

J-PARC MRにおけるキャパシタバンク制御試験用小型電源の開発

DEVELOPMENT OF COMPACT POWER SUPPLY FOR CAPACITOR BANK CONTROL TEST AT J-PARC MR

三浦一喜^{#,A)}, 下川哲司^{A)}, 森田裕一^{A)}, 栗本佳典^{A)}, 内藤大地^{A)}, 佐川隆^{B)}

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

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Universal Engineering

Abstract

In J-PARC Main Ring (MR), we plan to shorten the driving cycle from 2.5 sec to 1.3 sec for higher beam power. To achieve this, replacement of the power supplies of main magnets is mandatory. One of the requirements for the new power supply is to reduce the energy recovered from our electromagnets to the electric grid. To satisfy this demand, the new power supplies involve capacitor banks for such recovered magnetic energy. In particular, we adopt the floating capacitor method, in which some capacitor banks are not connected to the electric grid. To develop and demonstrate the control schemes of the voltage on such floating capacitors, we developed a compact power supply. We developed a compact power supply. The capacitance and charging voltage of the capacitor bank in this compact power supply are set to about one-tenth of the new power supply. In this report, we introduce the development of compact power supply for control test, and results of charging / discharging test between floating capacitor banks.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) では将来計画であるビーム大強度化のために、主リング(MR)の運転周期を2.5秒から1.3秒へと速める高繰り返し化を実現することが求められており、その計画の一部として高繰り返し対応の主電磁石用新電源の開発が進められている[1]。新電源への要求の一つとして、電磁石の励磁エネルギーを1次側へ回生することにより発生する系統の電力変動を抑えることが挙げられる。この要求に対して新電源ではキャパシタバンクを用いて回生エネルギーを貯蔵することで対応する[2]。特に我々はフローティングキャパシタ方式を採用するため、系統に接続しないキャパシタバンクの電圧制御が課題となる。我々はその電圧制御試験を目的として、キャパシタバンクの静電容量を新電源の十分の程度とした試験用小型電源をIPM(Intelligent Power Module)によるコンパクトなフルブリッジチョッパユニットとして開発した。本報告では制御試験用小型電源の開発およびフローティングキャパシタの初充電シーケンス制御の確立に向けて行ったキャパシタバンク間の充放電試験の結果について報告する。

2. 開発目的

現在開発中の Bending magnet (BM) 新電源の主回路構成を Figure 1 に示す。BM 新電源では6台のチョッパユニットを直列にし、それぞれのチョッパユニットにキャパシタバンクが接続されている。そのうち中央の2台のみを系統に接続し、上下の2台ずつは系統に接続しないフローティングキャパシタとしている。このフローティングキャパシタの初充電はフローティング部のチョッパユニットを回生動作させることにより、系統接続キャパシタバンクから負荷を介して充電する方式を採用している。その

初充電シーケンス制御の確立が現状の課題である。そこでチョッパユニットを2直列とした制御試験用小型電源の開発を行った。

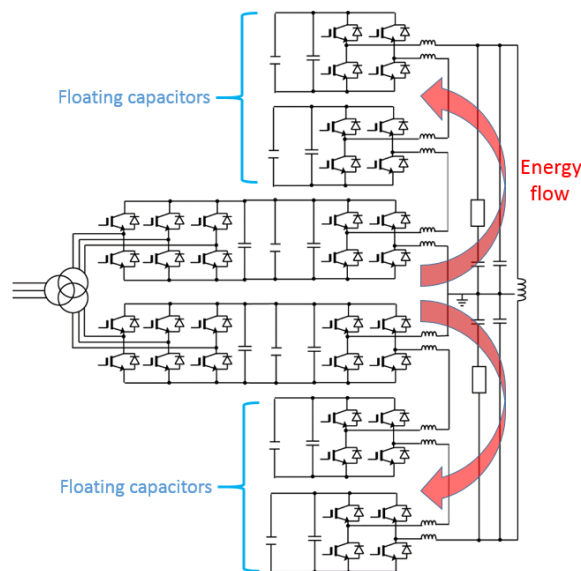


Figure 1: Main circuit of new power supply.

