

## J-PARC 主リングの高繰返し化のための主電磁石電源の構成

### POWER SUPPLY SYSTEM OF J-PARC MAIN RING MAIN MAGNETS FOR HIGH REPETITION RATE OPERATION

森田裕一<sup>#</sup>, 栗本佳典, 下川哲司, 内藤富士雄, 中村衆, 岡村勝也

Yuichi Morita<sup>#</sup>, Yoshinori Kurimoto, Tetsushi Shimogawa, Fujio Naito, Shu Nakamura, 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. At the same time, current ripple reduction is required in order to increase the beam quality for the hadron experiments. We have been developing power supplies which have potentials to solve these problems and plan to replace the current power supplies with them. The new power supply system has following features. The number of power supply is twice so that one power supply drives half number of loads compared with the current system. The power supply is consists of some choppers which are wired in series. The energy recovery scheme based on the capacitive energy storage is introduced. Parallel connected choppers increase the equivalent switching frequency so that the switching ripple is possible to be reduced by the filter. This paper introduces the power supply system of J-PARC MR main magnets for high repetition rate operation.

#### 1. はじめに

J-PARC 主リングでは、ニュートリノビームラインへのビームパワーを増強するために繰返し周期を現状の 2.5 秒から 1 秒へ速める。高繰返し化に伴って、主電磁石電源では次の 2 点が問題となる。

- (1) 出力電圧の増加
- (2) 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る系統の電力変動

さらに、ハドロン実験へのビームの性能向上のために、

(3) 出力電流フラットトップの低リップル化も求められている。これらの問題を解決するために新たに主電磁石電源を開発し、現行電源と入れ替える計画である。

本報告では実験結果を交えて高繰返し化のための主電磁石電源の構成を紹介する。

#### 2. 現行主電磁石電源

現行の主リング主電磁石電源一覧を Table 1 に示す。BM1~6 は偏向電磁石電源、QFN~QDX はアーク部四極電磁石電源、QFP~QDT は直線部四極電磁石電源、SFA~SDB は六極電磁石電源である。

Table 1: Main Magnets of Main Ring

Power Supply	Total Inductance [H] at 30 GeV	Flat Base Current [A]	Flat Top Current [A]	Output Voltage [kV] 2.5 sec / 1 sec
BM1~6	1.47	190	1570	2.6 / 5.8
QFN	2.93	86	710	2.7 / 5.6
QDN	3.46	86	710	3.1 / 6.7
QFX	2.39	88	730	2.6 / 4.8
QDX	1.75	86	710	1.6 / 3.4
QFR	0.57	77	640	0.5 / 1.3
QDR	0.44	75	620	0.4 / 0.7
QFP	0.20	77	640	0.3 / 0.4
QFS	0.30	81	670	0.3 / 0.5
QDS	0.35	110	890	0.5 / 0.9
QFT	0.32	95	780	0.4 / 0.7
QDT	0.37	90	750	0.4 / 0.7
SFA	0.42	23	200	0.3 / 0.4
SDA	0.41	19	160	0.2 / 0.3
SDB	0.41	19	160	0.2 / 0.3

BM1~6	1.47	190	1570	2.6 / 5.8
QFN	2.93	86	710	2.7 / 5.6
QDN	3.46	86	710	3.1 / 6.7
QFX	2.39	88	730	2.6 / 4.8
QDX	1.75	86	710	1.6 / 3.4
QFR	0.57	77	640	0.5 / 1.3
QDR	0.44	75	620	0.4 / 0.7
QFP	0.20	77	640	0.3 / 0.4
QFS	0.30	81	670	0.3 / 0.5
QDS	0.35	110	890	0.5 / 0.9
QFT	0.32	95	780	0.4 / 0.7
QDT	0.37	90	750	0.4 / 0.7
SFA	0.42	23	200	0.3 / 0.4
SDA	0.41	19	160	0.2 / 0.3
SDB	0.41	19	160	0.2 / 0.3

以後、BM1~6, QFN, QDN, QFX, QDX を”大型電源”、その負荷を”大型負荷”と称し、大型電源以外の主電磁石を”小型負荷”、その電源を”小型電源”と称する。以下では、大型電源の構成を紹介する。

#### 3. 高繰返し化のための電源開発

第 1 章で挙げた 3 つの問題を解決すべく、以下の特長を備えた電源を開発する。

<sup>#</sup> yuichi.morita@kek.jp

3.1 Figure 1 に示すように、現行の電磁石電源では、それぞれの大型負荷を1つの電源で駆動している。しかし、Table 1 より、出力電圧が大きいものは 6 kV 以上にも達し、耐圧的に運転不可能である。そこで、Figure 2 に示すように各負荷を2分割し、それぞれに電源を用意することで出力電圧を抑える。さらに、図中の Chopper 1, Chopper 2 内では、各々チョッパを直列につなぎ、電源の耐圧を高める。

