

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 (3)

PRESENT STATUS OF INVERTER POWER SUPPLIES FOR MODULATORS IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC (3)

川村真人^{#, A)}, 明本光生^{A)}, 中島啓光^{A)}, 夏井拓也^{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)}, 徳地明^{E)}

Masato Kawamura^{#, A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Takuya Natsui^{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)}, Akira Tokuchi^{E)}

^{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.

^{E)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

Abstract

In last summer the KEK electron-positron injector was connected with a new positron damping ring, and the injector had been operated from October to July. Two inverter-type klystron modulators were added for linac upgrade. The 15 inverter power supplies, including the one for slow positron facility, had been operated without serious breakdown. This report describes the present status of the power supplies, including the operation conditions, the processing and evaluation of measured output voltage data, and the report on the new power supplies.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器[1]は、SuperKEKB Phase-II [2]の運転に向けて新設された陽電子ダンピングリング (DR) [2]と、昨年 2017 年夏期メンテナンス期間中に接続された。

DR に接続するため、入射器クライストロンギャラリーにおいてクライストロン (KL) ステーションの撤去・設置を行った。具体的には、

- KL_3T ステーション (3T 電子銃に高周波電力を供給) の撤去。
- KL_DN ステーション (DR 入射部 (LTR、Linac to DR の略) の energy compression system (ECS) に供給) の設置。
- KL_DS ステーション (DR 出射部 (RTL、DR to linac) の bunch compression system (BCS) に供給) の設置。
- KL_32 ステーション (DR より下流の 3-2 部加速空洞に供給) の設置。

であり、それ以前と比べて差引き 2 ヶ所の増設となった。

増設した KL ステーションのクライストロン電源[3]はいずれも充電電源にインバータ電源[4-10]を用いたものである。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 (クライストロンを負荷としたモジュレータがクライストロン電源) 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。

本論文では、一昨年・昨年に引続き、当インバータ電

源について、今年 2018 年 7 月中旬まで行われた運転の状況、出力電圧データの処理と評価、および昨年度新規に開発した機器について報告する。

2. インバータ電源の運転状況

インバータ電源を含む KEK 電子陽電子入射器の機器は昨年 10 月 10 日から、年末年始のシャットダウンや 2 週間に 1 度程度の木曜半日メンテナンス、等を挟み、今年 7 月 17 日まで、終夜連続運転が行われた。

インバータ電源は、電子陽電子入射器および低速陽電子施設において、15 台が運転された。電源製造業者の内訳は、以下の通りであった。

- 日本高周波(株)製[9, 10]、13 台。
(12 ヶ所の KL ステーションと 1 ヶ所のフラックスコンセントレータ (FC) ステーション[11])
- 東芝電波プロダクツ(株)製[8]、2 台。
(KL_34 ステーション、低速陽電子 KL ステーション)

インバータ電源の出力設定電圧は、

- FC ステーション、8kV。
- 上記以外の 14 ステーション、35~42kV。

出力の繰返しは、

- 6 ステーション (KL_A1_A、KL_15、KL_16、KL_17、FC、低速陽電子 KL)、50pps。
- 上記以外の 9 ステーション、25pps。

であった。繰返し 50pps の運転は主に加速空洞、FC、電

[#] masato.kawamura@kek.jp

子銃等の負荷側からの要請に対応した結果であった。
当該期間の運転時間は、

- KL_DS, KL_DN 各ステーション、3720h。
- 低速陽電子 KL ステーション、4930h。
- FC ステーション、5130h。
- 上記以外の 11 ステーション、5800～6100h。

であった。この間、全インバータ電源において、撤去および予備品との取替えが必要となる重大な故障は発生しなかった。

運転期間中の、インバータ電源のインタロック発報による HV off の発生回数は、

- 電子陽電子入射器、55 回。
(内、KL_34 ステーション(東芝電波プロダクツ(株)製を使用)、25 回)
- 低速陽電子、10 回。

電子陽電子入射器にある 14 台のインバータ電源のうち、KL_34 ステーションの 1 台のみで全発生回数の 45.5% を占めている。日本高周波(株)製には「Abnormal Charging Pulse Set」機能があり、現在、1 回の異常充電発生では HV off せずリセット、2 回連続発生で HV off、と設定している。それに対し東芝電波プロダクツ(株)製にはこの機能は無い。上記 HV off 発生回数の結果より、当該機能の有効性は明らかとなっている。

3. インバータ電源出力電圧データの処理と評価

運転終了直前の今年 7 月 17 日、オシロスコープ(Tektronix 製 5 シリーズ MSO ミックスド・シグナル・オシロスコープ MSO56、アナログ帯域 1GHz)を用いて、インバータ電源出力電圧データの処理と、安定度の評価を試みた。

以下、KL_A1_A ステーションで使用している日本高周波(株)製高精度型インバータ電源[4, 5, 10]について報告する。この電源は、通番で主電源が 16 号機、補電源が 1 号機である。高精度型インバータ電源の仕様を Table 1 に示す。

