

次世代リング加速器入射キッカー電磁石のための高精度固体パルス電源開発 DEVELOPMENT OF HIGH-PRECISION SOLID STATE PULSE POWER SUPPLY FOR THE KICKER MAGNET OF THE NEXT-GENERATION ELECTRON STORAGE RING

秋川藤志^{#, A)}, 佐藤和行^{A)}, 田中豊^{A)}, 稲垣隆宏^{B)}, 近藤力^{B)}, 高野史郎^{C)}, 深見健司^{C)}, 田中均^{B)}

^{A)} Nihon Koshuha Co., Ltd.

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

^{C)} JASRI/SPring-8

Abstract

We are developing a pulse power supply driving twin kicker magnets as one of key components to achieve a perturbation-free beam injection with an extremely small injection beam amplitude for next-generation ring accelerators. Twin kicker magnets are connected in parallel and driven by half sine wave form current. The power supply is mainly composed by a 50kV DC power supply, 93nF capacitor, and fourteen IGBTs for switching. As a preliminary test for this pulse power supply, we have checked characteristics of selecting parts for basic components.

1. はじめに

SPring-8-II[1]など次世代のリング型加速器では、(1) 従来よりも桁違いに蓄積ビームのエミッタンスが小さいため、ビームの軌道も極めて安定であることが要求される上に、(2) 低エミッタンス化に伴い小さくなる動的安定領域に入射可能な入射ビームの振動振幅の低減を達成する必要がある。これらの条件を満たすビーム入射方法として、真空封止無摂動 off-axis 入射方法が提案された[2]。低入射振幅は、入射ビームの低エミッタンス化と有効セプト厚を薄くできる真空封止セプトの導入で達成する。一方で、蓄積ビームへの摂動の抑制(無摂動化)は、入射部のリニアオプティックスを工夫し、Figure 1 に示す位相差 π の線形バンパ(π バンパ)軌道を 2 台の同一のキッカー電磁石(ツインキッカー電磁石)を並列に駆動することで達成する。このような条件の下において、理

想的な並列駆動により、ツインキッカー電磁石パルス磁場波形を相似形のパルス磁場波形で駆動できれば、バンパ軌道が完全に閉じ、ビーム入射が蓄積ビームに影響を与えない 100%の透明化が可能になる。この開発のポイントは、電源の負荷も含め、磁場波形を同一とするツインキッカー電磁石を駆動するパルス電源システムをどう実現するかである。

このツインキッカー電磁石を駆動するためのパルス電源として、高電圧 IGBT をスイッチに用いた高安定電源を開発している。そのための予備試験として、IGBT など基本部品について、特性の確認や部品の選定をするための試験を行った。本発表ではこれらの試験結果について報告する。

2. パルス電源の仕様と構成

Table 1 に、開発中のパルス電源の主な仕様を示す。また、パルス電源の構成を Figure 1 に示す。2 台のキッカー電磁石を高電圧ケーブルにて並列に接続し、IGBT スイッチにより、主コンデンサに充電された電荷を放出して正弦波半波の電流を流す。インダクタンス負荷 L_1, L_2 を並列に接続した場合、合成インダクタンス $L_{tot} = L_1 L_2 / (L_1 + L_2)$ 、とコンデンサ容量 C との共振となるので、2 台の負荷を流れる電流波形は原理的に相似となる。また、電流の振幅はインダクタンス L_1, L_2 に反比例するので、電源内に調整用インダクタを設け、キッカー電磁石の個体差を補正して電流が等しくなるよう調整することができる。パルス出力後の逆行電流はビームを揺らす原因となるので出力ダイオードにより阻止する。パルス出力後の主コンデンサはマイナス電位になるので、リアクトルとダイオードで構成された再生回路によりゆっくり再充電を行うと共に、不足分は充電回路より補充充電がなされる。

