

電磁石電源のためのフライングキャパシタ方式の原理実証

TEST DEMONSTRATION OF MAGNET POWER SUPPLY WITH THE FLYING CAPACITOR

下川 哲司*, 栗本 佳典, 森田 裕一, 内藤 富士雄, 中村 衆, 岡村 勝也
 Tetsushi Shimogawa*, Yoshinori Kurimoto, Yuichi Morita, Fujio Naito, Shu Natkamura, Katsuya Okamura
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) aims at achieving a MW-class proton accelerator facility. One of the promising solutions for increasing the beam power is to fasten the repetition rate of Main Ring (MR) from current rating of 2.5 sec to 1 sec in the future. However, in this scheme, the increase of output voltage and the power variation on the electric system are serious concerns for main magnets. We have considered that the energy recovery scheme based on capacitive energy storage is one of the best solution to compensate the power variation induced by a magnet power supply. In order to achieve the idea, we have decided to innovate the flying capacitor method to produce the high output voltage and return the capacitor energy with magnetic energy. However driving power supply with the flying capacitor method needs to establish the charging method of them in each pattern. In this article, we report the test result of magnetic power supply with the mini model of the power supply using the flying capacitor method.

1. はじめに

J-PARC 主リングではビームの大強度化を達成するために、繰り返し周期を現在の 2.5 秒から 1 秒に短縮することを計画している。繰り返し周期の短縮に伴って、主電磁石に蓄えられるエネルギーを 1 次側へ回生することによって生じるシステムの電力変動および、電源の出力電圧の増加が問題になる。システムの電力変動に対しては、電磁石とコンデンサ間で電力をやり取りするエネルギー貯蔵方式により対応する [1][2]。また、高出力電圧を得つつ、磁気エネルギーをコンデンサに回生する方式としてフライングキャパシタ方式 [3][4] を検討している。磁気エネルギー供給用、抵抗損失供給用のチョッパを直列に接続し、前者のチョッパの入力部にはコンデンサのみが接続され、システムから充電するための整流器は接続されていない。この方式を採用することで、整流器の大幅な削減と高出力電圧を得ることが可能となる。しかしながら、磁気エネルギー供給用チョッパに接続されているコンデンサの充電が課題であり、ビーム取り出し直後の時間に励磁電流を使つての充電方法の確立が必要不可欠である。本稿では、2013 年春に J-PARC 内に立ち上げたテストベンチにおけるミニモデル電源でのパターン通電試験によるフライングキャパシタ方式の原理実証の進捗状況について報告する。

2. ミニモデル電源構成

ミニモデル電源は、以下に示す主回路部、制御部によって構成される。ミニモデル電源および、テストベンチ全体図を Figure 1、2 に示す。

2.1 主回路部

主回路の概念図および、各コンポーネントのパラメータを Figure 3、Table 1 に示す。

1 台の Neutral Point Clamped チョッパ [5] (NPC チョッパ) と 2 台のフルブリッジチョッパ (P 側がチョッパ P, N 側がチョッパ N) が直列に接続されている。前者のチョッ

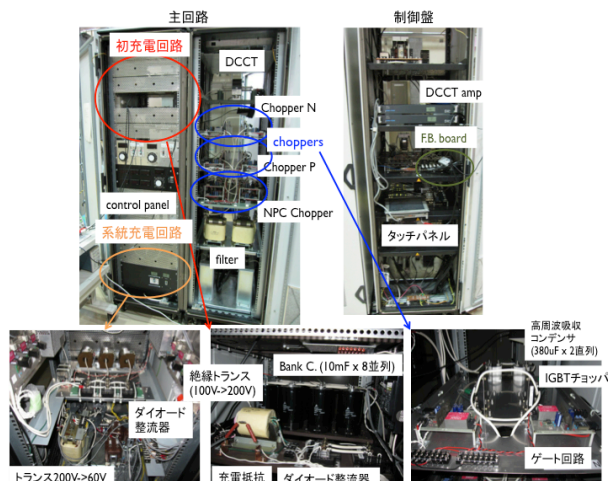


Figure 1: The mini model of the power supply.

