

KEK 電子陽電子入射器モジュレータ用インバータ電源の現状

PRESENT STATUS OF INVERTER POWER SUPPLIES FOR MODULATORS IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC

川村真人^{#,A)}, 明本光生^{A)}, 中島啓光^{A)}, 今井康雄^{B)}, 東福知之^{B)}, 馬場昌夫^{B)}, 諸富哲夫^{B)},
遠藤治^{C)}, 秋川藤志^{C)}, 佐藤和行^{C)}, 高山智也^{D)}
Masato Kawamura^{#,A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Yasuo Imai^{B)}, Tomoyuki Toufuku^{B)}, Masao Baba^{B)},
Tetsuo Morotomi^{B)}, Osamu Endo^{C)}, Hisashi Akikawa^{C)}, Kazuyuki Sato^{C)}, Tomoya Takayama^{D)}

^{A)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

^{C)} Nihon koushuha Co., Ltd.

^{D)} Toshiba Electro-wave Products Co., Ltd.

Abstract

In the KEK electron-positron linac, twelve inverter power supplies (inverter PSs) have been used for the condenser chargers (such as pulse forming network condenser chargers, etc.) in modulators during this ten months. The inverter PSs are contributing to miniature of the modulators. In last October, two inverter PSs broke down. The diodes in the inverter PSs short-circuited. It seemed that the causes of the short of diodes were trash in the oil tank. After considering the troubleshooting of the short of diodes, sixteen inverter PSs were repaired, and two new inverter PSs were produced and operated. However, problems are still left, and further consideration is needed.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器では、2016 年 7 月の運転終了時点で 58 台のモジュレータを使用している。モジュレータの負荷はクライストロン、フラックス・コンセントレータ(FC)、電子銃である。このうち 12 台のモジュレータで PFN (パルス成形回路) 等のコンデンサの充電器にインバータ電源[1]-[5]を使用しており、うち 1 台は電子銃用に日本高周波製の高精度型インバータ電源[5]を使用している。インバータ電源を用いることでモジュレータの小型化が実現し、底面積が約 1/3 となっている[2]。その他、テストステーションで 5 台のインバータ電源を使用している。今後は更に、入射器で FC 用 1 台、低速陽電子加速器クライストロン用 1 台の、計 2 台のインバータ電源の使用が予定されている。

インバータ電源は 2002 年度から使用を開始している。2016 年 8 月現在、東芝製[3]が 16 台、日本高周波製[4][5]が 18 台あり、9 月末に更に 1 台完成・納品の予定である。

本論文では、過去 1 年の運転状況を中心に、インバータ電源の現状を報告する。

2. 日本高周波製インバータ電源の概要

日本高周波製インバータ電源については、論文[4]、[5]に詳述されているので、以下仕様等を概説する。現状では「スイッチング電源」[2][4]、「パルス変調器用コンデンサ充電器」[5]等の名称が混在しているが、本論文では「インバータ電源」[1][3]とする。

KEK で使用している日本高周波製インバータ電源は、15 台の通常型[4]と 2 台の高精度型[5]、1 台の FC 用、

の 3 タイプがある。高精度型は主電源に小型の補電源を追加する形になっており、主・補の両電源を連動させて電圧安定度を高めている。主電源は主要機器が通常型と同じであり、主・補電源間の制御コネクタのみが異なる。現在、当該コネクタを変更して、通常型を高精度用主電源として使用できるよう、改修を行っている。

Table 1 に通常型、Table 2 に高精度型の各インバータ電源の主な仕様を示す。定格出力 43kV での安定度が通常型 0.2%p-p、高精度型 0.03%p-p であり、機器の高さが通常型 680mm、高精度型 980mm(300mm 増、44%増)である。Figure 1 に通常型、高精度型の各インバータ電源の外形を示す。

Table 1: Specification of Inverter PS (for 0.62μF load) [4]

Input voltage	AC 420V±5% (3-phase)
Charging power	30 kJ/s
Output voltage	43kV
Average output current	1.6A
Repetition rate	50pps
Output voltage stability	0.2%p-p (at 43kV)
Cooling water	5L/min
Size	480mm x 760mm x 680mm

[#] masato.kawamura@kek.jp

Table 2: Specification of Highly Precise Inverter PS (for 0.62μF load) [5]

Input voltage	AC 420V±5% (3-phase)
Charging power	35 kJ/s (Main : 30kJ/s , Sub : 5kJ/s)
Output voltage	43kV
Average output current	1.8A (Main :1.6A , Sub : 0.2A)
Repetition rate	50pps
Output voltage stability	0.03%p-p (at 43kV)
Cooling	Water 5L/min (Main) Air (Sub)
Size	480mm x 760mm x 980mm



Figure 1: Outward appearances of Inverter PS (left) and Highly Precise Inverter PS (right).

