

COMBINATION TEST OF J-PARC MR QUADRUPOLE MAGNET POWER SUPPLY AND ITS ACTUAL LOAD

Katsuya Okamura^{1,A)}, Kazuaki Niki^{A)}, Kouji Ishii^{A)}, Eiichi Yanaoka^{A)}, Yoshito Shimosaki^{A)}, Hideki Kobayashi^{B)}

A) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

B) Nippon Advanced Technology Co.,LTD

Shirakata Shirane 146-5, Tokai-Village, Naka-Gun, Ibaraki, 319-1195

Abstract

The main magnets of the J-PARC MR consist of 96 bending magnets, 216 quadrupole magnets, and 72 sextupole magnets, which are magnetically excited by individual power supplies by each family. This paper reports the first test results of the combination test of a power supply with actual magnet loads. The test results suggest the necessity of some modification to the power supply, which is caused by the wiring scheme change from bus wiring to cable wiring. Also, the magnetic field tracking performance was measured, which was estimated as a several 10^{-4} .

J-PARC MR四極電磁石電源の実負荷組み合わせ試験

1. はじめに

J-PARC MRは周長1567.5mの陽子シンクロトロンで、偏向電磁石96台、四極電磁石216台、六極電磁石72台で周回軌道を作る。これらの電磁石はファミリー毎に個別の電源で励磁されるが、電源の方式はいずれもスナバ回生方式による電流形自励式コンバータとハイブリッドフィルタを組み合わせた構成である^[1]。

今回、四極電磁石の1ファミリー（QFP電磁石×6台）を負荷としてはじめて定格電圧、定格電流の評価試験を実施し実負荷フル定格での、リップル性能、パターン追従性などについて評価したのでその結果を報告する。

2. 電磁石電源

2.1 電磁石電源の基本構成と定格

J-PARCのMRでは主電磁石として偏向電磁石（1ファミリー）、四極電磁石（11ファミリー）、六極電磁石（3ファミリー）を用いているが、それらの電磁石群を励磁する電源はいずれも図1に示したようなスナバ回生方式による電流形自励式コンバータとハイブリッドフィルタを組み合わせた構成となっている。

表1に各電源の定格と主要な設計パラメータを示す。電磁石電源の出力は1台当り0.37MWから7.5MWに亘っているが、使用するデバイスと変換器の直並列数の組み合わせにより対応している。

