

J-PARC 主リング高繰り返し化のための偏向電磁石用新電源開発の状況 STATUS OF NEW POWER SUPPLY FOR BENDING MAGNET IN J-PARC MAIN RING UPGRADE

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

It plans that the proton beam power provided to experimental facilities increase with shortening repetition period in J-PARC MR. As the shorten repetition period, the replacement of the power converters for main magnets in J-PARC MR is necessary to cope with issues such as power fluctuation of the Main Grid and increase of the output voltage. We have considered and developed the power converter with a 10 MW class which have the capacitor bank with large capacitance. In the end of 2017, the first new power converter for a bending magnets family is installed in J-PARC site and the power test is ongoing using a dummy load. In this report, the first new power converter for a bending magnets family in J-PARC MR is reported including the test result.

1. はじめに

J-PARC 主リング (MR) は、3 GeV から 30 GeV へ加速した陽子ビームをニュートリノ実験施設およびハドロン実験施設へ供給する陽子シンクロトロンである [1]。MR には、加速した陽子ビームを瞬時に蹴り出しニュートリノ実験施設へ供給する速い取り出し (FX)、ハドロン実験施設へ約 2 秒かけてビームを供給する遅い取り出し (SX) の 2 つの運転モードがあり、現在、それぞれの実験施設にむけて FX では 480 kW、SX では 50 kW のビーム強度を達成している。さらなる大強度化を目指し、繰り返し周期を現在の 2.48 秒から 1.3 秒 (FX 時) まで短縮することを計画している。

ビームの加速時間、取り出し後の電磁石励磁電流立上げ時間を短縮することにより繰り返し周期を短縮するため、電磁石の励磁電流の勾配は大きくなる。そのため、電磁石電源の出力電圧の増加や電磁石に蓄えられたエネルギーを 1 次側へ回生することによって生じる系統の電力変動の増大が問題となる。さらに SX 時には取り出しビームの時間構造の平滑化のために、出力電流の高精度化も求められる。これらの要求に対して、チョップの直列接続による高電圧出力、大容量キャパシタバンクによるエネルギー貯蔵、高速スイッチングと出力フィルタによるスイッチングリップルの低減、低ノイズ制御装置を持つ新電源を開発し、現行電源との置き換えることを計画している。

これまでに、テスト用のミニ電源を使用して、回路構成、制御方式等の検討を行い、2016 年に新電源一号機である小型 4 極磁石用に新電源を開発し、ビーム運転での運用に成功した [2]。小型 4 極磁石用電源の開発は、新電源実機の先行機の位置付けであり、偏向電磁石電源を含む全ての主電磁石電源を使用することを考慮したパワーユニット、制御装置の実機開発、長期安定性確認の意味合いももつ。これらの経験を元に、2017 年には最大出力パワーを持つ偏向電磁石 (BM) 用新電源を開発し、現在試

験を行なっている最中である。本稿では、2017 年に完成した偏向電磁石用新電源について現在行なっている模擬負荷を用いた試験結果を交えて報告する。

2. J-PARC MR 偏向電磁石用新電源

Table 1、Fig. 1 に示した BM 用新電源の定格および実機の写真にあるとおり、BM 用新電源は出力 10 MVA の非常に大型の電源である。その分、負荷と交換するエネルギーもおおいため、2016 年度に製作した小型 4 極磁石用電源と違いエネルギー貯蔵装置である大容量のキャパシタバンクを有する。また、変換器、キャパシタバンク共にサイズが大型となることや安全性を考慮し、変換器部のみを建屋内にキャパシタバンクはコンテナに収納して屋外に設置した (Fig. 2)。

Table 1: Rated of Power Converter for a Bending Magnet Family in J-PARC MR

Inductance at 30 GeV [H]	Flat bottom current [A]	Flat top current [A]	Output voltage at 1.3 sec repetition [kV]	Output power at 1.3 sec repetition [MVA]
1.47	190	1575	6.0	10

2.1 主回路構成

Figure 3 の回路図に示すように、3 相降圧絶縁変圧器、2 直列の 3 相 AC/DC コンバータ (整流回路)、大容量キャパシタバンク、6 直列フルブリッジチョップ、出力フィルタの回路構成となる。BM 用新電源には、小型 4 極磁石用電源とは違い 6 直列のチョップそれぞれにエネルギー貯蔵装置である大容量キャパシタバンクが接続されている。そのうち 2 つキャパシタバンクのみが AC/DC コンバータを介して系統に接続されており、負荷および回路内で消費されるエネルギーを補償する。残りの 4 つ

* tetsus@post.j-parc.jp



Figure 1: Pictures of power converters (upper) and a capacitor bank (bottom) installed in a container for the bending magnet family in J-PARC MR.