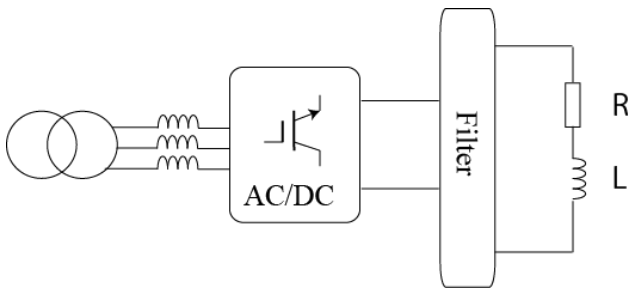


Figure 1: Block diagram of current power supply.

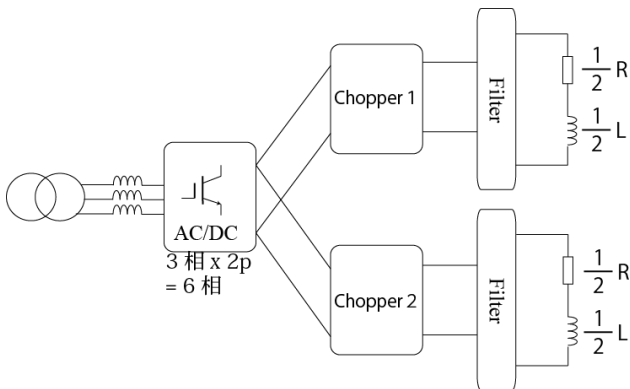


Figure 2: Block diagram of new power supply. The load for each chopper is half compared with that of current power supply.

- 3.2 フィルムコンデンサを用いたエネルギー貯蔵方式を採用し、主電磁石とコンデンサの間で電力をやり取りすることで、系統からの充電は抵抗損失分のみとする。
- 3.3 高速のチョッパを並列多重し、出力フィルタでスイッチングリップルを十分除去できる程度まで等価スイッチング周波数を大きくする。

上記の方法による解決を目指しているが、これらの懸案事項として、

1. 負荷を2分割すると電源の台数が2倍になってしまう。
2. パルス運転によりフィルムコンデンサ寿命が短くなることが懸念される。
3. 各々のチョッパのアンバランスによりチョッパ

間に電流が流れる。等がある。

2については交流電圧によるコンデンサ寿命試験が進行中である。3についてはチョッパ間にリアクトルを入れることを考えており、ミニモデルによる試験を予定している。

## 4. 主電磁石電源の構成

高繰返し化に向けた新しい主電磁石電源の構成を紹介する。

### 4.1 大型電源の構成

Figure 3 に大型電源の回路ブロック図を示す。

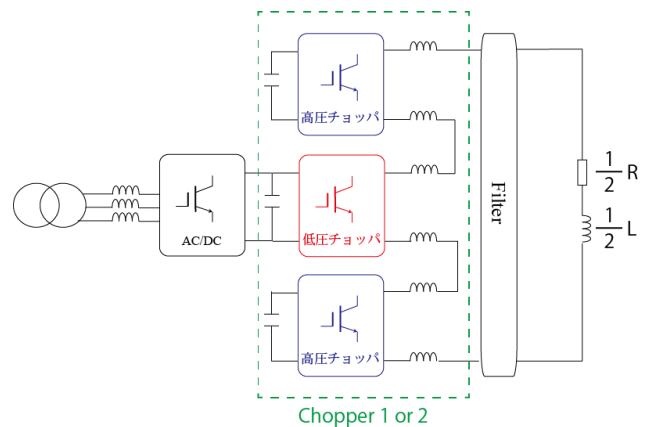


Figure 3: Block diagram of large power supply.

Figure 2 の Chopper 1, 2 に当たる部分は2種類のチョッパで構成される。Table 2 に各チョッパのパラメータを示す。使用するスイッチング素子は IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)等を想定している。AC/DC コンバータには Table 3 に示すパラメータをもつものを使用する。

大型負荷を駆動するには耐圧の大きな電源が必要である。そこで、高圧チョッパと低圧チョッパを直列に接続して耐圧を高める方法を探る。低圧チョッパには単相 NPC (Neutral Point Clamped)インバータ方式のものを用い、その正側と負側に高圧チョッパを配することでコモンモードが原理的に流れない構成となる<sup>[1][2]</sup>。

低圧チョッパは負荷の抵抗成分全てと僅かながら L 成分を駆動し、高圧チョッパは残りの L 成分を駆動する。すなわち、出力電圧が大きくなる電流の立上り及び立下り時には高圧チョッパによる駆動が主であり、出力電圧が小さく低電流リップルが求められるフラットトップ時には低圧チョッパによる駆動が主となる。これにより、スイッチング周波数が小さいが耐圧は大きい高圧チョッパと、耐圧が小さいがスイッチング周波数は大きい低圧チョッパの長所を両方とも活かした動作が可能となる<sup>[2]</sup>。