Figure 2, Figure 3 に通常型(高精度型主電源と同じ)、高精度型補電源の構成図を示す。何れも、整流部、高速インバータ、高電圧発生部で構成されている。

整流部は 3 相 AC420V 入力を DC600V に変換する。インバータ部は IGBT を用いた直列共振回路となっている。通常型は補電源に比べて電流が大きい(定格値、通常型 1.6A、補電源 0.2A)ので 2 並列になっている。スイッチング周波数は、通常型が 20kHz の固定、補電源が 35~17.5kHz の可変となっている。

高電圧発生部は、高周波トランスとダイオードブリッジより成り、最大 43kV を出力する。

Figure 4 に高精度型のブロック図を示す。負荷や上位制御との接続は全て補電源に集約されている。主電源の出力は補電源内部を経由する。また、主電源の制御用信号も補電源が生成する。主電源で発生したインタロック信号なども補電源を経由して一括して上位に送られる。

高精度型の制御部とモジュレータの制御部は光ケーブルで接続しており、一方通常型は電気ケーブルで接続しているので、入れ替える際に、モジュレータ側の制御モジュールを変更する必要がある。

他に FC 用があり、通常型とほぼ同型で定格出力電圧

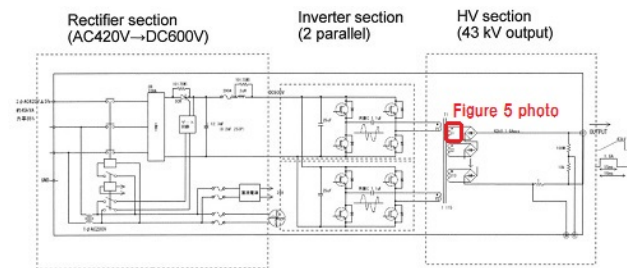


Figure 2: Schematic diagram of Inverter PS [4].

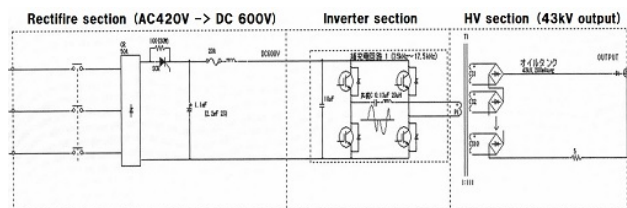


Figure 3: Schematic diagram of Sub PS in Highly Precise Inverter PS [5].

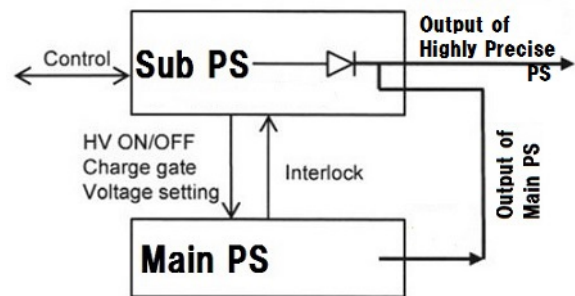


Figure 4: Block diagram of Highly Precise Inverter PS [5].

が 20kV である。

入射器のステーション(KL_15)において、通常型の出力安定度 0.13%が確認された。

3. KEK 電子陽電子入射器用インバータ電源の、過去 1 年の運転状況概要

入射器の過去 1 年の運転は、2015 年 9 月 24 日から 2016 年 7 月 1 日まで行われた。途中、12 月 21 日から 1 月 25 日まで(年末・年始の休みおよび冬季メンテナンス)、4 月 28 日から 5 月 6 日まで(ゴールデンウィーク期間)休止があり、他に木曜日にメンテナンス日が設けられ(期間内に 12 回)、地下 beam line 入室時はモジュレータの HV が off されたが、それ以外は概ね連続運転が行われた。立上げ日、立下げ日も 1 日と見なした期間内の運転日数は 241 日だった。