2 台のキッカー電磁石にピーク 2.4 kA、パルス幅 2 μ s の電流を流すために、主コンデンサの容量は 93 nF、最大充電電圧は 50 kV とした。また、パルスの繰り返し周波数は 10Hz である。次章に、構成部品の詳細と、特性試験を記す。

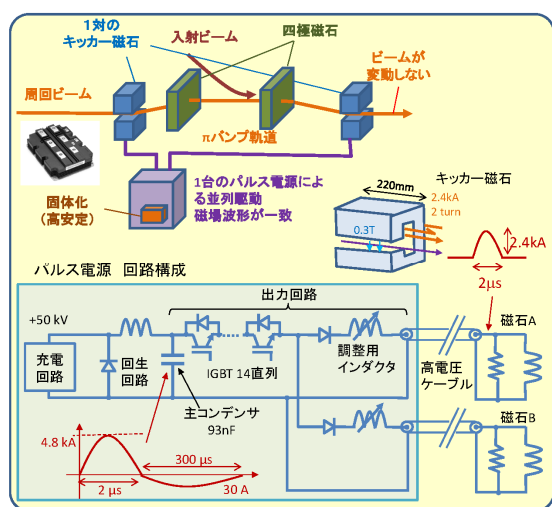


Figure 1: Schematic of the twin kicker magnet and the pulse power supply.

[#] h_akikawa@nikoha.co.jp

Table 1: Specifications of the Pulse Power Supply

Wave form shape	Half sine wave
Peak current	2.4 kA × 2 並列
Pulse width	2 μs
Output current stability	0.1 % rms
Pulse repetition rate	10 Hz
Capacitor capacitance	93 nF
Charging voltage	50 kV max

3. 構成部品の試験

3.1 IGBT

本電源で使用する IGBT としては、最大定格電圧 (6.5kV) が最も高く、電車などで使用され信頼性の高い三菱電機製の高電圧 IGBT(CM750HG-130R)を選んだ。この IGBT の推奨使用電圧 3.6 kV 以下となるよう、IGBT を 14 直列とし、絶縁されたゲート回路によって同タイミングでスイッチさせ、パルス電流を出力する。

まず、IGBT の許容通過電流を調べるため、IGBT 1 台に最大 3.4 kV の電圧を印加してターンオン試験を行った。結果を Figure 2 に示す。2 種類の負荷抵抗にて試験を行ったが、いずれの場合も印加電圧とパルス電流は比例関係を保ち、最大 6 kA の電流を流しても問題ないことを確認した。

次に IGBT を 4 台直列に接続し、パルス電源を模した試験回路を組んで、2 台の電磁石へのパルス電流出力試験を行った。試験回路を Figure 3 に示す。コンデンサを 14 kV まで充電し、IGBT 4 台をターンオンさせると、想定通り 2 台のキッカー磁石にピーク 650 A、幅 2.5 μs の正弦波半波電流が流れることを確認した。また、ゲートタイミングがずれた際に IGBT 間に生じる過渡電圧の測定を行い、IGBT と並列にスナバ回路(50 nF、2 Ω)を入れることにより、タイミングが 200 ns ずれても過渡電圧が約 30% に収まることを確認した。

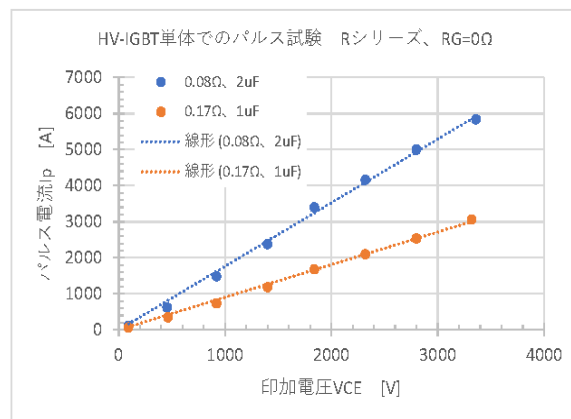


Figure 2: Voltage and current linearity for the pulse test of the HV-IGBT.