Figure 1 に、運転時に常時観測している 4 信号の波形を示す。内訳は、

- 黄: PFN 充電電圧(インバータ電源出力電圧)。
- 青: インバータ電流。
- 緑: 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: 充電完了信号。

であり、出力設定電圧 38kV である。以下、主にインバータ電源出力電圧(以後、「出力電圧」と略す)のデータについて報告する。データ処理の際、動作が変化するタイミングについてインバータ電流のデータも参照した。

出力電圧のデータを CSV ファイルで取込み、ソフトウェア Excel でグラフ(散布図(直線))に表示したものを Fig. 2 に示す。数値データは 1,048,567 点を取得したが、

Table 1: Specification of Highly Precise Inverter Power Supply (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

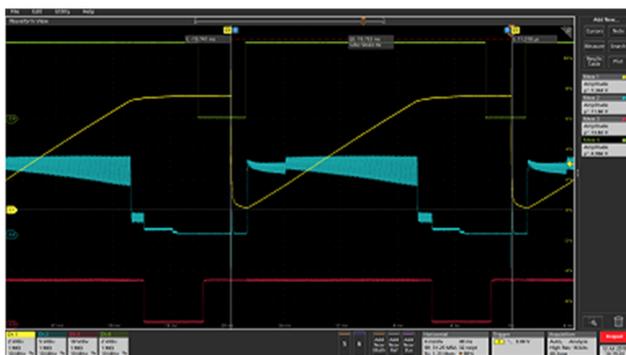


Figure 1: Waveforms of input-output signals of inverter power supply.

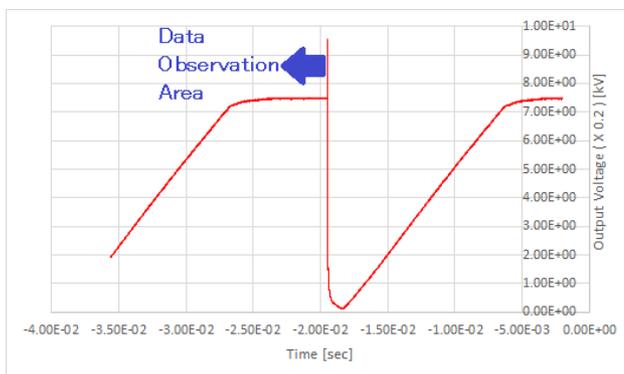


Figure 2: Waveform of output (capacitor charging) voltage signal of inverter power supply (1).

CSV ファイルを最初に表示する際にエラーメッセージが出て、Fig. 1 の黄波形の全ては取得出来ていない(エラーの原因がオシロスコープ側にあるか、データ処理するパソコン側にあるかは不明)。

以下、電圧がピークに達する時点より左側(時間が早い側、Fig. 2 内の記載参照)のデータを処理し評価する。

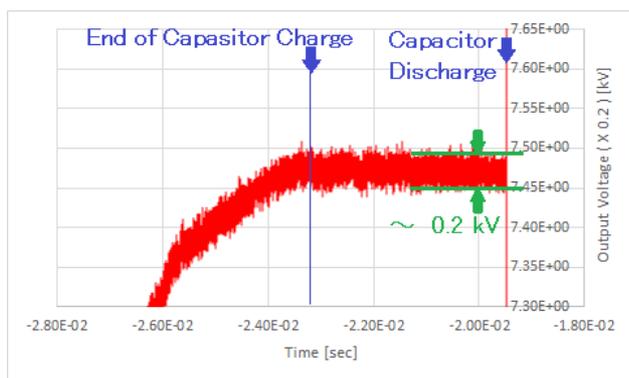


Figure 3: Waveform of output (capacitor charging) voltage signal of inverter power supply (2).

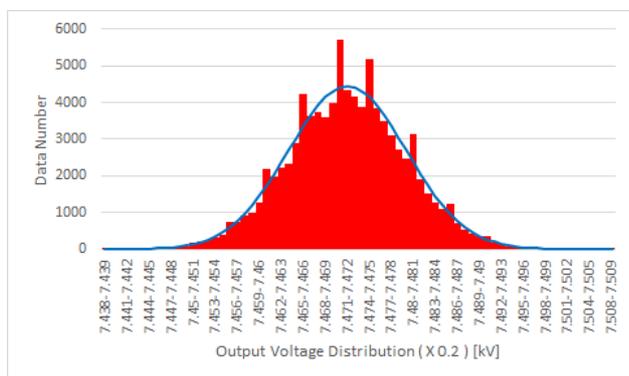


Figure 4: Histogram (read bars) and regular distribution curve (blue curve) of output voltage data of inverter power supply.