インバータ電源の設置されたモジュレータの運転時間(HN on 時間)は、

- クライストロン負荷機の平均運転時間 5349.9 h 。
- FC 負荷機、4639.8 h 。

であった。

インバータ電源故障・交換に伴う運転停止は、発生順

に下記の5回だった。何れも日本高周波製インバータ電源だった。

- 高精度2号機、KL_A1_Aステーション、2015年10月15日。
- 7号機、KL_15ステーション、2015年10月21日。
- 1号機、KL_33ステーション、2016年1月25日。
- 5号機、KL_15ステーション、2016年2月9日。
- 14号機、KL_17ステーション、2016年4月13日。

上記のうち、高精度2号機、7号機、5号機の不具合については5章5.1項で述べる。

1号機の不具合は、コネクタの接触不良が原因と見られた。14号機の不具合は、「TEMP」(IGBT冷却用水冷銅板が80°C以上になったことを意味する)のインタロックによりHV offし、offの際タッチパネル表示が短時間に切り替わる、という症状だったが、KL_17ステーションから撤去後、日本高周波工場を含め他のステーションでは症状が再現せず、現在も試験運転継続中である。

その他のHV off現象でインバータ電源からのインタロック信号に依るものは、141回(1.71日に1回)だった。インバータ電源の設定変更によるHV offの低減については5章5.2項で述べる。

2016年5月6日から6月21日までの期間、KL_34ステーションのHV off現象は24回で、最終的にモジュレータ内の電圧モニタ用高圧プローブの不具合が原因であることが分かった。

4. 東芝製インバータ電源の運転状況

東芝製インバータ電源は、2台(14号機と16号機)を全期間、3台を日本高周波製機の点検・清掃の際(2016年1~3月)に置き換えて運転した(運転時間は3号機722.0h、6号機723.5h、7号機1050.0h)。いずれも不具合は無かった。

2015年6月に3台(1号機、5号機、12号機)相次いでPFN充電電圧の変動が見られたので、調査・修理を行った。1号機、5号機は1度同様の不具合が出て改修を行ったもの、12号機は初めての不具合だった。東芝にて高圧検出ユニットの分圧用マイカコンデンサを取りはずし単体調査したところ、1つのコンデンサの漏れ電流が増加しているのを確認した。解体解析を行ったところ、コロナ放電痕が確認され、絶縁劣化の原因はコロナ放電によるものと推定された。マイカコンデンサ8個の交換等を行い、2016年3月に納品された。5号機については、なお絶縁油漏れが見られたので、2016年7月末時点で改修中である。

5. 日本高周波製インバータ電源の運転状況

5.1 ダイオードの破損による故障と改修の経過

2015年10月15日に高精度2号機が、10月20日に7号機が、相次いで故障し運転不能となった。故障時の波形では、何れもコンデンサ充電時、インバータ電流が減少して充電時間が遅くなるのが確認された。

故障機2台を日本高周波にて確認したところ、何れも、

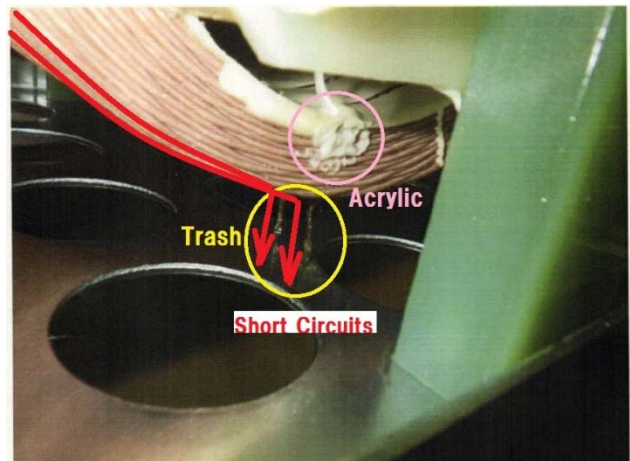


Figure 5: Adherent alien substances at lower part of transformer.

