

フローティングキャパシタ方式の電圧安定制御の開発 DEVELOPMENT OF CHARGING CONTROL FOR FLOATING CAPACITOR METHOD

下川 哲司^{*A)}、栗本 佳典^{A)}、森田 裕一^{A)}、三浦 一喜^{A)}、内藤 大地^{A)}、佐川 隆^{B)}

Tetsushi Shimogawa^{*A)}, Yoshinori Kurimoto^{A)}, Yuichi Morita^{A)}, Kazuki Miura^{A)}, Daichi Naito^{A)}, Ryu Sagawa^{B)}

^{A)}High Energy Accelerator Reserach Organization

^{B)}Universal Engineering

Abstract

Various power compensation devices have been studied to stabilize the power converter for the electro magnets. Especially, a power variation of the main grid by the flicker, which is generated a power converter operation of MW class such J-PARC, is a serious issue. We adopted the capacitive-energy-storage scheme for the new power converter to suppress the further power variation by the upgrade of the J-PARC main ring (MR). We also adapted the floating capacitor scheme, which is exchanged the energy between load magnets and capacitors, as the new power converters. However, as there are no rectifiers in floating capacitors, establishing a charging method including pre-charge of capacitors in the floating capacitor scheme is very important. In this report, we propose the charging method for the floating capacitor scheme reflecting the operation sequence in J-PARC main ring. We also report test result of the charging method of the floating capacitor scheme with the new power converter for bending magnets in J-PARC MR.

1. はじめに

ハドロンや重イオン用の大型シンクロトン加速器で使用する電磁石は、加速粒子の質量が重いため加速エネルギーにあわせて電磁石の励磁電流を変化させるパタン電流出力の電源が必須である。さらに、インダクタンス負荷である電磁石を速い繰り返しで励磁するためには、電流パタンの周期が短縮されるため、電源の出力電圧が増加する。また、励磁パタン電流の立上げ時にコイルへ供給したエネルギーが立下げ時にコイルから電源側へ回生されるため、大電力を負荷と系統間で交換することとなり、系統の電力変動にもつながってしまう。これらの課題への対策として、CERN PS booster の電磁石電源 [1] や J-PARC 主リング (MR) で開発中の新電源 [2] に採用されているフローティングキャパシタ方式とよばれる大容量キャパシタバンクをエネルギー貯蔵装置として使用する回路方式がある (Fig. 1)。この回路方式では、インダクタンス成分の電力供給を行うチョップ回路により、負荷とキャパシタバンク間でのみエネルギー交換を行い、系統からは負荷および回路内の抵抗成分のみを受電することで、系統の電力変動を抑制することが可能になる。さらに、2つの役割を持つチョップ回路を直列に接続する必要があるため、チョップ回路の多重直列に接続することで負荷への高電圧の供給も可能となる。また、高電位の整流回路を削減できるという物量、構造の面でも大きな利点がある。

しかしながら、この方式ではインダクタンス成分を担保するチョップ回路には整流器が接続されておらず、出力電流を立上げるために負荷へ供給した電力を出力電流の立下げ時にキャパシタバンクへ回生し充電する必要がある。さらに、回路内にはケーブルや各種素子等がもつ寄生抵抗等が存在するため、整流器未接続のチョップ回路に接続されているコンデンサの電圧が十分に充電されないという問題が生じる。さらに、大容量キャパシタバ

ンクの初充電の方法の確立も重要になってくる。本稿では、J-PARC MR の偏向電磁石 (BM) 用新電源を用いて、J-PARC MR の運転を考慮し、開発したフローティングキャパシタ方式の電圧安定制御および大容量キャパシタバンクの充電制御について報告する。

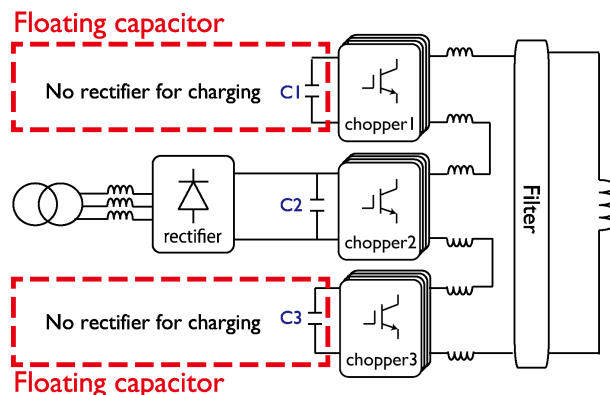


Figure 1: Schematic view of a power converter with the floating capacitor scheme.

