

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 (2)

PRESENT STATUS OF INVERTER POWER SUPPLIES FOR MODULATORS IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC (2)

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 Koshuha Co., Ltd.

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

Abstract

This report describes the specifications and operating status of the inverter power supplies for modulators in the KEK electron-positron linac. The important problems are the measure to overcome the breakdown of diodes in Nihon Koshuha machines, and the deliberate exchange of the capacitors in the voltage monitoring circuits in Toshiba machines.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器において、2017 年 5 月中旬の運転終了時点で 13 台のインバータ電源[1]-[6]が使用され、更に低速陽電子実験施設専用ライナックに 1 台、テストスタンドに 5 台が使用された。また、2017 年 10 月からの SuperKEKB Phase-II の運転では、入射器にインバータ電源 2 台が追加される予定である。

前回、本インバータ電源について 2016 年 8 月初めまでの状況を報告した[1]。本論文では、2017 年 7 月下旬までの 1 年で、新たに得られた知見等を中心に報告する。

2. インバータ電源の概要

KEK 電子陽電子入射器には 2017 年 3 月末までに、日本高周波製 21 台(高精度機 2 台、フラックスコンセントレータ電源[7]専用機 1 台を含む)、東芝製(東芝電波プロダクツ製) 16 台が納品されている。これらのインバータ電源はクライストロン、フラックスコンセントレータ、電子銃を負荷としたモジュレータにおいて、PFN(パルス成形回路)等のコンデンサの充電器として使用されている。

2.1 インバータ電源の仕様

日本高周波製の通常型と高精度型の外形写真を Figure 1 に示す。主な仕様について通常型[1][5]を Table 1 に、高精度型[1][6]を Table 2 に示す。高精度型は Figure 1 の通り、下側の主電源と上側の補電源を積み重ねた構造になっている。高精度型の主電源と通常型は現在、完全に同一で交換が可能である。このため、高精度型主電源に通常型の通し番号を付けて一括管理している。

通常型(及び高精度型主電源)の構成図[1][5]を Figure 2 に、高精度型補電源の構成図[1][6]を Figure 3 に示す。何れも、整流部、高速インバータ部、高電圧発



(a) Front view



(b) Rear view

Figure 1: Outward appearances of Inverter PS (shorter one) and Highly Precise Inverter PS (taller one).

[#] masato.kawamura@kek.jp

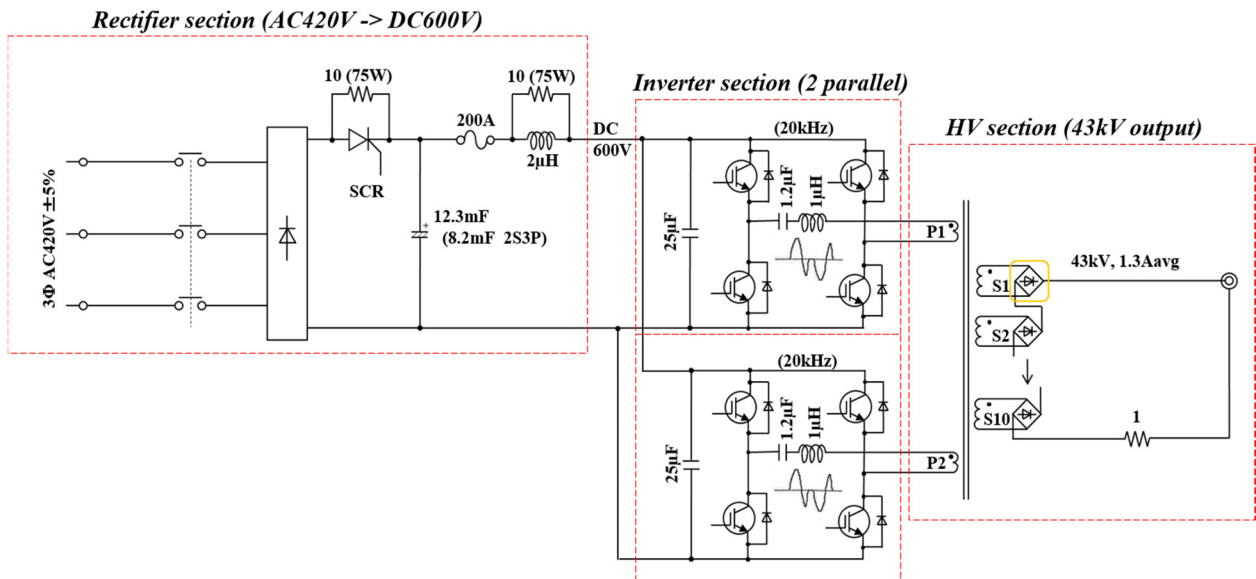


Figure 2: Schematic diagram of Inverter PS.