Table 1: Parameters of Components for Main Circuit

AC/DC	ダイオード整流
バンクコンデンサ	電解コンデンサ (80 mF)
フライングキャパシタ	電解コンデンサ (80 mF)
NPC チョッパ	素子: IGBT スイッチング周波数: 5 kHz
フルブリッジチョッパ	素子: IGBT スイッチング周波数: 5kHz
負荷 (電磁石)	L = 12.9 mH × 8 台 R = 8.7 mΩ × 8 台

パには、系統、整流器とつながったバンクコンデンサ (C_{bank})、後者のチョッパには、系統に接続されていないコンデンサ (フライングキャパシタ ($C_{flyP,N}$)) がそれぞれ接続されている。また、整流はダイオードにより行う。スイッチング素子には、Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) を使い、この素子のスイッチングにより、力行、還流、回生を制御し、電源をドライブする。Table 1 に

* tetsus@post.j-parc.jp

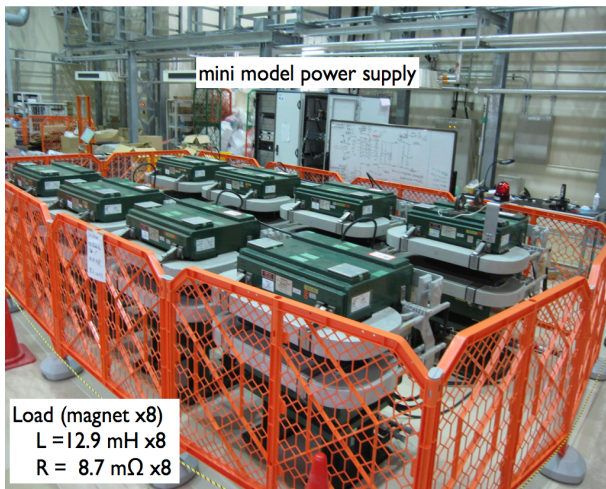


Figure 2: Picture of test bench.

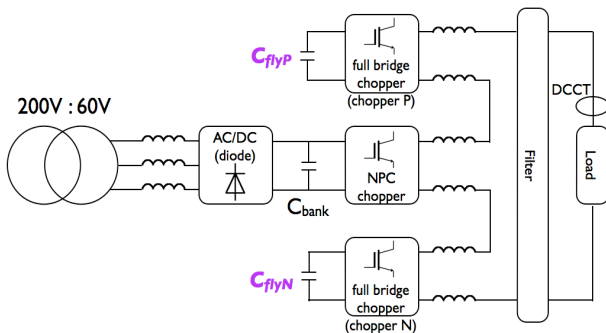


Figure 3: Schematic view of main circuit.

示した電磁石 8 台を直列に接続し、負荷とした。

2.2 制御部

制御部の概念図を Figure 4 に示す。制御部は、主に A/D 基盤、デジタルフィードバック基盤から構成される。フィードバック基盤は、J-PARC の電磁石電源用に開発中の評価用基盤であり、Field-Programmable Gate Array (FPGA) とマイクロコントローラ (MCU) から構成されている。FPGA では、電流パターンの読み書きおよび、計測された各種データの取得、MCU への送信を行う。MCU では、電流指令値、電圧指令値および計測された各種データを制御関数に入力し、電源への指令値の計算や、外部トリガの受け付けを行う。今回のミニモデル電源の場合、与えた電流パターンと負荷上流側の DCCT によって測定された電流値を使い、電流制御(電流フィードバック ($I_{F.B.}$)) による指令値を計算する。また、各ライティングキャパシタの測定電圧値と電流パターンから計算される電圧パターンを使って電圧制御(電圧フィードフォワード ($V_{F.F.}$) および、電圧フィードバック ($V_{F.B.}$)) による指令値を計算する。計算された各指令値は、MCU に搭載されている Pulse Width Modulation (PWM) 機能

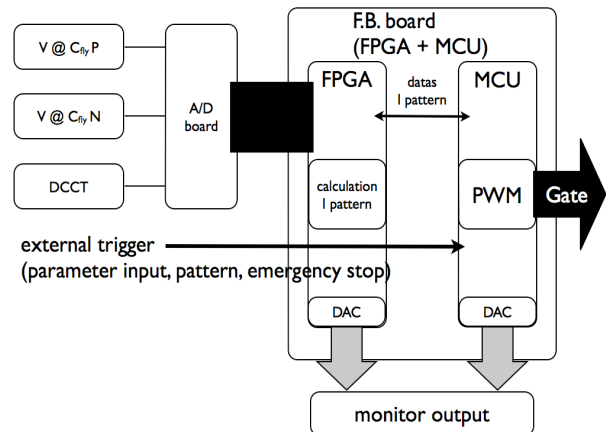


Figure 4: Schematic view of control unit.