3. 小型電源主回路概要

本小型電源は、フルブリッジチョッパ2台、キャパシタバンク2台、出力フィルタ、負荷により構成されている。主回路の概要図を Figure 2 に示す。2台のフルブリッジチョッパ Chopper1, Chopper2 が直列に接続しており、キャパシタバンク C1, C2 がそれぞれに接続されている。今回の試験においては各キャパシタバンクを共にフローティングさせた状態で動作させ、それぞれへの初充電は初充電回路を用いて行った。

[#] kazuki.miura@kek.jp

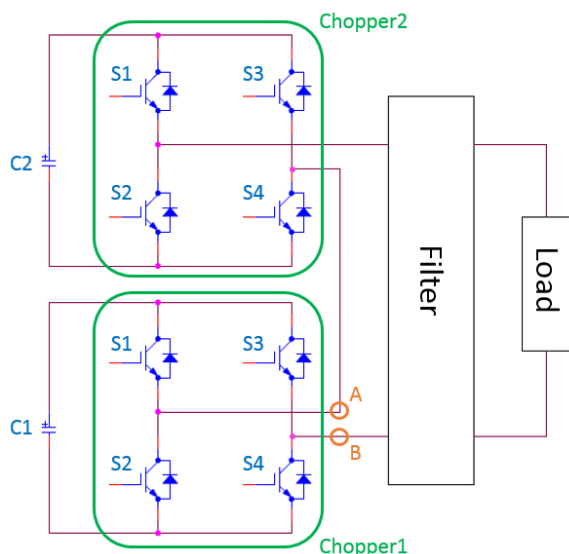


Figure 2: Main circuit of compact power supply.

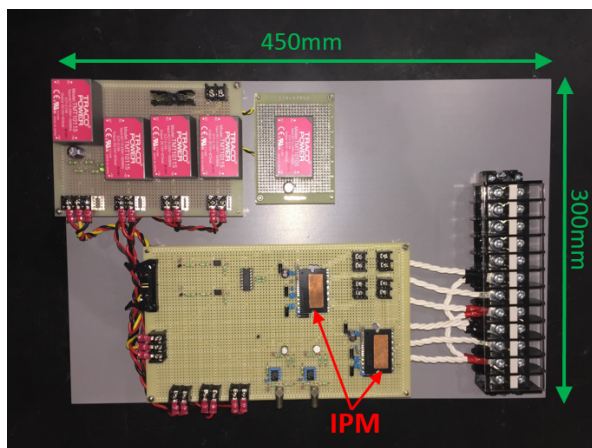


Figure 3: Chopper unit.

このフルブリッジチョッパユニットは、テーブルトップサイズの可搬型ユニットを目標として開発を行った結果、スイッチング素子に IPM を用いることで、Figure 3 に示すように A3 サイズ程度のコンパクトなチョッパユニットを実現した。今回使用した IPM は STM 社製の STGIB15CH6 OTS-L で、素子内部に定格 600V, 20A の IGBT を 3 並列、2 直列に内蔵しており、本小型電源では IPM 2 台で一つのフルブリッジチョッパを構成することで電流定格 60A を得ている。本小型電源におけるフルブリッジチョッパの基本的な動作を Table 1 に示す。S2,S3 を常時 OFF、S1,S4 を Table 1 のようにスイッチングさせることにより、力行、還流、回生の制御を行い、負荷への出力およびキャパシタバンク間でのエネルギーの交換を行う。

Table 1: Example of Chopper Operation

	S1	S2	S3	S4
力行	ON	OFF	OFF	ON
還流	ON			OFF
回生	OFF			OFF

4. IPM 周辺回路

IPM によるチョッパユニットを開発するうえで、動作上必要となる周辺回路について述べる。

4.1 ブートストラップ回路

IPM 内の High-Side(HS) IGBT をドライブするためには、HS-IGBT のゲート信号電圧を Low-Side(LS) IGBT のコレクタ・エミッタ間電圧分浮かせる必要があるため、ブートストラップ回路が必要となる。ブートストラップ回路の構成について Figure 4 に示す。IPM におけるブートストラップ回路はモーター駆動回路のように LS-IGBT もスイッチを行う回路であれば、ブートストラップキャパシタ (BSC) は LS-IGBT が ON した際に自動的に電源電圧へ充電されるが、今回の構成では S1, S2 において LS-IGBT は常時 OFF に対して HS-IGBT をスイッチング動作させる必要があったため、別途 BSC の充電を行う必要があった。そのため電源電圧 V_{cc} と同電圧の外部電源 V_{dd} を用意し、常時 BSC が充電されている状態を作ることによって、HS-IGBT のみのスイッチング動作を可能とした。