Table 2: Specification of Choppers for Large Power Supply

	低圧チョッパ	高圧チョッパ
方式	単相 NPC インバータ	単相フルブリッジ
充電電圧 [kV]	~2	~3
スイッチング周波数 [kHz]	5~7	2~3

Table 3: Specification of AC/DC converter

方式	三相 PWM コンバータ
充電電圧 [kV]	~2
スイッチング周波数 [kHz]	<1

4.2 コンデンサを用いたエネルギー貯蔵方式

電磁石を駆動すると電磁石に磁場エネルギーが蓄えられる。この磁場エネルギーを回生時に系統へ返してしまうと総量で数十 MVA 程度の電力変動が生じて問題となる。コンデンサを用いたエネルギー貯蔵方式では Figure 3 のように各チョッパにバンクコンデンサを用意し、回生時に戻ってくる磁場エネルギーを充電エネルギーとしてコンデンサに貯め込み、このエネルギーを次のサイクルでの電磁石の励磁に再利用する。電磁石とコンデンサとの間で大部分のエネルギーをやり取りし、系統からは抵抗損失のみを給電すればよいことになる。

それぞれの電源に必要なバンクコンデンサ容量を計算した。BM の電流パターンとして Figure 4 の曲線を仮定すると、電源各部の電圧は Figure 5 のようになる。

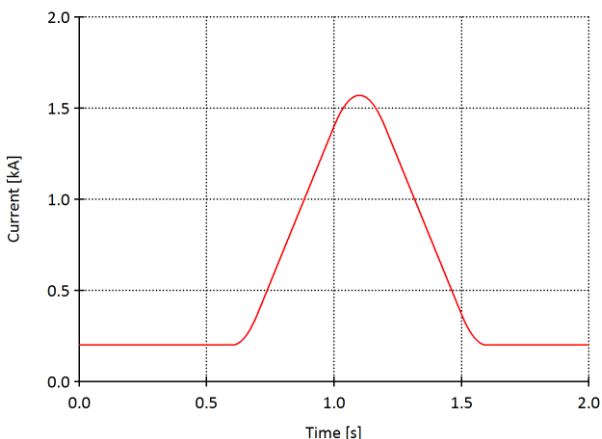


Figure 4: Current pattern of BM. In the case of Arc-QM, flat top is 800 A and flat bottom is 80A.

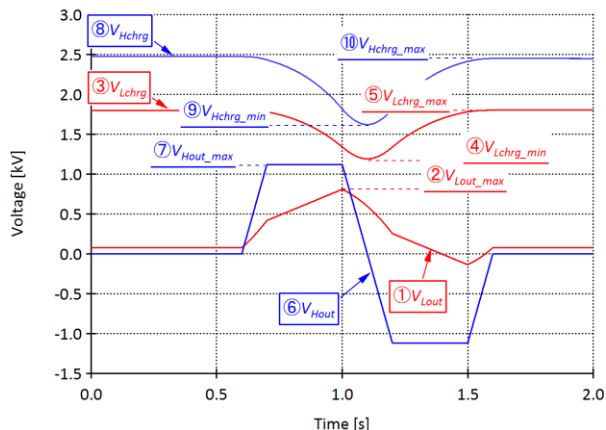


Figure 5: Output and charged voltage of BM.

ここで、

- ①  $V_{Lout}$  : 低圧チョッパの出力電圧
- ②  $V_{Lout\_max}$  :  $V_{Lout}$  の最大値
- ③  $V_{Lchrg}$  : 低圧チョッパのバンクコンデンサの充電電圧
- ④  $V_{Lchrg\_min}$  :  $V_{Lchrg}$  の最小値
- ⑤  $V_{Lchrg\_max}$  :  $V_{Lchrg}$  の最大値
- ⑥  $V_{Hout}$  : 高圧チョッパの出力電圧
- ⑦  $V_{Hout\_max}$  :  $V_{Hout}$  の最大値
- ⑧  $V_{Hchrg}$  : 高圧チョッパのバンクコンデンサの充電電圧
- ⑨  $V_{Hchrg\_min}$  :  $V_{Hchrg}$  の最小値
- ⑩  $V_{Hchrg\_max}$  :  $V_{Hchrg}$  の最大値

である。

Figure 4 と見比べると、電流立上がり時にはコンデンサの充電エネルギーが電磁石の磁場エネルギーに移行するので充電電圧③  $V_{Lchrg}$ 、⑧  $V_{Hchrg}$  が下降し、電流立下り時には逆の効果により充電電圧が上昇することがわかる。