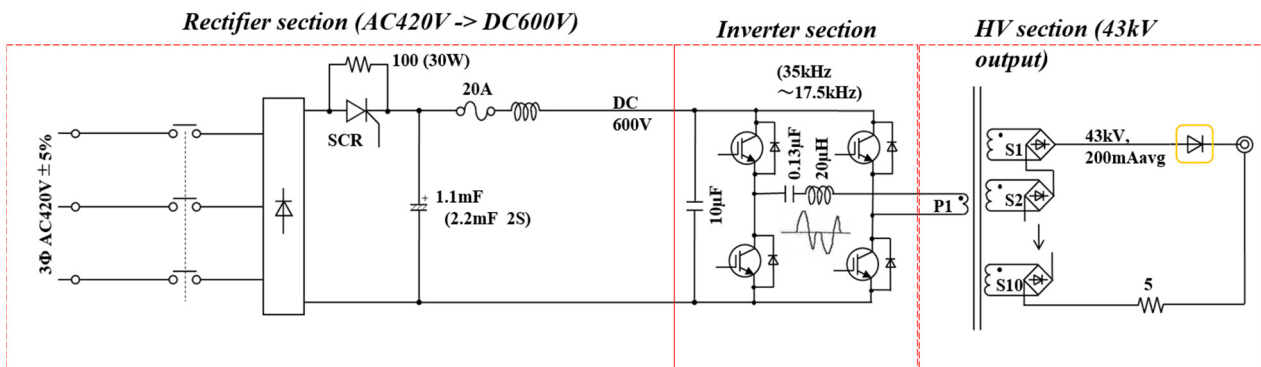


Figure 3: Schematic diagram of Sub PS in highly precise Inverter PS.

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

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

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

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

生部で構成されている。高速インバータ部は IGBT を用いた直列共振回路であり、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。

高精度型のブロック図[1][6]を Figure 4 に示す。

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。

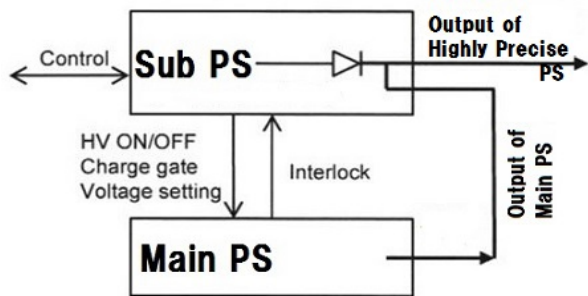


Figure 4: Block diagram of Highly Precise Inverter PS.

他にフラックスコンセントレータ電源専用機 (FC 機) があり、通常型とほぼ同型で定格出力電圧が 20kV である。

2.2 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、2016 年 10 月 3 日から 2017 年 5 月 15 日まで行われた。途中 2016 年 12 月 19 日から 2017 年 1 月 30 日まで、2017 年 3 月 10 日から 4 月 3 日まで運転が休止された。立上げ日、立下げ日を含めた運転日数は 161 日だった。

インバータ電源の HV on 時間の平均は 3574.5h だった。期間内に「インバータ電源過電流保護」(“InvOCP”、モジュレータのスイッチ素子であるサイトロン[®]の自爆時などに発報する) のインタロックによる HV off は 90 回あり、1.8 日に 1 回の割合だった。

インバータ電源通常型の波形の例を Figure 5 に示す。青が PFN 充電電圧、水色がインバータ電流、緑が Charging gate 信号(この信号に同期して PFN のコンデンサが充電される)、赤が充電完了信号である。