を通してスイッチング素子のゲートパルスとして出力する。

3. 原理実証試験

ミニモデル電源の総出力電圧 ($V(t)$) は、電流パターン ($I_{ref}(t)$) より、

$$V(t) = RI_{ref}(t) + L \frac{d}{dt} I_{ref}(t) \quad (1)$$

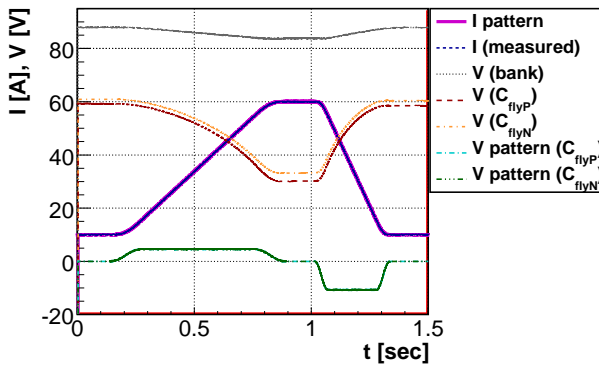
と与えられる。本試験では、抵抗負荷 (R) とインダクタンス負荷 (L) をそれぞれ NPC チョップとチョップ P、N に分担させる。そのため、それぞれのチョップが負担する電圧 ($V_{NPC}(t)$ 、 $V_{chop P,N}(t)$) はそれぞれ、

$$\text{NPC チョップ} : V_{NPC}(t) = RI_{ref}(t) \quad (2)$$

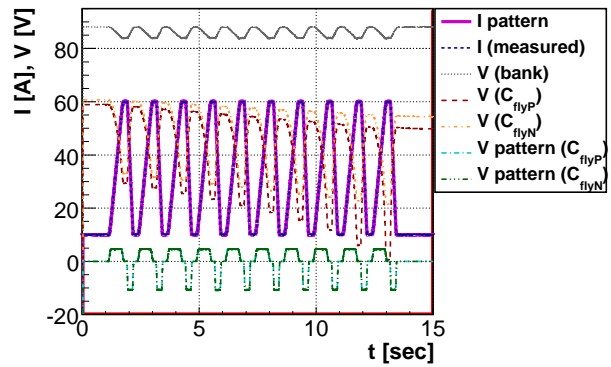
$$\text{チョップ P, N} : V_{chop P,N}(t) = 0.5 \times L \frac{d}{dt} I_{ref}(t) \quad (3)$$

と計算できる。

本試験で使用した電流パターンおよび、式 3 より得られる電圧パターンを Figure 5 に示す。本試験では、力行・還流モードと回生・還流モードの切り替わりを区別するために、0.1 秒間のフラットトップをもうけた。これらのパターンを使用し、NPC チョップを $I_{F.B.}$ 、チョップ P、N を $V_{F.F.}$ による制御 (Figure 6) を行い通電試験を行った。ライティングキャパシタの初充電電圧は、P、N 共に 60 V とした。その結果を、Figure 7 に示す。電流パターンによく追従した負荷電流と、パターン立ち下がり時にライティングキャパシタへのエネルギー回生を確認した。しかしながら、10 パターンの連続通電を行うと、P 側、N 側共にライティングキャパシタの充電電圧がパターンを追うごとに徐々に下がっていくことが確認された。これは、チョップ内の IGBT やフリーホイール・ダイオードの ON 抵抗による損失が原因である。また、各ライティングキャパシタの電圧が違うのは、初充電電圧の違いおよび、素子の個体差のためである。



(a) 1 pattern with $I_{F.B.} + V_{F.F.}$.



