

電磁石電源のためのフローティングキャパシタ方式の回生制御の開発 DEVELOPMENT OF RECOVERY CONTROL FOR MAGNET POWER SUPPLY WITH FLOATING CAPACITOR

下川 哲司 *^{A)}、森田 裕一^{A)}、佐川 隆^{B)}、栗本 佳典^{A)}、中村 衆^{A)}、三浦 一喜^{A)}、
Tetsushi Shimogawa *^{A)}, Yuichi Morita^{A)}, Ryu Sagawa^{B)}, Yoshinori Kurimoto^{A)}, Shu Natkamura^{A)}, Kazuki Miurra^{A)},
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{B)} Universal Engineering

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 floating capacitor method to produce the high output voltage and return the capacitor energy with magnetic energy. However driving power supply with the floating capacitor method needs to establish the charging method of them in each cycle and initialization. In this article, we report about the recovery control of floating capacitor.

1. はじめに

J-PARC 主リングではビーム強度の増強のために、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。コンデンサと電磁石間でエネルギーを交換するエネルギー貯蔵方式によりシステムの電力変動を抑制する^[1]。また、負荷の分割や変換器を直列にすることで、高出力電圧を得る。我々は、コンデンサにエネルギー回生しつつ、変換器を直列に接続できる回路方式としてフローティングキャパシタ方式^{[2][3]}を検討している。フローティングキャパシタ方式では、磁気エネルギー供給用、抵抗損失供給用の変換器を直列に接続し、前者の変換器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。そのため、この方式を採用することで整流器の大幅な削減も可能となる。しかしながら、システム未接続コンデンサの初期充電および運転中の電圧の安定化が課題であり、ビーム取り出し直後の時間に電磁石の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、試験電源を使い回生制御によるフローティングキャパシタ方式の課題であるシステム未接続コンデンサの充電方法について報告する。

2. フローティングキャパシタ方式の制御

フローティングキャパシタ方式の主回路および制御の概念図を Figure 1 に示す。

電源の総出力電圧 ($V_{out}(t)$) は、電流指令値 ($I_{ref}(t)$) および負荷のインダクタンス (L)、抵抗成分 (R) より、

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

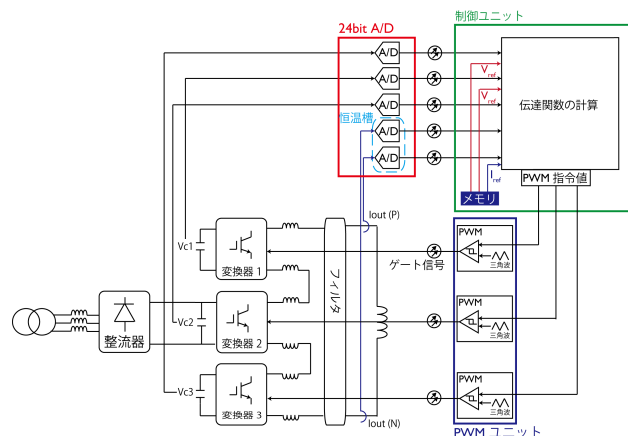


Figure 1: Overview of power supply with floating capacitor including control system.

で与えられる。フローティングキャパシタ方式では、システム未接続変換器 (変換器 1,3) に負荷のインダクタンス成分のみを分担させ、残りを変換器 2 に負担させることで電源を駆動させる^[1]。それぞれの変換器の出力電圧を $V_{out1,2,3}$ 、変換器 1,3 の負荷分担比を f_1, f_3 とすると

$$\begin{aligned} \text{変換器 1,3} &: V_{out1,3}(t) = f_{1,3} \times L \frac{d}{dt} I_{ref}(t) \\ \text{変換器 2} &: V_{out2}(t) = V_{out}(t) \\ &\quad - (f_1 + f_3) \times L \frac{d}{dt} I_{ref}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