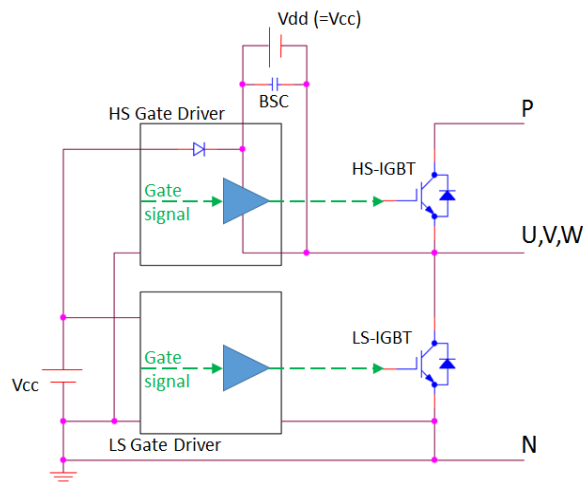
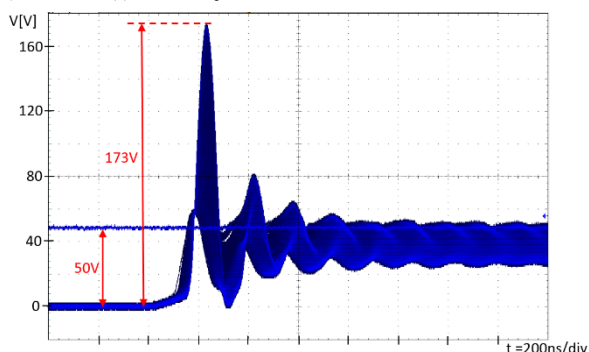


Figure 4: Bootstrap circuit.

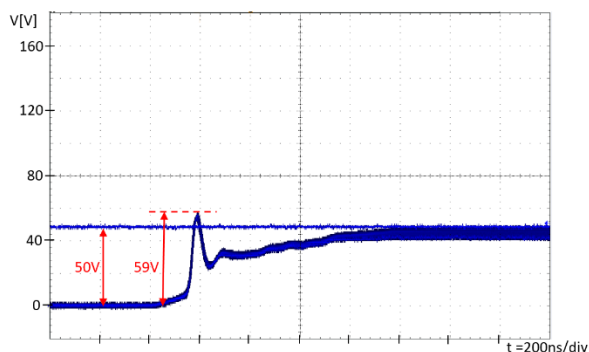
4.2 サージ対策

IGBT はスイッチングが速いため、ターンオフ時に大きな di/dt を発生し、IGBT 周辺の配線インダクタンスによるターンオフサージ電圧が発生する。そこで素子破壊を予防するための保護回路として、スナバ回路を導入してサージ電圧の吸収を図った。スナバ回路はスイッチング電源に対して一般的に用いられる RC スナバ回路を採用した。本サージ測定においては Figure 2 の A-B 間をショートして Chopper1 を分離、Chopper2 のみで動作とし、

キャパシタバンク C2 を 50V 充電した状態から、S4 は常時 ON、S1 をスイッチングさせることにより力行・還流モード(放電)動作させた時の S1 両端サージ電圧を重ね書きした試験結果を Figure 5 に示す。スナバ回路の導入により、スナバ回路無しの状態の Figure 5-(a)で充電電圧の約 3.5 倍出ているサージ電圧がスナバ回路有りの状態の Figure 5-(b) で 1.18 倍となり、サージ電圧を大幅に低減することに成功した。



(a) Without snubber circuit.