- 高圧整流用ダイオードの高圧側が故障・短絡していた。
- 高圧トランス下部とサポート金具の間に、ゴミが柱状に形成されていた。また白い弾力のある物質も付着していた(Figure 5参照)。7号機ではダイオード基板に半透明の物質が付着していた。
- 絶縁油タンクの底に水滴が見られた。

ダイオードの破損は高圧トランス2次巻き線の一番高圧側とサポート金具間にゴミが付着した事により、放電が起こり、その結果高圧側のダイオードが破損した、と推定された。

成分分析を行ったところ、ゴミは一般的な繊維ゴミであり、また、トランスに付着した白い弾力のある物質やダイオード基板に付着した半透明の物質はアクリル材であった。アクリル材はトランス1次側巻線の絶縁紙固定に使用しているアクリル系粘着剤が溶け出したものと見られた。他に、2016年1月25日に5号機が不具合を起こし、分解の結果、同様の症状が見られた。

冬季メンテナンス期間を利用して、入射器で運転していた10台の内部点検を行った。高圧トランス下部に柱状ゴミが見られたのが10台全て、絶縁油タンク底に水滴が見られたのが7台あった。これらは清掃の後返却された。

故障機2台の改修は以下の通りである。故障したダイオードの交換の他、主に下記の点の改善・変更等を行った。

- ゴミ対策として、組立作業を恒温槽内で行う。作業員の衣服も塵埃の付かないもの(不織布の作業服など)とする。ブラックライトで塵埃が無い確認する。絶縁油にゴミ、水分等が無い確認して使用する。
- 絶縁紙固定用接着剤を、アクリル系の物からエポキシ系の物に変更する。
- サポート金具を改修し、繊維ゴミが付着していた部品間の空間距離を30mm以上確保する。
- 水漏れ対策として、水冷銅板で、ロー付けした水管をハンダ付けしたものから、1本のパイプで製作したものに変更する。

故障した 2 台については改修後 KEK に返却され、1 台(7 号機)の試運転後再度内部確認したところ不具合が見られなかったため、昨年度発注した 2 台については改修部分を反映させて製造された(13、14 号機)。

2016 年 4 月 1 日から、残りの分の改修を、1 週間 1 台のペースで行った。

運転終了後の 2016 年 7 月 4 日、連続運転の比較的長かった 4 台(7 号機、9 号機、13 号機、高精度 2 号機)の内部を日本高周波にて確認したところ、9 号機、高精度 2 号機のトランスに付着物、7 号機、9 号機の絶縁油タンク底面に沈殿物が見られた。成分分析の結果、トランスの付着物はエポキシ系物資・人の毛髪、絶縁油タンク底面の沈殿物は水性成分や、各種金属(Ni、Cu、Fe、Mn)の成分、リン(P)の成分が見られた。今後更なる検討が必要となる。

5.2 設定変更による HV off 回数の低減

異常充電検知回数を 1 回から 2 回に変更する作業を、2015 年 11 月 2 日から 11 月 16 日にかけて随時行った。インバータ電源からのインタロック信号に依る HV off の回数は、9 月 24 日から 11 月 2 日までの 40 日間で 57 回(0.70 日に 1 回)だったのに対し、11 月 2 日から 12 月 21 日までの 50 日間で 28 回(1.79 日に 1 回)と、約 40%まで抑えられた。

6. まとめ

KEK 電子陽電子入射器で使用しているインバータ電源について、過去 1 年間の状況を報告した。

日本高周波製インバータ電源については、2015 年 10 月における 2 台の故障から 9 か月間を通し、不具合の検討や改修作業を行ったが、まだ問題点が残っており、今後も検討が必要である。

東芝製インバータ電源については、今のところテストステーションを含めた運転機に不具合は生じていない。5 号機の油漏れの解決が待たれる状況である。

参考文献

- [1] 中島啓光 他、第 28 回リニアック技術研究会(2003)、WD-4;
http://www.pasj.jp/web_publish/lam28/proceedings/WD-4.pdf
- [2] 明本光生 他、第 5 回日本加速器学会年会・第 33 回リニアック技術研究会(2008)、TP094;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/contents/PDF/TP/TP094.pdf
- [3] 飯田謙二 他、第 27 回リニアック技術研究会(2002)、7P-47;
http://www.pasj.jp/web_publish/lam27/PDF/7P-47.pdf
- [4] 遠藤治 他、第 10 回日本加速器学会年会(2013)、SAP065;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SAP0/SAP065.pdf
- [5] 秋川藤志 他、第 11 回日本加速器学会年会(2014)、THP066;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP066.pdf