のキャパシタバンクは充電用の整流回路に接続されていないため、負荷電磁石との間で磁気エネルギー交換するフローティングキャパシタ方式を採用している。この方式により、整流回路が大幅に削減でき、さらに高電位の整流回路をなくすことを可能とした設計となっている。

回路内の変換器、AC/DC コンバータ、チョッパは、それぞれ小型 4 極磁石用電源開発時に開発したパワーユニット (定格 1700 V、525 A の Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) ハーフブリッジユニット, Fig. 4) [2] の組み合わせで構成されており、さらに電源の出力定格にあわせて 3 並列 2 直列の AC/DC コンバータ、3 並列 6 直列のチョッパという構成になっている。AC/DC コンバータは、6.6 kV 交流を 2.5 MVA Δ - Δ -Y 結線の降圧絶縁変圧器で降圧された 600 V を受電し、DC 電圧に整流する。チョッパは、大容量キャパシタバンクに貯められたエネルギーを使って、電流指令値に従った出力電流を負荷に流すために必要な電圧を負荷両端に出力する。それぞれのチョッパに接続されている大容量キャパシタバンクは、静電容量 5 mF の乾式フィルムコンデンサを 96 並列に接続した構成となっており、1 バンクあたり 480 mF の静電容量をもつ [3]。

出力フィルタは、各チョッパのスイッチング周波数 (2 kHz) によって生じるスイッチングリップルを十分

に抑制できるような定数で構成したパッシブフィルタとコモンモードフィルタの組み合わせとなっている。

2.2 制御部構成

新電源 1 号機である小型 4 極磁石用電源と同じく KEK 製制御盤を採用している [4]。KEK 製制御盤は、異常状態の監視や集約、シーケンスコントロールといったスローコントロールは Programmable logic controller (PLC)、出力電流や DC リンクの電圧のリアルタイム制御に関しては、フル FPGA (Field Programmable Gate Array) ベースの制御装置がそれぞれ担う。

Figure. 5 に制御部の構成及び、制御部—電源主回路間の接続を示す。変換器盤と制御盤の接続は、PLC の FA LINK と呼ばれる PLC 間のネットワーク接続と、出力電流測定用の DCCT の出力、変換器盤内に設置した Analog-to-Digital (AD) 変換基板との通信用、変換器用 IGBT のゲート信号、緊急ゲート停止用の高速インターロック信号のみである。変換器盤内に設置した、slave PLC、AD 変換基板、異常検出用の基板等は、変換器の電位を基準とした設計となっている。これらの基板等の耐圧は、制御電源の入力部にはいつている絶縁トランスで担保している。加えて、それぞれの信号は、光信号への変換、計測器自体の仕様により絶縁しているため、主回路、制御盤間のグラウンド、制御電源の混色はない。また、電源の構成によって、モニタする測定点の信号が大幅に増加することを懸念し、変換器盤内の AD 基板は、データチェインによる複数の AD 基板の接続によるデータ転送が可能な設計となっている。そのため、モニタする測定点に比例して、入出力信号点数の大幅増加はない。高速インターロック信号も各変換器盤内で生成、集約されるため増加しない。変換器用 IGBT のゲート信号点数は、モジュール化されたゲート信号発生装置 (PWM board) の枚数を増やすことで対応する設計とした。そのため、スローコントロール用の PLC のラダープログラム、リアルタイム制御用フル FPGA 制御装置のファームウェアといったソフトウェアの変更と FPGA の変更とゲート信号発生装置の枚数増加だけで全ての新電源への適用が可能な制御盤である。

3. 試験状況

2017 年末に完成した BM 用新電源は、J-PARC MR の第 4 電源棟にインストールされ、順次試験を行なっている。特に、キャパシタバンクは、貯蔵エネルギーが大きいため取扱いには注意が必要である。そのため、キャパシタバンクの容量を 0 mF (なし)、240 mF (半分)、480 mF (定格) と段階的に増やしながら試験を行なっている。また、実負荷である BM は、加速器の運転で使用中のため試験で使用することはできない。そのため、試験は模擬負荷 (予備の四極磁石) を用いておこなっている。Table 2 に示すように、模擬負荷は実負荷に比べてインダクタンス成分が 20 分の 1 程度と非常に小さいため高電圧での試験が難しい。そのため、我々は、キャパシタバンクの高電圧試験のために開発した、試験方法 [5]、[6] での高電圧出力試験を行なっている。この試験方法を用いれば、小さい負荷でもキャパシタバンク間でエネルギーを交



Figure 2: Picture of building which is installed power converters (left side) and containers for installing capacitor banks (right side).