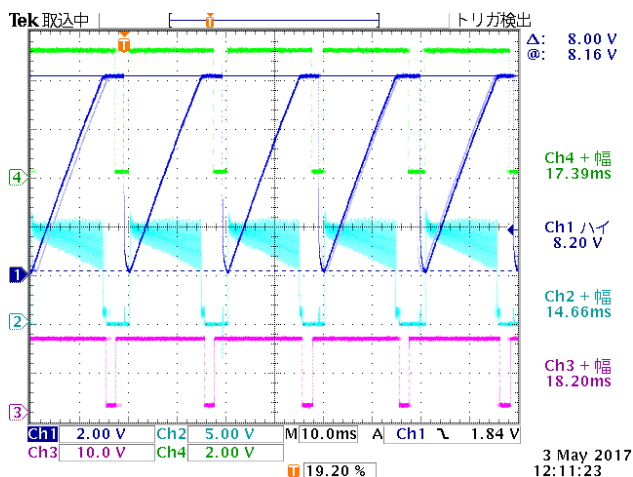


Figure 5: Waveforms of input-output signals of Inverter PS.

3. 東芝製インバータ電源の運転状況

入射器における東芝製インバータ電源の運転状況は以下の通りである。

- 14 号機、2016 年 10 月 29 日(土)早朝に出力不安

定となる不具合が発生し、5 号機と交換。5 号機は 2017 年 3 月 10 日まで運転(KL_3T ステーション)。

- 16 号機、2017 年 3 月 10 日まで運転、その後、日本高周波製 18 号機と交換 (KL_34 ステーション)。
- 12 号機、性能を確認するため、2016 年 12 月 28 日から 2017 年 5 月 15 日まで運転。重大な不具合は無く、今後の運転における予備品とする(KL_15 ステーション)。

14 号機の不具合は、2015 年度に改修を行った 3 台(1 号機、5 号機、12 号機)の不具合と類似しており、高圧検出ユニット内の分圧用マイカコンデンサの絶縁劣化[1]が疑われた。結局東芝電波プロダクツにて異常の兆候は確認できなかったが、KEK で異常波形が観測された事を重く見てマイカコンデンサを交換した。同時に 2 台のインバータ電源(3、7 号機) も交換した。

今後、全ての東芝製インバータ電源のマイカコンデンサを交換する予定である。

4. 日本高周波製インバータ電源の運転状況

入射器における日本高周波製インバータ電源の使用台数は、低速陽電子実験施設専用ライナックを含め、過去 1 年間、概ね 12 台だった。また新品を 2016 年 9 月に 1 台 (17 号機)、2017 年 3 月に 2 台(18、19 号機)購入した。

4.1 安定度の測定

2016 年 11 月 7 日 (月)、KL_A1_A ステーションにて、通常型(10 号機)と高精度型(主電源 15 号機+補電源 2 号機)の入替えを行い、その際両方の出力電圧 (PFN 充電電圧)の安定度を測定した。測定結果は以下の通り。

- 通常型 10 号機、0.14~0.38% (約 10 分)。
- 高精度型(主電源 15 号機+補電源 2 号機)、0.04~0.22% (約 10 分)。

高精度型の安定度を測定した際の波形を Figure 6 に示す。

仕様値 (通常型 0.2%、高精度型 0.03%) と比較して若干大きく、また測定値に幅があるのは、trigger 信号が時間軸に対して常に振動しているためと見られる。またこの時間軸に対する振動は運転中に入射器全体で見られている。

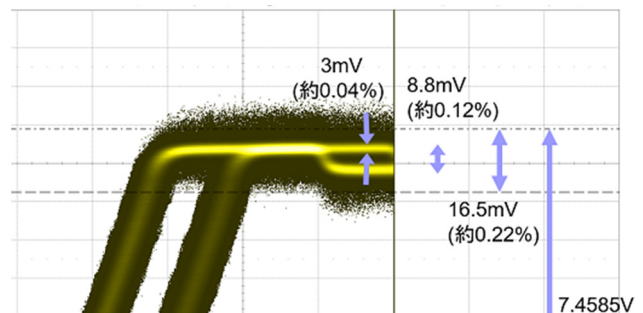


Figure 6: Waveforms for measuring of voltage stability charged by highly precise inverter PS.

