

# J-PARC RCS 用ペイントバンプ電源の波形パターン調整システムの構築

## WAVEFORM PATTERN CONTROL SYSTEM OF PAINT BUMP POWER SUPPLY FOR J-PARC RCS

杉田萌<sup>#, A)</sup>, 高柳智弘<sup>A)</sup>, 植野智晶<sup>B)</sup>, 堀野光喜<sup>B)</sup>, 篠崎信一<sup>A)</sup>

Moe Sugita<sup>#, A)</sup>, Tomohiro Takayanagi<sup>A)</sup>, Tomoaki Ueno<sup>B)</sup>, Koki Horino<sup>B)</sup>, Shin-ichi Shinozaki<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)/Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

<sup>B)</sup> Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)/NAT corporation (NAT)

### Abstract

In the J-PARC RCS, four horizontal paint bump magnets and two linear paint bump magnets are used for paint injection to generate a high intensity beam. The paint bump magnet power supply consists of an IGBT-controlled chopper circuit, which creates an arbitrary output current waveform (paint pattern) that changes the beam orbit over time through high-frequency switching control of the target current and command voltage. The beam orbit control accuracy is determined by the difference between the target current and the output current (output current deviation), and a deviation of  $\pm 1.0\%$  or less is required. In the current paint pattern adjustment, deviation of  $\pm 0.2\%$  or less is achieved by combining software that creates command voltage according to the response function of the power supply control and manual rewriting of the command voltage value. The software divides the time by about  $30 \mu\text{s}$  and adjusts the output current deviation within the accuracy within that time. Therefore, when creating a paint pattern with a beam injection time of  $500 \mu\text{s}$ , the command voltage takes discontinuous staircase-like values every few  $\mu\text{s}$ . This waveform is the cause of increased switching losses due to high-speed operation of IGBTs. Therefore, we report on the current status of pattern creation and the construction of a system that enables output of a command voltage smoothed as much as possible.

## 1. はじめに

J-PARC[1] RCS[2]では、大強度ビームを生成するペイント入射[3]に、4 台の水平ペイントバンプ電磁石と 2 台の垂直ペイントバンプ電磁石を用いる。ペイントバンプ電磁石電源は IGBT 制御のチョッパ回路で構成され、目標電流と指令電圧の高周波スイッチング制御により、ビーム軌道を時間変化させる任意の出力電流波形(ペイントパターン)を作成する。ビーム軌道の制御精度は目標電流と出力電流の差(出力電流偏差)で決まり、 $\pm 1.0\%$ 以下の偏差が要求される。現在のペイントパターン調整では、電源制御の応答関数に応じて指令電圧を作成する

ソフトと、手動で指令電圧値を書き換える調整を組み合わせ、 $\pm 0.2\%$ 以下の偏差を達成している。ソフトは時間を数十  $\mu\text{s}$  で区切り、その中で出力電流偏差を精度内に調整するため、ビーム入射時間が  $500 \mu\text{s}$  のペイントパターンを作成する場合、指令電圧は数  $\mu\text{s}$  毎に不連続な階段状の値をとる。この波形は IGBT の高速動作によるスイッチング損失増加の原因となっている。そこで、パターン作成の現状と、可能な限り平滑化した指令電圧を出力可能とするシステムの構築について報告する。

## 2. ペイントバンプ電磁石電源

ペイントバンプ電磁石電源は、ビーム試験で使用する台形型や、ペインティング入射で使用する減衰関数型など、様々な形状の励磁波形が要求される。ペインティング入射時の波形例を Fig. 1, 2 に示す。Figure 1 は行き先

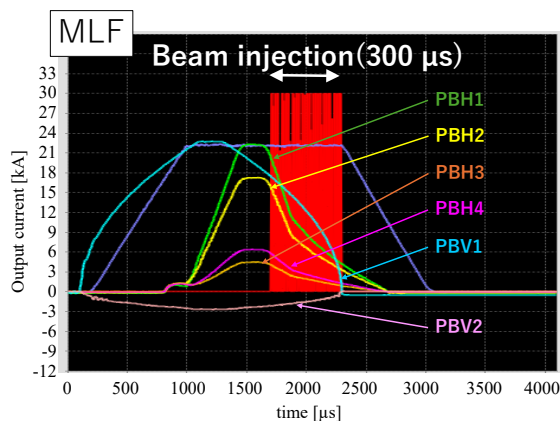


Figure 1: Painting waveform for MLF.

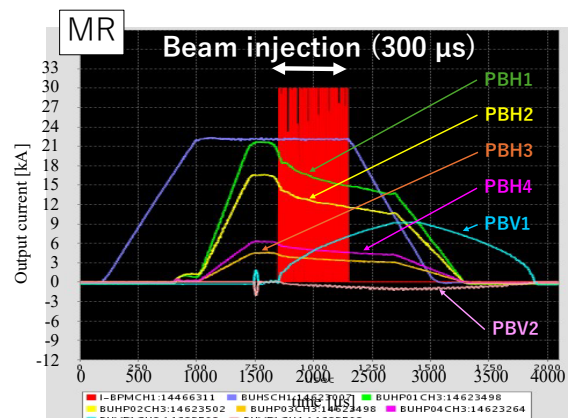


Figure 2: Painting waveform for MR.