と計算できる。また、加速器の安定運転には高精度での出力電流の制御が必要なので、変換器 1,3 は Equation 2 で得られる出力電圧を電圧指令値 ($V_{ref1,3}$) として電圧フィードフォワード制御、変換器 2 を負荷電流を使用したフィードバック制御により変換器を制御するこ

* tetsus@post.j-parc.jp

とで、出力電流の高精度化をはかる (Figure 2)。しかしながら、計算値のみの F.F. 制御だけでは、回路内の寄生抵抗の寄与により、バンクコンデンサ C1,C3 の電圧 (V_{c1}, V_{c3}) が安定せず、高出力電圧が担保できなくなる [4] (Figure 3)。そのため、高精度での電流制御が不要である、負荷電流を立ち下げる期間のみを使ってバンクコンデンサ C1,C3 を充電するための回生制御を開発し、導入した。

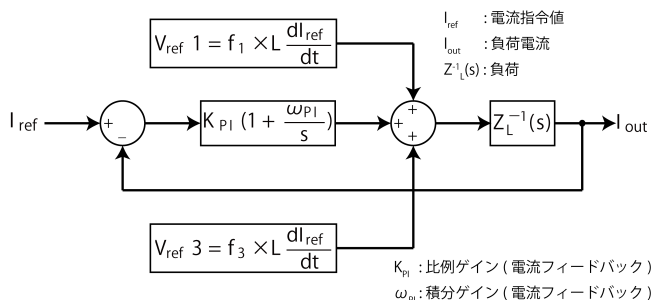


Figure 2: Control diagram of power supply with floating capacitor.

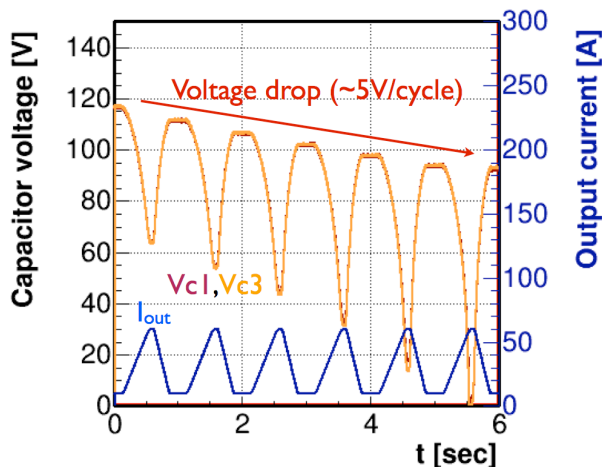


Figure 3: Test result of driving power supply with floating capacitor by feed forward control.

3. フローティングキャパシタの回生制御

回生制御の導入にあたり、負荷電流指令値および Equation 2 で $f_1, f_3=0.5, L=0.1$ H として計算した電圧指令値を Figure 4 に示す。目標である 1 秒周期の繰り返しでの運転を考え、フラットボトム 10 A、フラットトップ 60 A、立ち上げ時間 0.5 秒、立ち下げ時間 0.3 秒の電流指令値とした。

ここで、電圧指令値は、0 以上のときバンクコンデンサの放電 (力行)、0 以下のときバンクコンデンサの充電 (回生) 動作に対応する。バンクコンデンサ電圧を使ったリアルタイム電圧フィードバックによる充電制御 [4] をおこなったが、系全体の制御量がおおきくなりバンクコンデンサ電圧だけでなく負荷電流が不安定になる可能性

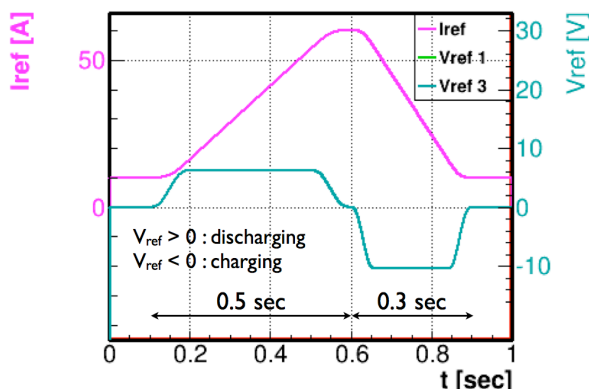


Figure 4: Example of referenced current (I_{ref}) and referenced voltage ($V_{ref1,3}$) for chopper 1,3.