Figure 3 に、出力電圧がピークに達し、PFN コンデンサがサイラトロン短絡により放電した時点までの波形を示す。この波形と数値データ、インバータ電流の波形と数値データより、 $-2.34 \times 10^{-2} \text{sec}$ に充電が完了し[10]、 $-1.95 \times 10^{-2} \text{sec}$ に放電しているのがわかる。この間の電圧変動は、Fig. 3 の線の太さから約 0.2kV (200V、換算後の値、縦軸の数値が $1/5 (\times 0.2)$ となっているのに注意)と見積られる。

Excel の関数などを用いて、試しにヒストグラムの作図や標準偏差の計算・正規分布曲線の作図などを行い[12]、データを評価した。作図のために処理したデータは、充電完了後の $\sim 90,000$ 点である。

作成したヒストグラム等を Fig. 4 に示す。赤の縦棒グラフがヒストグラムである。データから得られた平均値および標準偏差(いずれも換算後)は、

- 平均値 $\mu: 3.736 \times 10^1 \text{kV}$ (37.36kV)。
- 標準偏差 $\sigma: 0.004 \times 10^1 \text{kV}$ (40V)。

となり、これらの数値とデータから作成した正規分布曲線を Fig. 4 の青曲線で示す。ヒストグラムと正規分布曲線には大きな差異の無い事がわかる。

正規分布の理論から、 $\mu \pm 2\sigma$ の間、すなわち

$$(3.736 \pm 0.008) \times 10^1 \text{kV}$$

の範囲に 95.4% のデータが含まれている。その結果誤差が 0.16kV (160V) となり Fig. 3 の結果 (約 200V) と大差無いが、安定度が仕様値に比べ 1 桁以上悪く (仕様値 $0.03\% \text{p-p}$ に対し、 $0.43\% \text{p-p}$) 見えている。

その他、時間軸を拡大して波形を表示したが、インバータ電圧の、 $10 \sim 40 \text{kHz}$ 程度の振動数[10]を持った明瞭な波形は確認できなかった。

今後は、目的に応じてオシロスコープの設定を適切に変更しながら、データを取得するのが重要と思われる。それに加え、一度に大量のデータ (100 万点以上) を取得するため、データの適切な処理も必要となる。

4. 昨年度新規開発のインバータ電源



(a) Front view

(b) Rear view

Figure 5: Outward appearances of new inverter power supply.

昨年度の新規電源は(株)パルスパワー技術研究所が開発した。外観を Fig. 5 に示す。

新規電源には以下の特徴がある。

- 10 kW インバータモジュールを 3 台使用し 30 kW を出力。
モジュール化により、カスタム仕様に容易に対応可能。
- ソフトランディング充電方式により高精度充電が可能。
- 補充電回路を有し、充電完了後も充電電圧を高精度で維持。
- 高周波トランスには浮遊容量を最小とする 2 次巻線回路を採用し、高効率化を実現。
- 高圧発生部を筐体内に収納する構造とし小型化を達成。
- タッチパネルによるローカル操作と表示。

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は、昨年 10 月から今年 7 月までの運転において、重大な故障が無く運転が行われた。昨年・一昨年に報告した改修等[4, 5]が有効だったと見られる。

最新のオシロスコープで取得した CSV データを、Excel の関数などを用いて処理し、KL_A1_A ステーション

ンで使用している日本高周波(株)製高精度インバータ電源の電圧安定度の評価を試みた。データの取得・処理の両方で適切な方法を検討すべし、という課題が残った。

昨年度新規に開発された(株)パルスパワー技術研究所製インバータ電源について、今後も KEK 電子陽電子入射器のテストスタンドでランニング運転を行って性能を確認する必要がある。

参考文献

- [1] Y. Seimiya *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器の現状”, FSP006, this meeting.
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, “SuperKEKB フェーズ2におけるコミッションの成果”, WEOLP01, this meeting.
- [3] M. Akemoto *et al.*, “KEK 電子・陽電子入射器用クライストロン電源の現状”, WEP060, this meeting.
- [4] M. Kawamura *et al.*, “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)”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 481-485;
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUP0/TUP060.pdf
- [5] M. Kawamura *et al.*, “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”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 412-415;
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP032.pdf
- [6] H. Nakajima *et al.*, “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, Tokai, Japan, Jul. 30 - Aug. 1, 2003, pp. 48-50;
http://www.pasj.jp/web_publish/lam28/proceedings/WD-4.pdf
- [7] M. Akemoto *et al.*, “KEK 電子・陽電子入射器用クライストロン電源の現状”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Higashihiroshima, Japan, August 6-8, 2008, pp. 892-894;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/contents/PDF/TP/TP094.pdf
- [8] K. Iida *et al.*, “コンデンサ充電用インバータ電源”, Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Japan, Aug. 7-9, 2002, pp. 252-254;
http://www.pasj.jp/web_publish/lam27/PDF/7P-47.pdf
- [9] O. Endo *et al.*, “大電力スイッチング電源の開発”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, pp. 621-623;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SAP0/SAP065.pdf
- [10] H. Akikawa *et al.*, “パルス変調器用高精度コンデンサ充電器の開発”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp. 1143-1145;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP066.pdf
- [11] M. Akemoto *et al.*, “SuperKEKB 用フラックスコンセントレータ電源の現状”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 504-506;
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUP0/TUP067.pdf
- [12] “BDASTyle ヒストグラムの作図 Tips”他;
<https://bdastyle.net/tools/histogram/page4.html>