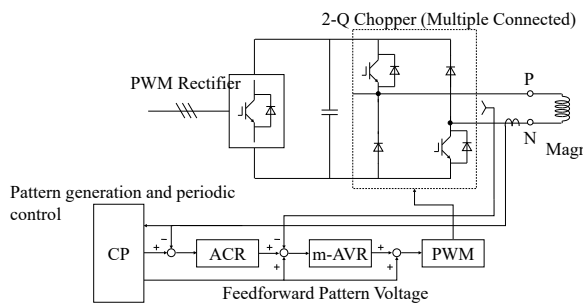


Figure 3: Block diagram of the control system.

が MLF の場合、Fig. 2 は行き先が MR の場合のペイントバンパ電磁石電源波形の一例である。

ペイントバンパ電磁石電源の基本構成を Fig. 3 に示す。ペイントバンパ電源は、IGBT アセンブリを直列と並列に多重に組み合わせた並列多重の二象限チョッパ回路で構成されている。IGBT は 1 アセンブリ当たり 54 kHz で動作し、これを 12 多重化することで 648 kHz の高速スイッチングによる波形合成が可能である[4, 5]。さらに、MLF 用と MR 用として別々に要求された異なるペイントエリアでの入射スキームに、25 Hz で励磁波形を切り替える運転も可能である。

ペイントバンパ電源の出力電流は、指令電圧値を変換した IGBT 制御信号によってアナログ制御される。この制御信号は、電流フィードバックと電圧フィードフォワードによって生成される。制御回路は、電流フィードバックとして、出力電流が目標電流と一致するように連続的に指令電圧値を決定し、IGBT 制御信号を生成する。しかし、電流フィードバックの応答時定数は 20  $\mu\text{s}$  程度であるため、ビーム入射時間 500  $\mu\text{s}$  という短い時間で電流値が連続的に大きく変化する場合、出力電流が目標電流から逸脱する。そこで、電圧フィードフォワードとして、目標電流波形に基づいて負荷回路全体のインダクタンスと抵抗から求められる設定電圧を制御回路に直接投入している[6]。

### 3. ペイントパターン調整

水平ペイントバンパ電源用の波形パターンは、12 bit のデジタル信号として、指令電圧と目標電流を 500 kHz(2  $\mu\text{s}$ )で作成する。また、目標電流値と指令電圧値は、0 から 2048 が 0 V から 10 V、2049 から 4096

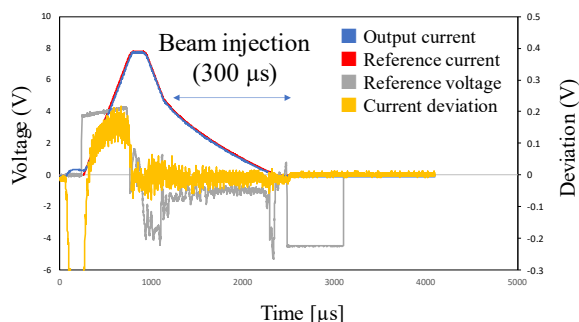


Figure 4: Measurement results of current and voltage adjusted with waveform adjustment software.

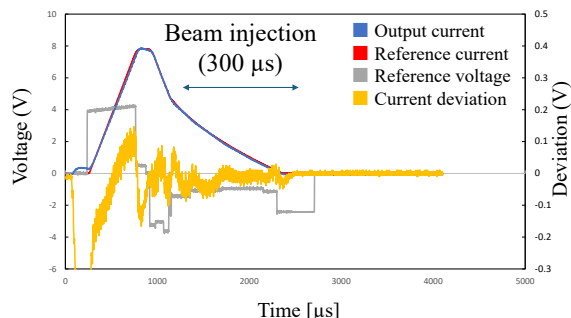


Figure 5: Measurement results of current and voltage adjusted by paint bump power supply personnel.

が-10 V から 0 V に割り当て、29 kA=10 V、1.2 kV=10 V としてパターンを作成する。出力する電流と電圧が定格の範囲内であれば、任意の波形形状での出力が可能である。

## 4. ペイントパターン調整手法

### 4.1 ペイントパターン調整の現状

現在、ペイントパターンの調整は、ソフトと出力電流偏差を確認しながら指令電圧値をその都度調整する手動調整を組み合わせで行っている。また、昨年度の加速器学会にて、ベイズ最適化を用いた台形波調整手法について報告した[7]。

### 4.2 波形調整ソフト

電源制御の出力応答特性に着目し、目的とする目標電流値に応じた指令電圧値を算出するソフトを使用する[8]。出力電流偏差の傾きを連続的に判定し、それを平滑化する機能と、出力電流偏差の凹凸を自動判定してから、平滑化する機能が搭載されている。Figure 4 に波形調整ソフトで作成した指令電圧を示す。