がある。そこで、Figure 5 に示すように、サイクル開始時のバンクコンデンサ電圧を使って、計算で得た電圧指令値に補正をかけることで、加速器の運転サイクルにあわせてバンクコンデンサを充電する回生制御の開発を目指した。補正に使用する係数 (以下回生係数, $K_{rec1,3}$) は、サイクル開始時のバンクコンデンサ電圧 ($V_{c1,3}$) と充電目標電圧 (V_0) を使って、

$$K_{rec1,3} = 1 + K \times \frac{(V_0 - V_{c1,3})}{V_0} \quad (3)$$

として定義し、回生時の電圧指令値に適用する (Figure 6)。ここで、K は回生量を調整するための比例係数である。もちろん、回生係数は各バンクコンデンサ毎に計算し、それぞれの変換器の電圧指令値に適用される。

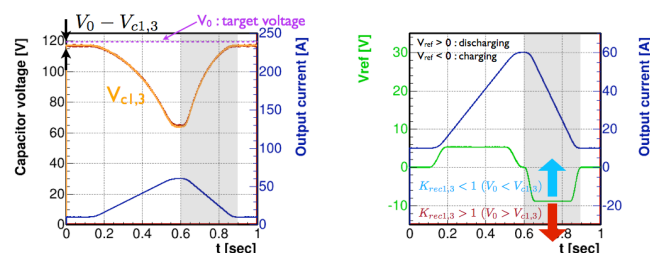


Figure 5: Schematic of recovery control.

また、この回生制御は、バンクコンデンサ電圧が安定することで電圧指令値も安定していく制御になっている。

4. 試験電源を使った回生制御の試験

4.1 試験電源

本試験で使用した電源 (以下 試験電源) の回路構成及びその構成要素を Figure 7、Table 1 に示す。

4.1.1 主回路

試験電源は、3 つの変換器を直列に接続し、それぞれ

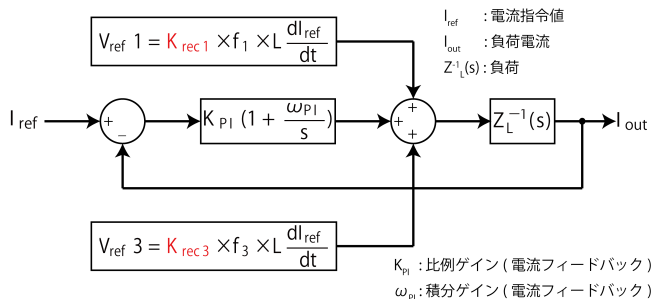


Figure 6: Control diagram in recovering floating capacitor voltage.

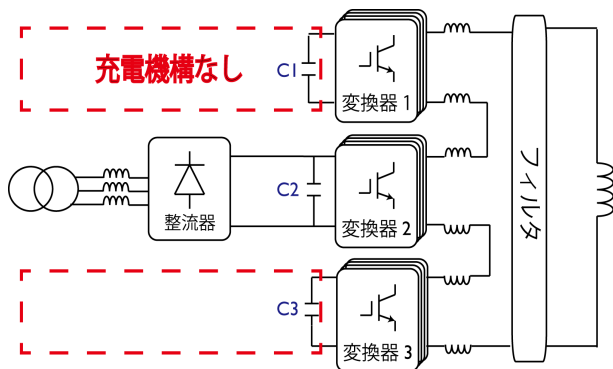


Figure 7: The schematic circuit of power supply with floating capacitor.