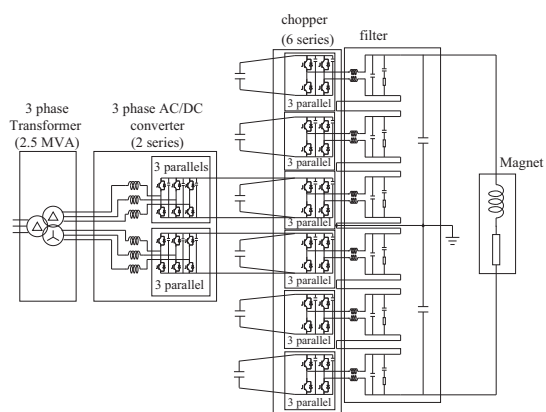


Figure 3: Schematic view of power converter for the bending magnet family in J-PARC MR.

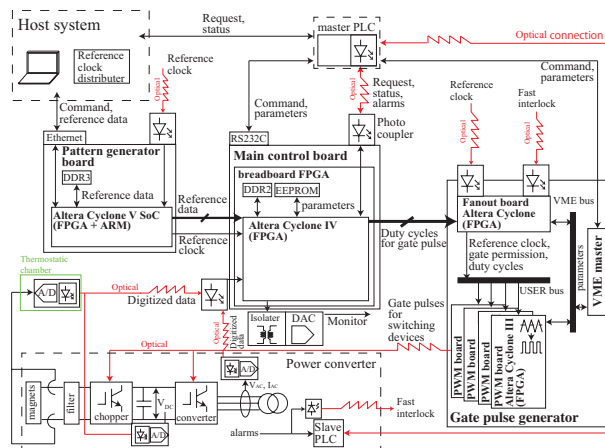


Figure 5: Overview of the controller.

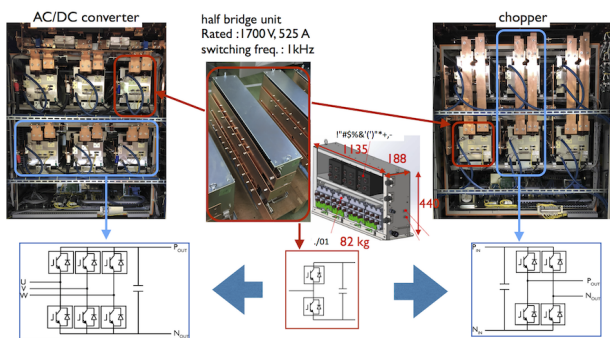


Figure 4: Schematic of the AC/DC converter and the chopper which construct of combination with the developed half bridge power units.

換することにより、負荷両端の電圧は小さいが各チョップの出力は高電圧を出力することが可能となる。また、BM用新電源はフローティングキャパシタ方式の回路方式であるため、キャパシタバンクのDC電圧を安定させ

る制御も重要である。そこで、高電圧出力の試験方法とフローティングキャパシタ方式の制御 [7] を組み合わせた方法で試験を行った。通常、フローティングキャパシタ方式の電源は、フローティングキャパシタと接続したチョップにインダクタンス分を分担させ、それ以外を整流器接続のチョップが分担する。インダクタンス L 、抵抗 R を持つ負荷への電源の出力電圧 (V_{out}) は、

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

と記述でき、フローティングキャパシタ接続のチョップの分担すべき出力電圧 ($V_{out, floating}$) とインダクタンス分の分担比を f_1 、整流器接続のチョップが分担すべき出力電圧 ($V_{out, charging}$) とインダクタンス分の分担比を f_2 とすると、

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

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

となる。通常、 $f_1 < 1$ 、 $f_2 < 1$ であつ 2つの和を 1 にするのだが、この試験では、負荷への出力電圧をのこした

まま、チョップパ 1、2 とチョップパ 5、6 間でエネルギー交換を行い、各チョップパの出力電圧を負荷電圧に対して高くするために、 f_1 をチョップパ 1、2 と 5、6 で異符号かつ和を 0、 f_2 を 1 とした。