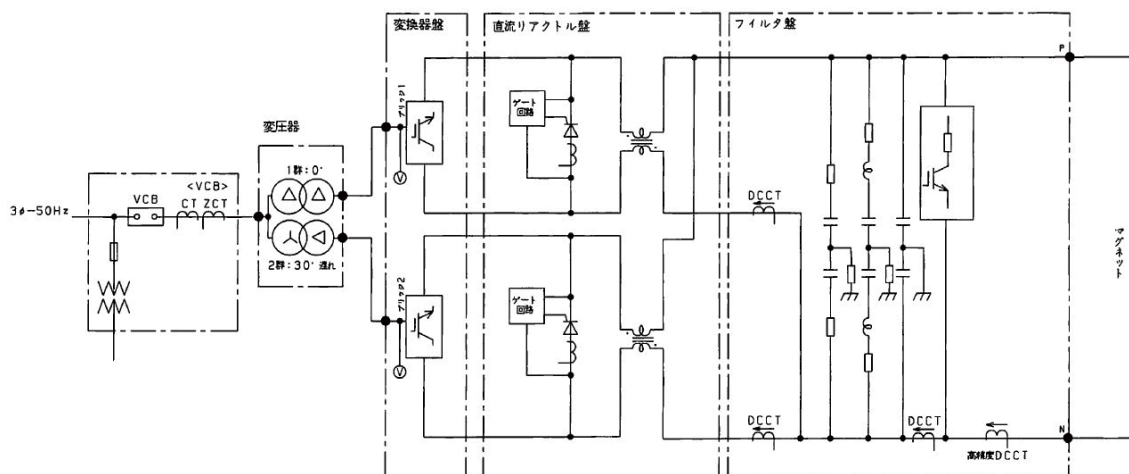


図1 電磁石電源の基本構成

¹ E-mail: katsuya.okamura@j-parc.jp

表1 電磁石電源の定格と主要なパラメータ

磁石	電力 (MW)	直流電圧 (kV)	直流電流 (A)	主変換デバイス	変換器ブリッジ構成	
B電源 (偏向電磁石)	BM1	7.5	4.5	2186	I E G T (4500V-2100A)	2直列
	BM2	7.1	4.2	2186	I E G T (4500V-2100A)	2直列
	BM3	7.1	4.2	2186	I E G T (4500V-2100A)	2直列
	BM4	7.1	4.2	2186	I E G T (4500V-2100A)	2直列
	BM5	7.1	4.2	2186	I E G T (4500V-2100A)	2直列
	BM6	7.1	4.2	2186	I E G T (4500V-2100A)	2直列
Q電源 (四極電磁石)	QFN	3.5	3.5	1038	I E G T (4500V-2100A)	2直列
	QFX	2.9	3.0	1038	I E G T (4500V-2100A)	2直列
	QDN	4.0	4.2	1038	I E G T (4500V-2100A)	2直列
	QDX	2.1	2.1	1038	I E G T (4500V-2100A)	2直列
	QFR	0.81	0.80	1038	I G B T (1700V-600A)	2直列×2並列
	QFS	0.44	0.43	1038	I G B T (1700V-600A)	2並列
	QFT	0.51	0.48	1082	I G B T (1700V-600A)	2並列
	QFP	0.45	0.42	1082	I G B T (1700V-600A)	2並列
	QDR	0.57	0.56	1038	I G B T (1700V-600A)	2並列
	QDS	0.62	0.57	1123	I G B T (1700V-600A)	2並列
QDT	0.56	0.52	1082	I G B T (1700V-600A)	2並列	
S電源 (六極電磁石)	SFA	0.34	0.67	517	I G B T (1700V-600A)	2直列
	SDA	0.34	0.67	517	I G B T (1700V-600A)	2直列
	SDB	0.37	0.72	517	I G B T (1700V-600A)	2直列

3. 試験の概要

今回の試験では表1に示した電源のうち比較的小出力であるQFP電源を評価した。QFP電磁石は6台で1ファミリーを構成し、直列接続されて1台の電源で励磁される。実際のサイトでは6台の電磁石がMRトンネルの3箇所直線部に分散して配置されるのに対し、試験では12m×12mの敷地に電源を含めた全ての機器を配置している。そのため実際の配置に比べるとケーブル長が短くなる分、ケーブル抵抗、浮遊キャパシタンスが小さくなる。これを補うため試験では模擬線路抵抗を磁石と磁石の間に挿入し、模擬対地静電容量を磁石とアースの間に接続したが、これらの値を変更することによって、線路抵抗、対地静電容量が電源性能に与える影響を調査した。

4. 試験結果

4.1 電源特性

4.1.1 負荷抵抗の影響

図2に模擬線路抵抗の値を変えたときの電源出力波形の違いを比較して示す。通電パターンはフラットベース(101A)0.17秒—加速1.9秒—フラットトップ(811A)0.7秒—リセット0.87秒であり周期は3.64秒である。図2上は電力ケーブル相当の抵抗(70mΩ)を接続し、全体で233mΩとした場合、図2下は水冷バス相当の抵抗(140mΩ)を接続し、全体で303mΩとした場合である。両者の電流偏差を比較すると水冷バス相当の抵抗を接続した場合の方がリップルが小さく、特にフラットベース電流のときの差が顕著である。本電源ではリップル低減の手段としてIGBTスイッチと抵抗からなるハイブリッドフィル

ター(HF)を採用している。HFによってバイパスされるリップル電流をIHF、出力直流電圧をVDC、HFの分流抵抗をRSHとすると、

$$IHF = a \frac{VDC}{RSH}$$

となる。水冷バスに比べて電力ケーブルの場合は抵抗が小であるため出力電圧VDCが低いのでHFに分流するリップル電流が減少し、リップル性能が低下すると考えられる。この対策としてはハイブリッドフィルターの分流抵抗を下げることを検討している。

4.1.2 対地静電容量の影響

図3に対地静電容量の影響を調査した結果を示す。図3上は模擬静電容量を接続しなかった場合、中は模擬静電容量を接続した場合、下は静電容量対策として電源内部の静電容量を増加した場合である。模擬静電容量が無い場合、電流偏差は0.1A以下であるのに対して、ケーブル配線を模した容量を接続する