3.2 調整インダクタ

本パルス電源は 2 台のキッカー電磁石が並列に接続されるが、蓄積ビームへの影響を最小限にするには、2 台に流れる電流振幅を精度良く一致させることが重要である。しかし、電磁石の製作上の誤差や、接続ケーブルの長さの違い、パルス電源内の素子の個体差などにより、出力インピーダンスには微小な差が生じるとと思われる。そうした差異を吸収するため、出力部に調整可能なインダクタを設け、インダクタンスを調整することにより 2 系統の電流を一致させる予定である。このインダクタンス調整を実証するための試験を行った。

調整インダクタは銅パイプで製作したコイルであり、内部の金属筒をスライドさせることでインダクタンスを調整する。試作したインダクタの写真を Figure 4 に示す。この試作品では 0.6 μH から 1.1 μH の範囲でインダクタンスを変化させることができた。また、2 台のテスト用電磁石を接続し、電流波形を一致させる調整を行った時の波形を Figure 5 に示す。インダクタンスを変化させると 2 台の磁石の電流振幅が変化し、2 波形をほぼ一致させることができた。

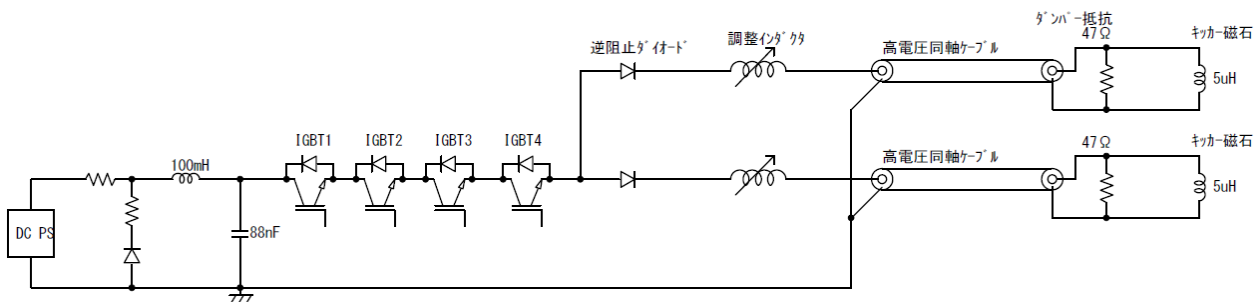


Figure 3: Test circuit for the pulse power supply.

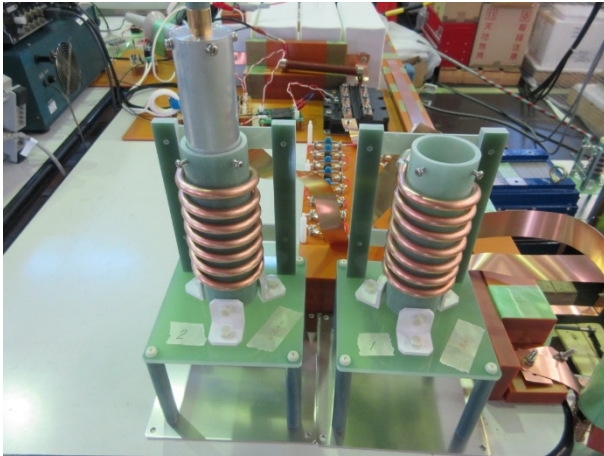


Figure 4: Photograph of the adjustable inductors.

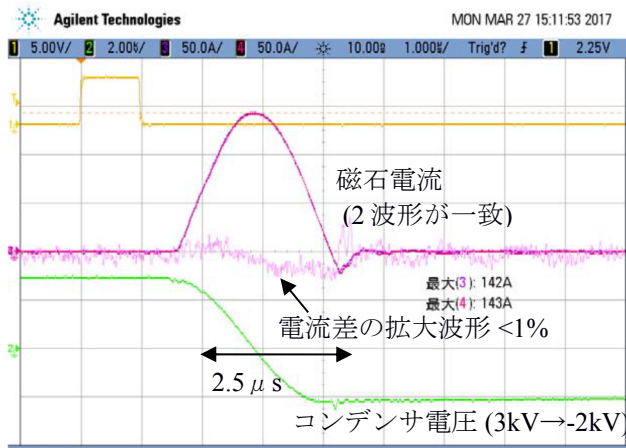


Figure 5: Waveform of the inductance adjustment test.