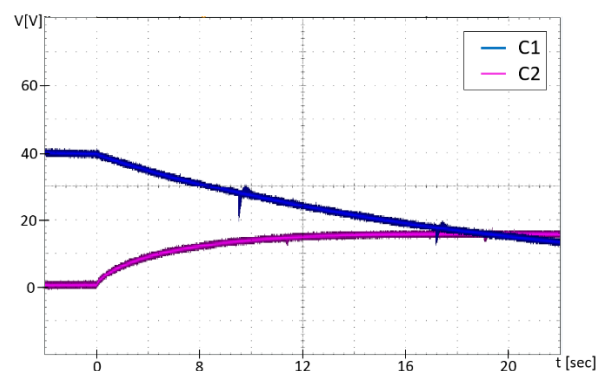


(b) With snubber circuit.

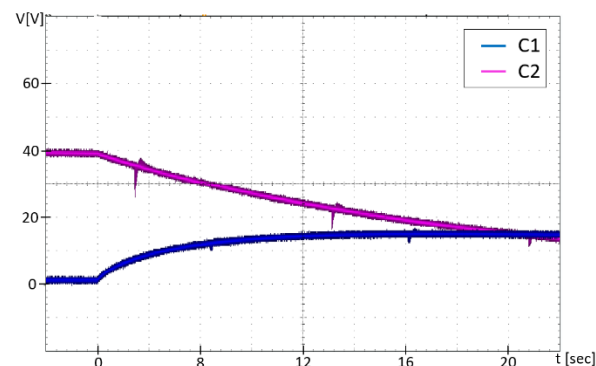
Figure 5: Surge measurement of IGBT.

5. キャパシタバンク間充放電試験

Chopper1 と Chopper2 をそれぞれ力行・還流モード(放電)と回生・還流モード(充電)にすることにより、キャパシタバンクを充放電させ、それぞれのキャパシタバンク間でエネルギー交換が行えるか試験を行った結果を Figure 6 に示す。それぞれにおいて放電動作をさせるキャパシタバンクを 40V に初充電、充電側キャパシタバンクが 0V の状態で充電・放電動作を行った結果、放電動作にあわせて充電側キャパシタバンクが充電されており、キャパシタバンク間でのエネルギーの交換に成功していることが読み取れる。この結果により今回開発した制御試験用小型電源の構成において、BM 新電源に向けたフローティングキャパシタの初充電シーケンス制御試験が可能であることが実証された。



(a) Discharge C1, Charge C2.



(b) Discharge C2, charge C1.

Figure 6: Charge and discharge of capacitor bank.

6. まとめと今後

J-PARC では将来計画であるビーム大強度化のために、MR の運転周期を 2.5 秒から 1.3 秒へと速める高繰り返し化対応の主電磁石用新電源の開発が進められている。新電源への要求の一つとして、電磁石の励磁エネルギーを1次側へ回生することにより発生する系統の電力変動を抑えることが挙げられる。この要求に対して新電源ではキャパシタバンクを用いて回生エネルギーを貯蔵することで対応するが、我々はフローティングキャパシタ方式を採用するため、系統に接続しないキャパシタバンクの電圧制御が課題となる。今回その電圧制御試験を目的としたテストベンチとして、キャパシタバンクの静電容量を新電源の十分の一程度とした試験用小型電源を開発した。小型電源はスイッチング素子として IPM を用いて開発し、フローティングキャパシタ間での充放電動作によるエネルギーの交換が可能であることを確認した。今後は初充電シーケンス制御の確立に向けて、Chopper1 の系統接続および電源制御部導入と制御試験を進めていき、BM 新電源に向けて備える予定である。

参考文献

- [1] Y. Morita *et al.*, "Development of J-PARC MR Main Magnets Power Supplies for High Repetition Rate Operation," JPS Conf. Proc., vol. 8, Sep. 2015, ID. 012006.
- [2] T. Shimogawa *et al.*, "Test Demonstration of Magnet Power Supply with Floating Capacitor Method," JPS Conf. Proc., vol. 8, Sep. 2015, ID. 012021.