4.2 12号機の高圧整流ダイオード故障

過去1年間の運転で、特に報告すべき不具合は「12号機の高圧整流ダイオード故障」である。

2016年11月3日(木)20時台にHV downした。再立ち上げしてもHV downを繰り返し、HV down時の波形を見るとインバータ電流が減少していた。また、設定電圧を下げ(40.0kV → 35.0kV)立ち上げたところ数秒で異音(内部をたたくような音)が発生した。インバータ電源自体の不調と判断して交換した。交換時点の12号機の総運転時間が4454.8h、前回の報告で述べた改善・変更[1]後の運転時間が1759.3hであった。

日本高周波にて調査したところ、

- オイルタンク内部をクリアケース移して試運転を行い、充電電圧40kV設定時に高圧整流ダイオード基板付近で放電を確認した(高圧整流ダイオードはFigure 2のオレンジ色枠内)。
- 高圧整流ダイオード(全波整流器、HVCA製4HVF15KEUF)全10個のうち、高圧側の2個(CR1、CR2)が破損していた。CR1、CR2の各4回路のうち2回路ずつ(計4ヶ所)で絶縁耐圧不良が発生しており(抵抗値0.34Ω～58.93Ω)、該当箇所のモールド外面に亀裂や欠けが見られた。CR1に直面する水冷銅板に放電痕が確認された。
- 高圧トランス2次巻き線にゴミ等は見られなかった。
- オイルタンク底面に水分が溜まっていた。

2015年度にインバータ電源2台(高精度2号機、7号機)の不具合が発生し高圧整流ダイオードが破損した際は、高圧トランス2次巻き線のゴミが原因と判断していた[1]が、今回は当該のゴミ等が見られなかったため、別の故障原因を追究する必要が生じた。

故障品2個について、地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター(都産技研)[8]の、ナノフォーカスX線CT装置[9]を用いて非破壊検査を行った。都産技研で当該X線CT装置を用いて撮影した画像データをブルーレイディスクに保存してもらい、利用者が各自パソコンに無料のビューワ(Volume Graphics製myVGL[10])をダウンロードして分析を行った。

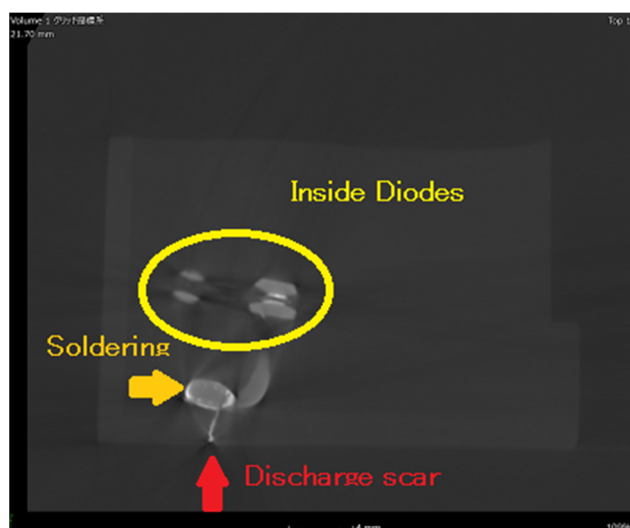


Figure 7: X-ray CT picture of CR2 diode.

画像データの一例をFigure 7に示す。比較対象として、未使用の高圧整流ダイオード1個の撮影も依頼した。

画像分析で判明した事を以下に述べる。故障品の内部ダイオード自体の破損は見られず、隣接した内部ダイオードの端子同士を半田付けしたと見られる箇所付近に放電痕を確認した。放電痕はモールド外面の亀裂や欠けの箇所と良く一致した。