2. フローティングキャパシタ方式の電源の動作原理

第1章で紹介した通り、フローティングキャパシタ方式の電源では、整流器未接続のチョップ回路はインダクタンス成分のみを分担し、負荷とキャパシタバンク間でのみエネルギーの交換を行うチョップ回路とその他の成分を分担する整流器接続のチョップ回路が存在する。負荷のインダクタンス成分を L 、抵抗成分を R 、電源の出力電流を $I_{out}(t)$ とすると、全出力電圧 ($V_{out}(t)$) は、

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

* tetsus@post.j-parc.jp

となる。このうち、整流器未接続のチョッパ、整流器接続のチョッパが分担する出力電圧 ($V_{out, floating}(t)$ 、 $V_{out, charging}(t)$) は、それぞれ、

$$V_{out, floating}(t) = f_1 \times L \frac{dI_{out}(t)}{dt} \quad (2)$$

$$V_{out, charging}(t) = f_2 \times L \frac{dI_{out}(t)}{dt} + RI_{out}(t) \quad (3)$$

となる。ここで、 f_1 、 f_2 は、整流器未接続チョッパ回路と整流器接続のチョッパ回路が分担するインダクタンス成分の割合である。さらに、インダクタンス成分は電力を消費しないため、インダクタンス成分のみを分担すれば、整流器未接続チョッパ回路は出力電流パターンにあわせての負荷との電力の交換を行い充放電を繰り返すこととなる。

3. J-PARC MR 偏向電磁石用新電源を使った制御試験

電圧安定化制御および充電制御の実証を行うにあたり、J-PARC MR BM 用新電源 [2] を使って試験を行った。Figure 2 に示すように、この電源は6つの出力チョッパ回路が直列に接続されており、chopper 3、4 はシステムから受電するための整流器が接続されているが、chopper 1、2 と chopper 5、6 には整流器に接続されていないフローティングキャパシタ方式の電源である。また、負荷には $L=57.8 \text{ mH}$ 、 $R=43 \text{ m}\Omega$ の電磁石を用いた。本試験は、制御試験のため、低パワーでの通電で試験が可能である。さらに、フローティングキャパシタ方式の動作の特徴である、出力電流の立上げ/立下げ時のキャパシタ電圧の放電/充電をわかりやすくするために、各チョッパの電圧供給源となるキャパシタバンクの静電容量を定格の半分の 240 mF にして試験を行った。

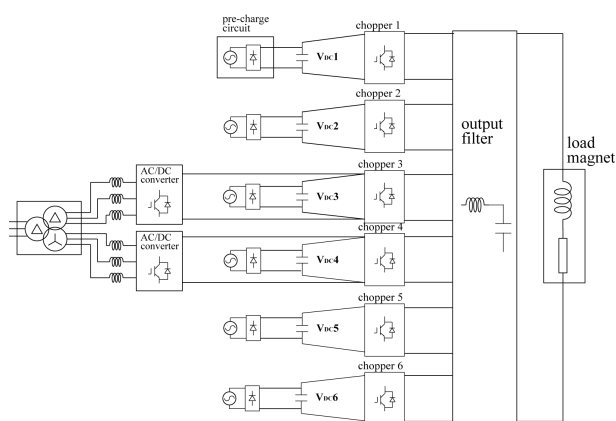


Figure 2: Schematic view of the power converter for this demonstration.

3.1 パタン通電におけるキャパシタバンク電圧の安定化

Figure 3 に制御のダイアグラムを示す。出力電流を指令パターン電流通りに制御する必要があるため、整流器接続のチョッパ回路 (chopper 3、4) は PI(Proportional-Integral) 制御による電流フィードバック制御によって出

力電流を担保させる。前章で記述した通り、整流器未接続のチョッパ回路 (chopper 1、2、5、6) にはインダクタンス成分のみを分担させるために、3 に示した出力電圧を電圧パターンとして、電圧フィードフォワード (FF) 制御により必要電圧のみを出力するような制御としている。chopper 3、4 に接続されたキャパシタバンクは、整流回路によってシステムから受電を行い常に 1500 V に充電されている。

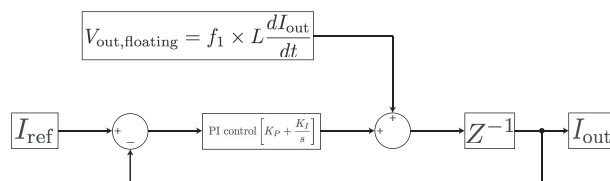


Figure 3: Control diagram for the power converter. The choppers without rectifiers are controlled only voltage feed-forward.