本手法のメリットは、 $\pm 0.2\%$ の精度でペイントパターンを作成できる点と、半自動化されている点にある。

一方、デメリットとして、ある時間ごとに区切り調整を行うため、結果的に電圧の調整幅が大きくなる点、経験則とは異なる想定外のパターンが算出される点が挙げられる。

### 4.3 手調整

電圧値を 2  $\mu\text{s}$ -12 bit で csv ファイルに書き込むことで、

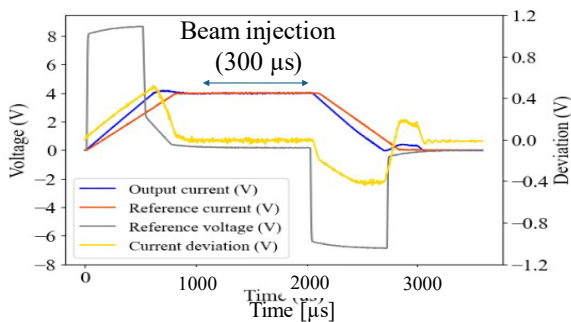


Figure 6: Measurement results of current and voltage adjusted with bayesian optimization.

電圧指令値を作成する。Figure 5 に手調整で作成した指令電圧を示す。

本手法のメリットは、電圧の変化を抑えた調整が可能かつ経験則を直接反映可能な点にある。

しかし、1 つのパターンを作成するにあたり 60 分前後を要するため、電源 6 台×2 行先の調整を行う際は 12 時間手程度必要となる。また、パターン作成は熟練者すなわちペイントバンブ担当者に限られる。

#### 4.4 ベイズ最適化

ブラックボックス関数の最適化に用いられるベイズ最適化[9]を用いて探索を行った。ベイズ最適化は、最適化を行いたい目的関数が陽に与えられず、実験的に結果が得られるような場合に、ガウス過程回帰によって実験データ点から関数系を学習しつつ、その関数の大域的最適解の探索を行う手法である。Figure 6 に波形調整ソフトで作成した指令電圧を示す。

台形波調整に使用可能で、パラメータは立ち上がり部/フラットトップ部前半/フラットトップ部後半/立下り部それぞれの時間と電圧値である。

本手法のメリットは、ペイントバンブの知識を必要としない点であるが、デメリットとしてパラメータ数が最大 10 程度と少なく、複雑な任意波形の出力が困難である点にある。

### 5. 検討モデル

ペイントパターン調整の現状から、下記条件を満たすペイントパターン調整ソフトの作成が求められている。

- 電圧の調整幅が少ない
- ペイントパターン作成の時間短縮
- 未経験者も作成可能
- 様々な波形に対応可能

そこで、2 種類のモデルについて検討を進めている。

- 1) ニューラルネットワーク(NN)モデル: 波形データが入出力となっている多層ニューラルネットワーク(NN)および再帰型 NN を用いた深層学習モデルを構築する。
- 2) 天気予報モデル:  $V(t)$ と  $I(t)$ を連続した 1 つの時系列データとみなす天気予報モデルを構築する。

2 種類のモデルについて、ペイントバンブ電磁石電源実機で試験を行ったうえ、精度を比較する。

### 6. まとめ

可能な限り平滑化した指令電圧を手動で作成し、要求精度以内の±1.0%以下の偏差を達成できることを確認した。この波形は IGBT の高速動作によるスイッチング損失増加を防ぐことが可能である。これにより、スイッチング損失を低減したペイントバンブ電源独自の波形パターン調整システムを機械学習で構築できる見通しを得た。

### 参考文献

- [1] Japan Proton Accelerator Research Complex J-PARC, <http://j-parc.jp/index.html>
- [2] K. Yamamoto *et al.*, “Design and actual performance of JPARC 3 GeV rapid cycling synchrotron for high-intensity operation”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, (2022), 59:9, 1174-1205.
- [3] H. Hotchi *et al.*, “Beam Dynamics Study for Beam Loss Mitigation in the J-PARC RCS” *J. Particle Accelerator Society of Japan*, Vol. 16, No. 2, 2019, pp. 109–118.
- [4] T. Takayanagi *et al.*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, VOL. 24, NO. 3, JUNE 2014, 3800905.
- [5] T. Ueno *et al.*, “Status of the horizontal paint bump power supply of the J-PARC RCS”, *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9-11, 2014, Aomori, Japan, PASJ2014-SUP058*.
- [6] 高柳智弘 他, “高精度大電流パルス励磁電源の開発”, *電気学会, 電学論 D*, 127 巻 8 号 (2007).
- [7] M. Sugita *et al.*, “Waveform pattern control of paint bump power supply for J-PARC RCS using machine learning”, *Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, WEP17*.
- [8] S. Kato *et al.*, “Precise current adjustment of the power supply for the injection painting magnets in the J-PARC RCS”, *Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2015), August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan, THP075*.
- [9] B. Shahriari *et al.*, “Taking the Human Out of the Loop: A Review of Bayesian Optimization,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 1, pp. 148-175, Jan. 2016.