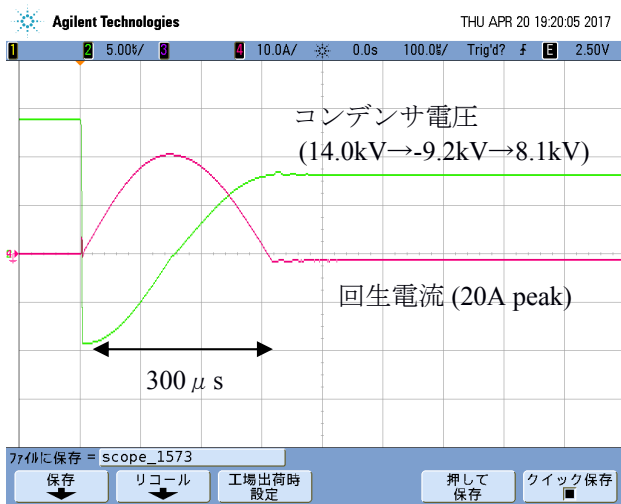


Figure 6: Waveform of the energy regeneration test.

3.3 電力回生回路

本パルス電源では、半波のパルスが出力されることで、充電されたコンデンサの電圧極性が反転する。充電時間の短縮と充電電源の小出力化のため、電圧を再反転して元の極性に戻した後に再充電を開始する回生方式

を採用することとした。このための回生用のリアクトルとダイオード回路を試作し、回生回路の試験を行った。リアクトルのインダクタンスは 100 mH であり、充電用コンデンサの容量と合わせて、回生に要する時間は約 300 μ s となる。Figure 6 に回生試験時の波形を示す。充電電圧 14 kV での試験では、パルス出力後の電圧絶対値に対する回生後の電圧絶対値の比は 88 % であり、良好な結果が得られた。Table 2 に回生電圧比の結果をまとめる。

Table 2: Energy Regeneration Ratio

充電電圧	回生前電圧	回生後電圧	回生電圧比
3.0 kV	-1.9 kV	1.5 kV	78 %
5.0 kV	-3.2 kV	2.6 kV	82 %
8.0 kV	-5.2 kV	4.4 kV	85 %
10.0 kV	-6.6 kV	5.7 kV	87 %
14.0 kV	-9.2 kV	8.1 kV	88 %

4. まとめ

ツインキッカー電磁石を駆動するためのパルス電源を開発中である。このための予備試験として、IGBT など基本部品について、特性の確認や部品の選定をするための試験を行った。まず IGBT 1 台に 3.4 kV の電圧を印加してターンオン試験を行い、6 kA の電流を流しても問題ないことを確認した。次に IGBT を 4 台直列に接続して 2 台の電磁石へのパルス電流出力試験を行い、想定通りの正弦波半波電流が流せることを確認した。また、ゲートタイミングがずれた際の IGBT の電圧バランスの測定、2 台の電磁石への出力電流を同一にするための調整インダクタによる波形調整、電力回生回路などについて確認した。

現在、パルス電源の詳細設計を進めている。2017 年度中に試作機を製作し、2018 年度中にキッカー磁石と組み合わせての性能確認試験を行う予定である。

謝辞

本研究は、文部科学省の競争的資金「次世代加速器要素技術開発プログラム」からの委託事業として実施した。

参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “SPRING-8 upgrade project”, WEPOW019 in Proc. of IPAC2016, (2016).
- [2] S. Takano *et al.*, “Novel off-axis beam injection scheme for next-generation storage ring light sources”, WEP011 in these proceedings.