破損の過程は、現在のところ以下のように考えられる。

- 半田付け部に、局所的に高電圧が発生して放電が起こり、放電痕やモールド外面の亀裂・欠けが生じた。
- これらの影響で回路の絶縁破壊が生じた。

対策として、内部部品の形状・配置等を見直し、ダイオードと水冷銅板の絶縁距離(現在12mm)を大きくする事を検討している。

4.3 その他の不具合と対策等について

- 14号機の「TEMP」(IGBT冷却用水冷銅板が80℃以上になったことを意味する)のインタロックが発報した不具合[1]について。日本高周波やKEKのテストスタンドで不具合が確認されなかった事や、不具合の発生したKL_17ステーションで新品(17号機)を運転したところ同様の現象が見られた事などから、KL_17ステーションにノイズが多いことが原因で、14号機に不具合は無いと判断している。
- KL_A1_Aステーションで高精度機を運転中、Charging gateのパルス幅が狭い場合に、主電源が出力せず、補電源のみ出力する現象が起こった(2016年11月9日(水)、2017年2月1日(水)の2度)。日本高周波でも現象が再現された。補電源の設定を調整し、主電源の出力電圧が8kVに達するまで補電源が出力しないように設定した。
- 6号機の内部から時々異音(内部より小さな放電音)が発生したため交換。日本高周波にて運転を行ったが再現しなかった(KL_33ステーション)。
- 2017年5月運転終了前にトレンドグラフを確認したところ、KL_28ステーションで運転していた8号機の出力が不安定になっていた(運転終了時の8号機総運転時間7316.1h、改修後KL_28ステーションでの運転時間1884.6h)。テストスタンドで試運転したところ出力の不安定が再現した。6月以降日本高周波で試運転が行われているが、これまで出力の不安定は再現していない。
- 日本高周波にて高精度機の改修(主電源と通常型とを完全に同一にする改修)の際、動作確認中に補電源にある逆阻止ダイオード(HVCA製HVUF25000、4本、Figure 3のオレンジ色枠内)が破損した(ショートした)。部品の交換・形状の変更などを行って絶縁距離を確保し、またオイルタンクの油量を確認するためにリザーブタンク側面に油面計を取り付けた。

4.4 先年度改修後の内部点検まとめ

2016年4月から秋にかけて、納品済の全インバータ電源を、前回の報告で述べた改善・変更[1](クリーンルームでの作業、エポキシ系の接着剤使用、等)を行った。入射器では改善が済んだインバータ電源を順次使

用し、更に一定期間運転を行った後、交換して内部確認を行っている。今年 7 月までに 11 台の点検を終えたので、結果を以下にまとめる。

オイルタンク内の沈殿物やトランスに付着物があった機器は以下の 4 台であった。

- 7 号機、改修後 3214.5h 運転。オイルタンク内に沈殿物、Ni、Cu、Fe、P、Mn、水分。
- 16 号機 (旧高精度 2 号機主電源)、改修後 3426.4h 運転。トランスに付着物、人毛。
- 9 号機、改修後 1656.6h 運転。オイルタンク内に沈殿物。Fe、Ni、水分。トランスに付着物、エポキシ成分。
- 12 号機、改修後、1759.3h で不具合発生。オイルタンク内に沈殿物、水分。

一方、残りの 7 台(2、3、5、6、8、13、15(旧高精度 1 号機主電源)各号機)に沈殿物・付着物は無かった。改修後の運転時間は 902.9h(15 号機)から 4122.5h(3 号機)まで様々である。

沈殿物・付着物があった方は、高圧整流ダイオードの破損があつて交換したもの(7、12、16 各号機)、またはタンク内に放電による煤が確認されたもの(9 号機)であった。これらの機器は今後も適宜内部点検を行う必要がある。

5. まとめ

KEK 電子陽電子入射器モジュレータ用インバータ電源について、過去 1 年間の運転状況を報告した。

東芝機は高圧検出ユニット内の分圧用マイコンコンデンサの未改修分の作業が必要であり、出来れば来年度中に終了したい状況である。

日本高周波機は高圧整流ダイオードの破損対策が現在の最重要課題となっている。その他個別の不具合もまだ見られるので、しばらく運転や点検を通じて対策を行う必要がある。

参考文献

- [1] 川村真人 他、第 13 回日本加速器学会年会(2016)、MOP032;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP032.pdf
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 明本光生 他、本研究会、TUP067.
- [8] 地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター

(都産技研);

<https://www.iri-tokyo.jp/>

[9] 都産技研 ナノフォーカス X 線 CT 装置;

<https://www.iri-tokyo.jp/setsubi/bio-h23-nfxct.html>

[10] myVGL ウェブサイト;

[https://www.volumegraphics.com/ja/](https://www.volumegraphics.com/ja/%E8%A3%BD%E5%93%81/myvgl/)

[%E8%A3%BD%E5%93%81/myvgl/](https://www.volumegraphics.com/ja/%E8%A3%BD%E5%93%81/myvgl/)