(b) 10 pattern with $I_{F.B.} + V_{F.F.}$.

Figure 7: Current (magenta) and voltage patterns (C_{flyP} (cyan) and C_{flyN} (green)) and measured current (blue) and voltages in each capacitor (C_{bank} (gray), C_{flyP} (red) and C_{flyN} (orange)) in 1 shot and continuous 10 shot drive with $I_{F.B.} + V_{F.F.}$.

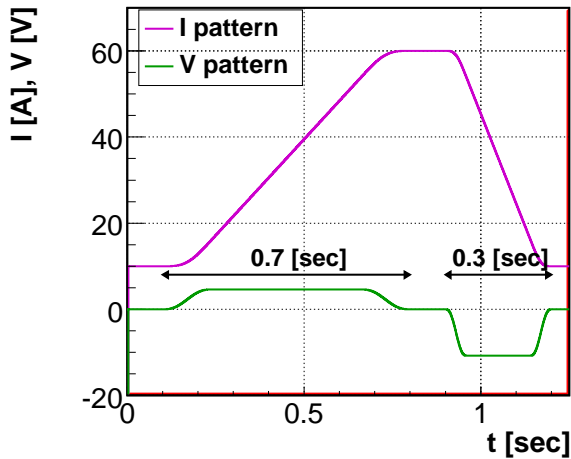


Figure 5: I pattern and V pattern in this test.

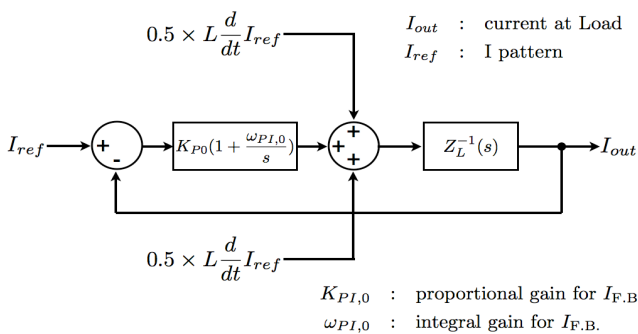


Figure 6: Control block diagram in $I_{F.B.} + V_{F.F.}$.

連続通電を行うにあたり、ライティングキャパシタの充電電圧がパターン毎に充電電圧まで回生するように、電流の立ち上がり時間および、フラットベース時 (Figure 5 中 $0.1 \leq t \leq 0.1$ および、 $0.9 \leq t \leq 1.25$ sec の間) にフラ

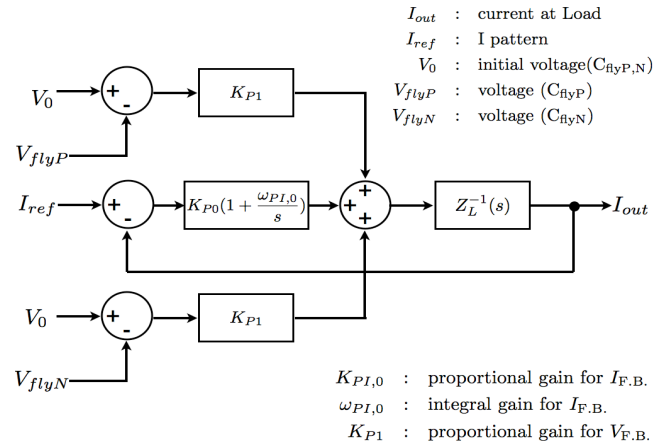


Figure 8: Control block diagram in $I_{F.B.} + V_{F.F.} \cdot V_{F.B.}$.

イングキャパシタの電圧制御を $V_{F.F.}$ から $V_{F.B.}$ (Figure 8) に切りかえての通電試験を行った。ライティングキャパシタの初充電電圧は、 $V_{F.F.}$ の時と同様 60 V である。その結果を Figure 9 に示す。 $V_{F.F.}$ のみの時と同様に、電流パターンによく追従した負荷電流と、ライティングキャパシタへのエネルギー回生ができていたことを確認した。それに加え、 $V_{F.B.}$ 時には、パターン開始前の初充電電圧の違いの補正や、パターン後半部における充電電圧の微調整といったライティングキャパシタの充電電圧に対応した電圧パターンも確認できる。また、10 パターンの連続通電時においても、パターン毎にライティングキャパシタの電圧を初充電電圧まで回生ができていたことを確認した。