にエネルギー貯蔵のためのコンデンサバンクを接続する。また、3つのコンデンサバンクのうち、1つのコンデンサバンク (C2) は整流器を介し系統から常時受電することができるが、残りの2つ (C1,C3) は充電機構がなく、コンデンサバンクと負荷である電磁石との間でのみエネルギーを交換するフローティングキャパシタ方式の電源である。

4.1.2 制御部

制御部は、Figure 1 に示すように、制御に使用する出力電流、コンデンサ電圧をデジタイズする 24bit の A/D ユニット、各変換器の制御量を計算する制御ユニット、制御ユニットから各変換器の電圧指令値をバンクコンデンサ電圧で規格化した PWM 指令値 (デューティ比) を受取り、Pulse Width Modulation (PWM) 制御により半導体素子のゲート信号を生成する PWM ユニットで構成される。制御ユニットは、J-PARC 主電磁石新電源用に開発した専用ユニット (Figure 8) であり、測定量と出力電

Table 1: Parameters of Components for Main Circuit

整流器	3 相ダイオード整流
コンデンサバンク (C1,2,3) (単位コンデンサバンク)	2 mF, 2.5 kV × 8 台 (並列接続)
変換器 (単位変換器)	2kV, 200A, NPC 方式 4 kHz スイッチング
負荷 (電磁石)	L = 92 mH × 1 台 R = 46.3 mΩ × 1 台

流、電圧指令値から伝達関数を計算する。PWM ユニット (Figure 9) は、将来的な電源の並列多重化に向けて開発した多チャンネルのゲート信号生成基板である。様々な分野で使用されている VME 規格を採用し、VME バスを使うことで基板間の同期や位相、遅延、周波数を変更できる。また、制御計算へのノイズの混入を防ぐため、アナログ部とデジタル部の接続は、光ファイバにより絶縁している [5]。

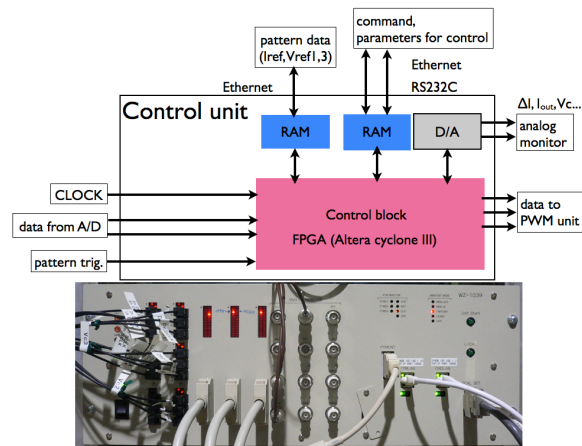


Figure 8: Schematic view and picture of control unit.

Gate pulse generator
(12ch PWM board)

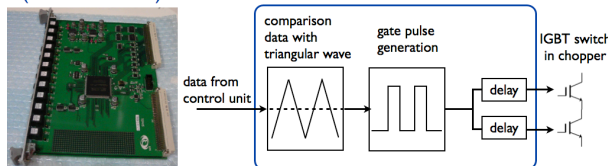


Figure 9: Schematic view and picture of PWM control unit.

4.2 通電試験結果

前章で述べた試験電源を使つての回生制御の通電試験結果を Figure 10 に示す。電流指令値は、Figure 4 と同じものを使用し、電流指令値、実負荷の乗数と Equation 2 ($f_1=f_2=0.5$) を使つて変換器 1,3 の電圧指令値を計算した。Figure 3 とは違いコンデンサ電圧がサイクルを繰り返す毎に目標電圧に近づいていき最終的には安定することを確認した。また、運転開始前の電圧にかかわらず目標電圧に収束していくことも確認できる。