インダクタンス成分のみを分担させるような電圧 FF 制御による通電結果を Fig. 4 に示す。このとき、 $f_1 = 1$ として通電を行った。この制御の場合、chopper 1、2、5、6 に接続されたキャパシタバンクの充電電圧 (V_{DC1} 、2、5、6) がサイクル終了時にサイクル開始時の値まで充電されずに、サイクルを重ねるごとに減少していることがわかる。これは、負荷のインダクタンス成分から回生されるべき電力が回路内の寄生抵抗等で消費されてしまうためである。これでは、最終的に放電してしまい、連続での負荷通電ができなくなってしまう。

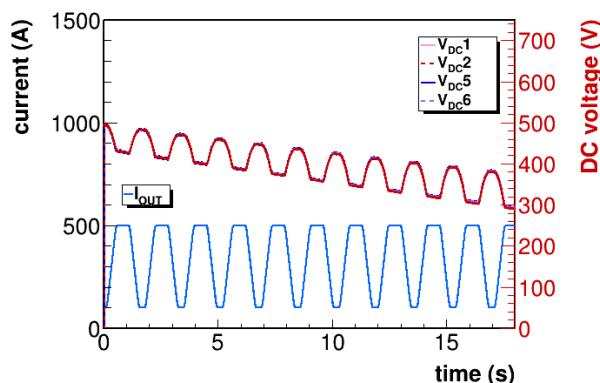


Figure 4: The output current and the voltages of V_{DC1} , 2, 5, 6 controlling with only feed-forward voltage.

そこで、我々は、Fig. 5 に示すような制御を開発 [3]、適用することで、サイクル終了時の chopper 1、2、5、6 接続のキャパシタバンクの充電電圧 (V_{DC1} 、2、5、6) がサイクル開始時の電圧まで充電し、安定に連続運転が可能となったことを確認した (Fig. 6)。電圧 FF 制御時と同様に $f_1 = 1$ この制御は、サイクル開始時のキャパシタバンクの充電電圧を参考にして、回生時の chopper 1、2、5、6 の出力電圧パターンを変動させるようなサイクル毎の遅い電圧フィードバック制御である。もちろん、充電電圧をモニタし、リアルタイムでのフィードバック制御に

より充電電圧を担保する方法もあるが、制御ループの中に複数のフィードバック制御をいれることになり、制御の安定性を損なう場合があるので注意すべきである。

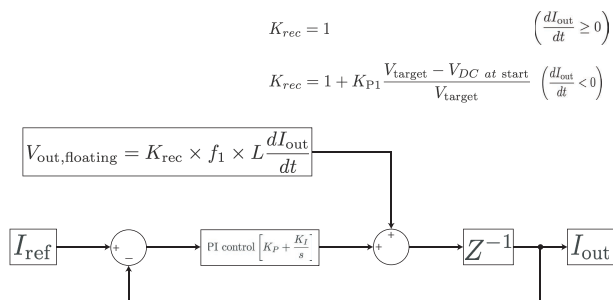


Figure 5: Control diagram for the power converter. The choppers without rectifiers are with the feed-forward voltage modulated by the slow feed-back control.

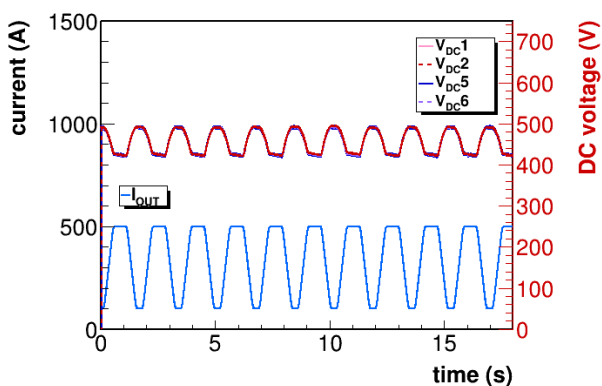


Figure 6: The output current and the voltages of $V_{DC1, 2, 5, 6}$ controlling with the modulated feed-forward voltage shown in Fig. 5.