4. まとめと今後の予定

J-PARC MR の高繰り返し化に向けて、ミニモデルの電源を用いたライティングキャパシタ方式による通電試験を行った。通電試験により、 $V_{F.B.}$ によるライティングキャパシタの充電電圧の回生方法を確立した。その結果、電流パターンに追従した負荷電流を得つつ、ライティングキャパシタの充電電圧を磁気エネルギーを使って初

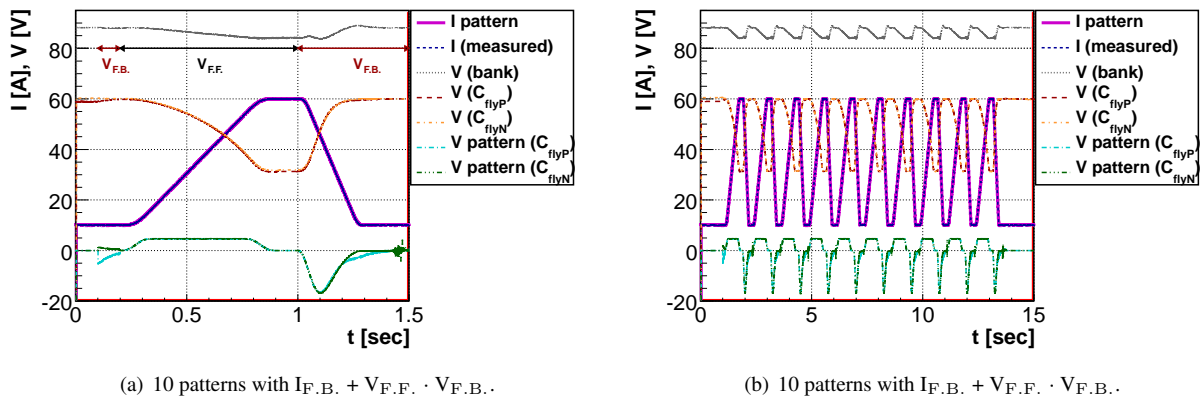


Figure 9: Current (magenta) and voltage pattern (C_{flyP} (cyan) and C_{flyN} (green)) and measured current (blue) and voltages in each capacitor (C_{bank} (gray), C_{flyP} (red) and C_{flyN} (orange)) in 1 shot and continuous 10 shot drive with $I_{F.B.} + V_{F.F.} \cdot V_{F.B.}$.

充電電圧までパターン毎に回生させることに成功した。この結果は、フライングキャパシタ方式を成立させるための最初の重要課題の解決であるため、J-PARC 主電磁石電源でのフライングキャパシタ方式の検討において、非常に重要な意味をもつ。

本試験では、負荷電流と回生電圧にのみ重点をおいたため、電流偏差は全く考慮していない。そのため、電流偏差を考慮した $V_{F.B.}$ による回生方法の更なる研鑽が必要である。また、今後はより実機に近い構成での試験を行なっていく予定である。

5. 謝辞

本研究を遂行するに当たり予算等様々な面で支援頂いた高エネルギー加速器研究機構、加速器研究施設主幹、小関忠氏および東京工業大学、名誉教授 嶋田隆一先生に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y.Morita, et al., "POWER SUPPLY SYSTEM OF J-PARC MAIN RING MAIN MAGNETS FOR HIGH REPETITION RATE OPERATION", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013
- [2] Y.Kurimoto, et al., "Hybrid Control of Low and High Voltage Power Supplies for High Voltage and Low Ripple Magnet Power Supply", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013
- [3] C.Fahrni, et al., "A novel 60 MW Pulsed Power System based on Capacitive Energy Storage for Particle Accelerators", 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2-5, September, 2007.
- [4] T. Isobe, et al., "Voltage Rating Reduction of Magnet Power Supplies Using a Magnetic Energy Recovery Switch", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 16, no. 2, pp. 1646-1649, June 2006.
- [5] Y.Kurimoto, et al., "A common Mode-less Power Supply Operation with NPC inverters", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2012