進めているが、故障箇所である高圧トランスユニットの設計を全面的に見直し、温度上昇を低減させるような配置、構造、コア材質、巻線材質の検討を行った。その結果、発熱量低減のため、2次巻線の線種を太く、短くし銅損を低減し、また形状、寸法の制約、鉄損からアモルファスを採用することにした。また排熱効率を上げるために、高圧トランスを縦置きとし、タンクのヒートシンクを強化する。今後、高圧トランスユニットの試作、評価試験を行い、今年末に電源1台を改造して試験する予定である。

5. まとめ

KEK電子・陽電子入射器用クライストロン電源は順調に運転されている。運転維持でトラブルの割合が多いのはサイラトロン関連であるが、最小コスト、最大寿命になるよう改善が行われている。また入射器で開発中のスイッチング電源は実用化に向けて改良が進められている。

参考文献

- [1] 小川雄二郎, “KEK電子・陽電子入射器の現状”, 本研究会, 2008
- [2] 東福知之 他, “KEK電子陽電子入射器におけるクライストロンおよびサイラトロンの維持管理(II)”, 本研究会, 2008.
- [3] 飯田謙二 他, “コンデンサ充電用インバータ電源”, Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.252-254, 2002.
- [4] 中島啓光 他, “小型パルス電源の特性と今後の課題”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp. 48-50, 2003.