3.2 フローティングキャパシタの充電制御

先に述べたように、フローティングキャパシタ方式では、負荷インダクタンス成分によって発生する大きな電力変動を吸収するだけの大容量のキャパシタバンクが必要である。もちろん、負荷を定格の電流パターンで励磁するためには、全キャパシタバンクを定格まで充電しなければならない。J-PARC MR BM 用新電源には、充電専用で 200 V、5 kVA の整流回路を設けているが、240 mF のキャパシタバンクを 1500 V まで充電するのに 1000 秒程度かかってしまい、パワー不足は否めない (Fig. 7)。高い電力供給が可能な整流回路を使用する方法もあるが、物量、電源のサイズアップが必要となり現実的ではない。そこで、システムからの電力供給が可能な chopper 3、4 のみを使って負荷へ電流を流し、その一部をキャパシタバンクへ流すことで初充電を行う方法を考案した。

制御方法は非常に単純で、Fig. 8 に示すように、chopper 3、4 はパターン運転時と同様に出力電流を担保する電流 FB 制御を行い、chopper 1、2、5、6 は、充電目標電圧と充電電圧の差を出力電圧指令値としてあたえた。ただし、キャパシタバンクへの急激な電流の流入を防ぐため

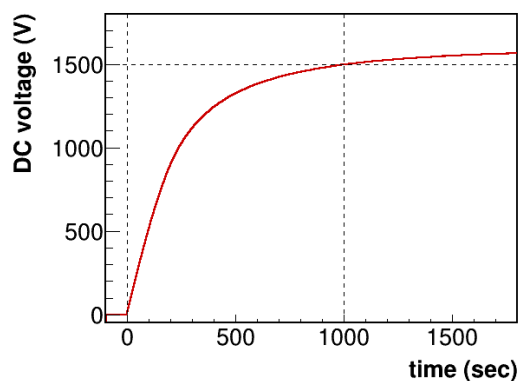


Figure 7: Charging of capacitors with pre-charge circuit.

に、出力電圧指令値にリミッタをいれ制限した。また、chopper 3、4 のみでの通電のため、高電圧の出力はできないため、サイクル開始時の電流 (フラットボトム電流) まで数秒かけて立上げ、そのままフラットボトム電流での DC で通電しながら、負荷および chopper 1、2、5、6 接続のキャパシタバンクへ電流を供給する。DC 通電時の出力電流によるキャパシタバンク充電時の出力電流、充電電圧 ($V_{DC1, 2, 5, 6}$) を Fig. 9 に示す。chopper 3、4 だけで、負荷に電流を 100 A 流しつつ、chopper 1、2、5、6 の電圧を 500 V まで 15 秒で充電できていることがわかる。さらに、急激な電圧の上昇もない。Figure 10 に、充電目標電圧を 500 V、1000 V、1500 V として、負荷への出力電流を使った充電制御による充電を行ったときの結果を示す。目標電圧にかかわらず一定の傾きで充電できており、60 秒程度で 1500 V まで達した。初充電回路からの充電に比べて、10 倍以上短い時間で充電ができることを確認した。

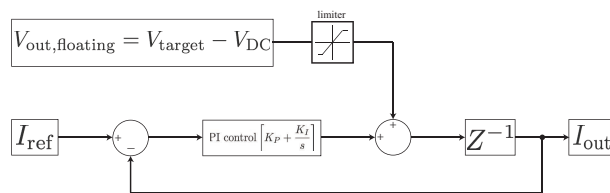


Figure 8: Control diagram for the charging control of capacitors with the output current of the power converter.