さらに、この回生制御を利用して通電による充電機構のない C1,3 の初期充電を考える。電源立ち上げ時には、系統接続の C2 のみが定格まで充電されているが、C1,3 の充電電圧は 0 V であるため、電源の出力電圧は C2 の充電電圧に制限される。また、コンデンサに急激に電圧がかかってしまうことにも注意しなければならない。フラットトップの負荷電流指令値を試験通電時 (60 A) の 1/3 である 20 A に設定し、PWM 指令値に制限を与えつつサイクル通電を繰り返すことにより充電をおこなうことで初期充電を行う。今回の試験では、初期充電時は

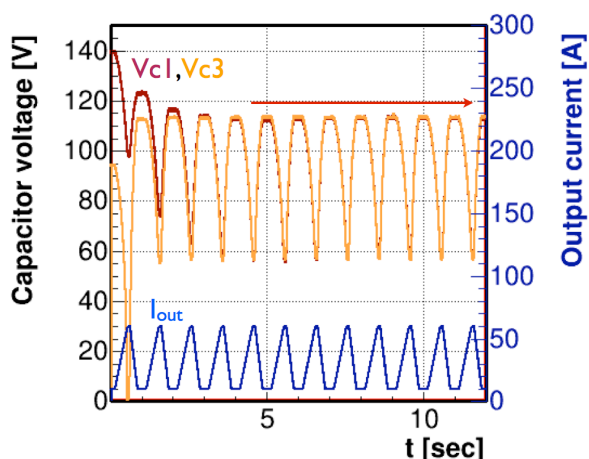


Figure 10: Test result of driving power supply with recovery control.

充電のみを行うため、PWM 指令値の上限を 0% に、下限を -2% に設定し通電により充電する。PWM 指令値に下限を設定することで、緩やかに充電ができていくことがわかる。Figure 11 に示すように、数 10 回のサイクルで C1,3 を ~110 V まで初期充電ができることを確認した。充電電圧 ~110 V は、目標電圧 120 V より低いコンデンサ充電電圧ではあるが、Figure 10 のように通電によってコンデンサ電圧を安定化させることができるので十分な充電電圧である。

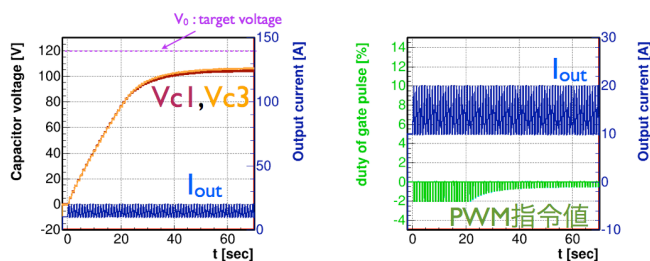


Figure 11: Initial charging with recovery control (left) and duty of gate pulse (right).

5. まとめ

J-PARC MR の高繰り返し化に向けて、主電磁石新電源の回路方式であるフローティングキャパシタ方式の制御方法を確立した。特に、バンクコンデンサ電圧の充電方法である回生制御を確立したことで、フローティングキャパシタ方式の課題である系統未接続バンクコンデンサの充電電圧の安定化および、初期充電方法の確立に成功した。また、フローティングキャパシタ方式の電源において、この回生制御と繰り返し学習制御^[5]による追従誤差の抑制^[6]が両立できていることも確認している。さらに、より高電圧、電流の通電においても、本稿で記述した回生制御を使うことで安定したコンデンサ電圧での運転できることも確認している^[7]。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] T.Shimogawa, et al., “Test demonstration of magnet power supply with the flying capacitor”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013
- [5] Y.Kurimoto, et al., “Precise Current Control in Accelerator Magnets with a Digital Feedback System”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 61, p.546-552, February, 2014.
- [6] T.Shimogawa, et al., “Test demonstration of magnet power supply with the floating capacitor method”, Proceedings of the 2nd International Symposium on Science at J-PARC, Tsukuba, Jul. 12-16, 2014 (will be published)
- [7] Y.Morita, et al., “Prototype Development Of J-PARC Main Ring Main Magnets Power Supply For High Repetition Rate Operation”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 8-12, 2014