なお、低圧チョッパと高圧チョッパが負担する最大出力電圧の比がそれぞれの充電電圧（定格電圧）の比と同程度としたいので、

$$\frac{V_{Lout\_max}}{V_{Hout\_max}} \sim 0.7$$

となるように両者が負担する負荷インダクタンス  $L$  の割合を定めている。また、各チョッパの出力電圧最大値の 150% が充電電圧最小値と等しくなるようなマージンをとっている。すなわち、以下の等式が成り立つようにバンクコンデンサ容量を選ぶ。

$$V_{Lchrg\_min} = 1.5 V_{Lout\_max}$$

$$V_{Hchrg\_min} = 1.5 V_{Hout\_max}$$

- フラットトップ電流値 :  $I_{FT}$
  - 負荷インダクタンス :  $L$
  - 負荷分担比 :  $f$
  - 高圧チョッパのバンクコンデンサ容量 :  $C_H$
- とすると、高圧チョッパについて以下の式が成り立

ち、 $C_H$ を求めることができる。ここで、負荷分担比  $f$  は高圧チョップが負担する  $L$  の割合である。

$$\frac{1}{2} f L I_{FT}^2 = \frac{1}{2} C_H V_{Hchrg\_max}^2 - \frac{1}{2} C_H V_{Hchrg\_min}^2 \quad (1)$$

低圧チョップについても、(1)式の  $f$  を  $1-2f$  に変え、同様にしてバンクコンデンサ容量を求められる。それぞれの電源について求めたバンクコンデンサ容量を Table 4 に示す。

Table 4: Capacitances of Large Power Supplies

電源	低圧チョップのコンデンサ容量 [mF] / 重量 [kg]	高圧チョップのコンデンサ容量 [mF] / 重量 [kg]
BM	110 / 1100	230 / 2300
QFN	40 / 400	160 / 1600
QDN	90 / 900	360 / 3600
QFX	20 / 200	100 / 1000
QDX	10 / 100	60 / 600

### 4.3 フライングキャパシタ

Figure 3 を見ると高圧チョップに整流器がなく、電氣的に浮いていることがわかる。これはフライングキャパシタと呼ばれる方式<sup>[3][4]</sup>で、変換器が少ない電源構成が可能となる。当該方式のミニモデルを用いた原理実証試験を行っている。パターン通電時の試験結果を Figure 6 に示す。電流パターン（マゼンダ）、電流測定値（青）、及び各コンデンサの電圧測定値（灰（NPC インバータ）、赤（正側フライングキャパシタ）、橙（負側フライングキャパシタ））である。コンデンサに正しくエネルギー回生されており、当該方式の実現性を実証できた<sup>[5]</sup>。

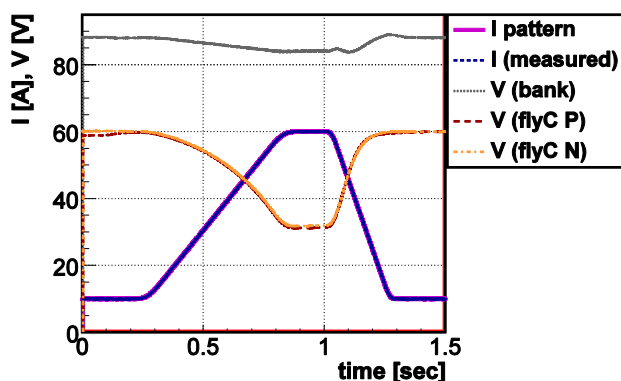


Figure 6: Result of mini model test<sup>[5]</sup>.

## 5. まとめ

J-PARC 主リングの高繰返し化及びビーム性能向上のために、主電磁石電源を新たに開発中である。大型負荷を2分割し電源1台当たりの出力電圧を

低減するとともに、電源自身も低圧チョップと高圧チョップを直列にした構成にし、大きな耐圧を得る。チョップの並列多重及び、低圧チョップと高圧チョップで負荷インダクタンスを分担することにより、フラットトップ時は高いスイッチング周波数を実現でき、出力フィルタで電流リップルを低減できる。

コンデンサを用いたエネルギー貯蔵方式を採用し、主電磁石とコンデンサの間で電力をやり取りする。よって、系統からの受電は抵抗損失分のみとなる。

各チョップの出力電圧と充電電圧を計算し、それぞれの大型電源に必要なバンクコンデンサ容量を求めた。

フライングキャパシタ方式の原理実証試験を行い、実現性を示すことができた。

## 参考文献

- [1] 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
- [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.Fahrmi, 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, Sep. 2-5, 2007
- [4] T.Isobe, T.Takaku, T.Munakata, H.Tsutsui, S.Tsuji-Iio and R.Shimada, "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, Jun. 2006
- [5] 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