さらに、J-PARC MR では電流パターンの変更等の理由により、パターン通電を停止し、フラットボトム電流での DC 通電を継続するような運転モードがある。この運転モード時、chopper 1、2、5、6 のキャパシタ電圧が少しずつ放電してしまう。これは、J-PARC MR BM 用新電源のチョッパがフルブリッジチョッパであり 0 V 出力にするのが困難であるためである。そこで、充電電圧が設定閾値以下であり、なおかつパターン運転が終了している場合に、上記の充電制御による再充電シーケンスを導入した。その結果を Fig. 11 に示す。充電目標電圧を 500 V、再充電閾値を 400 V として試験を行った。最後のパターン出力終了後でかつ再充電閾値である 400 V を下まわった

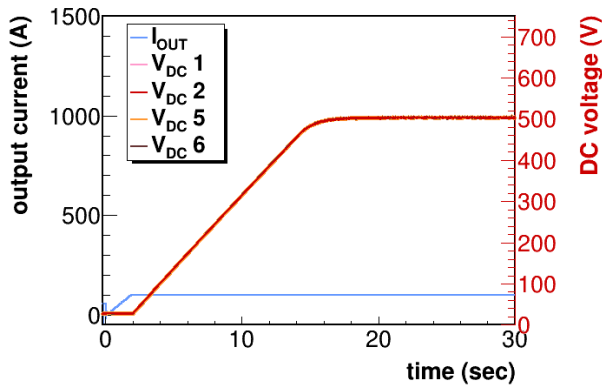


Figure 9: Charging of capacitors with the output current of the power converter. The target voltage is 500 V and the output current is 100 A DC.

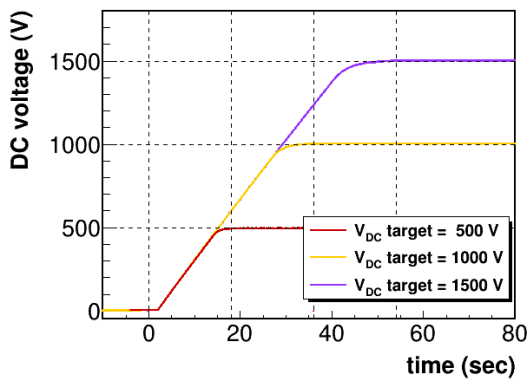


Figure 10: Charging of capacitors with the output current of the power converter changing the target voltages.

ときに、充電目標電圧である 500 V まで充電を行なっていることがわかる。

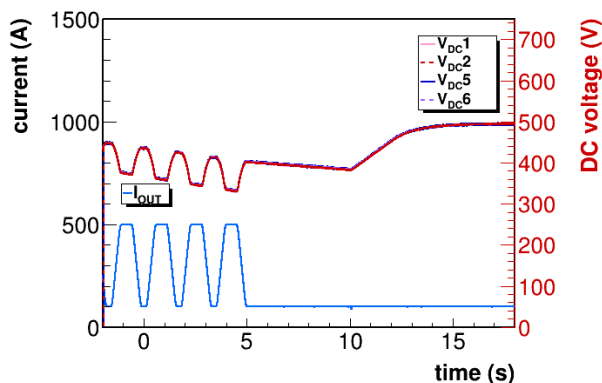


Figure 11: The demonstration for the sequence of recharging the capacitors.

4. まとめ

高繰り返しパタン電源に要求される高電圧出力、系統の電力変動を抑える回路方式であるフローティングキャパシタ方式の電圧安定化用制御の開発・実証を行った。現在、開発中の J-PARC MR BM 用新電源において、定常運転状態であるパタン電流で通電を行い、先に開発した制御により整流器未接続のキャパシタバンクの電圧を安定に制御できることを確認した。さらに、整流器未接続の大容量キャパシタバンクを出力電流を使って充電することで、5 kVA の初充電整流回路からの充電に比べて 10 倍以上短い時間で充電できることを確認した。さらに、J-PARC MR での運転を考慮し、パタン電流運転の停止時に起こるキャパシタバンクの電圧低下への対応として、再充電のシーケンスを導入・確立した。

参考文献

- [1] F. Bordry *et al.*, “A novel 60 MW Pulsed Power System based on Capacitive Energy Storage for Particle Accelerators”, EPE Journal, Vol. **18**, no. 4, December 2008.
- [2] T. Shimogawa *et al.*, “Status of new power supply for bending magnet in J-PARC Main Ring upgrade”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018.
- [3] T. Shimogawa *et al.*, “Test Demonstration of Magnet Power Supply with Floating Capacitor Method”, JPS Conf. Proc. 8; doi:10.7566/JPSCP.8.012021