Figure 6 に、上記試験方法での通電結果を示す。このとき、チョップパ 1、2、5、6 の f_1 は、それぞれ 4、4、-4、-4、 f_2 を 1 とすることで、上 (1、2) 下 (5、6) のフローティングキャパシタ間で電圧をやり取りし、負荷への電圧供給は整流器 (AC/DC コンバータ) に接続されているチョップパを使用する方法をとった。このとき、キャパシタバンク 3、4 の電圧は一定になるように制御している。出力電流の立上げの期間に、キャパシタバンク 1、2 が放電し、5、6 が充電している。立下げの期間では、逆の動作をしていることがわかる。出力電流立上げ時の電圧出力に注目すると、P-G 間電圧、G-N 間電圧は、それぞれ +900 V、-800 V 出力しているのに対し、負荷の両端 (P-N 間) 電圧は、100 V 程度しか出力されていない。これは、各チョップパからの出力電圧を ± 400 V 程度と大きくし、負荷の両端電圧 ($\sim \pm 100$ V) を保存したまま、対地電圧のみをおおきく動かしていることに相当する。今回の報告では、チョップパの出力電圧を高くした試験結果を報告したが、今後、同様の試験方法を用いて、 f_1 を全て負に設定することで、系統から直接ライティングキャパシタへの電力供給、ライティングキャパシタから系統への回生を行うことで、AC/DC コンバータの大電力試験も行うことが可能である。今後は、さらなる高電圧試験に加え、AC/DC コンバータの大電力試験も行なっていく予定である。

Table 2: Comparison of BM and the Dummy Load

	inductance [H]	Resistance [Ω]
BM	1.47	0.741
dummy load	0.0578	0.043

4. まとめ

J-PARC MR のアップグレードに向け、新電源の開発、インストールを順次すすめている。開発する電源の中で、もっとも出力パワーが大きい BM 用新電源が 2017 年末に、J-PARC サイトへインストールされ、現在模擬負荷を使用した試験中である。模擬負荷は実負荷に比べ、インダクタンスが特に小さいため、試験方法を工夫し、定格にできるだけ近づけた試験を継続中である。2018 年冬には、実負荷への定格通電を予定している。さらに、試験と並行して量産機の製作も行なっており、J-PARC MR アップグレードのための電源の開発、置換えは順調にすすんでいる。

参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC 加速器の現状 FPS014”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018.
- [2] T. Shimogawa *et al.*, “First new power supply of main magnet for J-PARC main ring upgrade”, in Proceedings of the

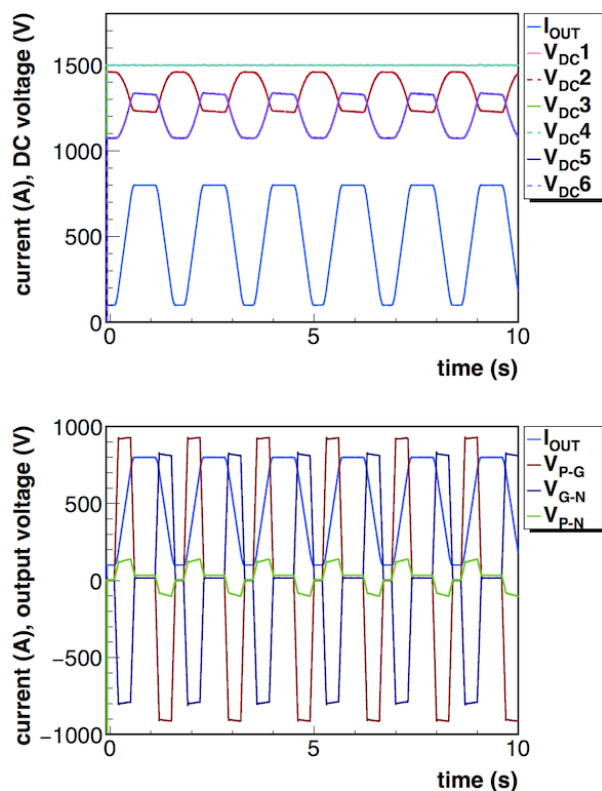


Figure 6: Test result with the dummy load. The output current, DC voltages in capacitor banks (top) and output voltages (bottom) are shown.

14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Hokkaido, Japan, 2017.

- [3] Y. Morita *et al.*, “Development of capacitor bank of J-PARC MR main magnet power supply for high repetition rate operation”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1056-1060.
- [4] T. Shimogawa *et al.*, “A Control System of New Magnet Power Converter for J-PARC Main Ring Upgrade”, Conference record of 21st IEEE Real Time Conference, Colonial Williamsburg.
- [5] Y. Kurimoto *et al.*, “A High Power Test Method for Pattern Magnet Power Supplies with Capacitor Banks”, JPS Conf. Proc. 8. doi:10.7566/JPSCP.8.012007.
- [6] Y. Morita *et al.*, “Stability test for power converters in high-powered operations for J-PARC MR main magnets”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 870 (2017) pp.12-18.
- [7] T. Shimogawa *et al.*, “Test Demonstration of Magnet Power Supply with Floating Capacitor Method”, JPS Conf. Proc. 8. doi:10.7566/JPSCP.8.012021.