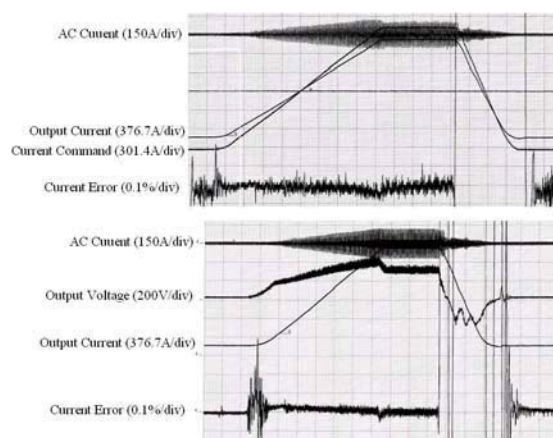


図2 負荷抵抗の影響
(上)電力ケーブル相当 (下)水冷バス相当

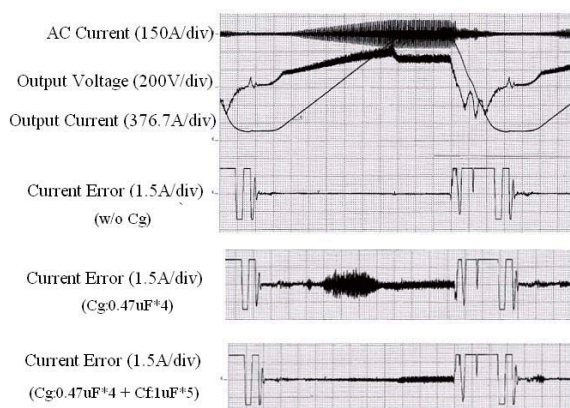


図3 対地静電容量の影響

(上) 模擬対地静電容量なし (中) 模擬対地静電容量
 $0.47 \mu\text{F} \times 5$ (下) 模擬対地静電容量 $0.47 \mu\text{F} \times 5 +$ 電
源内静電容量 $1 \mu\text{F} \times 5$ 追加

と 0-p で 1.5A 程度のリップルが発生する。この対策として電源内部の C を増加することがある程度有効であることがわかった。

4.1.3 立上がりの追従性

電流がフラットベースから上昇し始める折れ曲がり部においてどのようなスムージングが有効であるかについて、種々のスムージングパターンを用いて検討した。

図 4 に結果を示す。

スムージングパターンを 4 次関数まで高次化しスムージング時間も 0.2 秒から 0.4 秒まで変化させたにも関わらず、いずれも 0.3~0.5A (フラットベース電流基準で 0.3~0.5%) 程度の過渡的な偏差が発生している。この偏差発生の原因は電源フィルター部の制動不足ではないかと考えており、定数見直しを検討している。

4.2 磁場特性

ピックアップコイルで測定した磁場の変化をデジタ

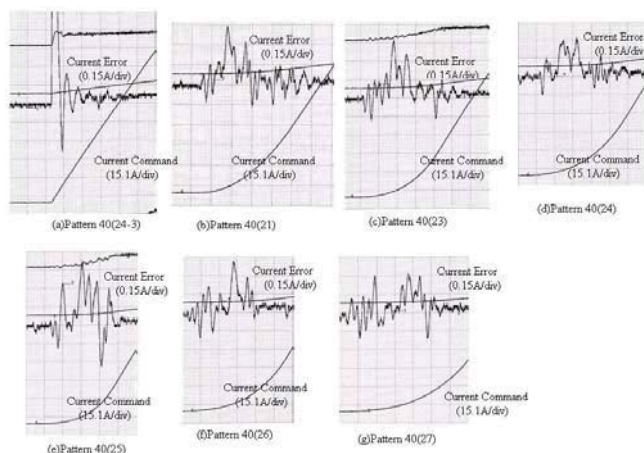


図4 パターン立ち上がり時の電流追従性

ル波形測定器 (WE-7000、14bit-100kHz サンプルング) で取り込みパソコン上で積分することにより磁場波形を得た。励磁パターンは 3.64 秒周期 (30GeV、40GeV)、2.1 秒周期 (30GeV)、5 秒周期 (30GeV) の 4 通りとした。

図 5 に加速からフラットトップに移行するときの励磁電流と磁場波形を示す。磁場波形には測定器のオフセット電圧が積分されて重畳されるため完全な平坦にはならないが、フラットトップ以降直後の磁場遅れは 10^{-4} 程度と評価される。この磁場遅れは電流パターンを修正することで対応する予定である。

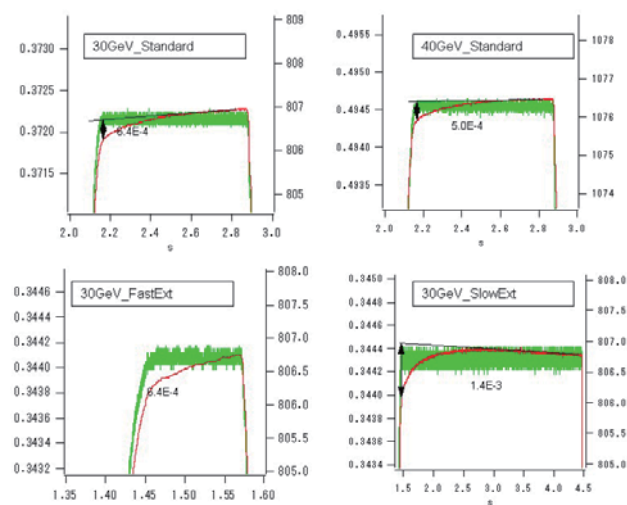


図5 磁場のトラッキング特性

5. まとめ

QFP 電磁石とその電源を用いて J-PARC MR 四極電磁石電源の実負荷試験を実施した。

(1) トンネル内の配線を水冷バスからケーブルに変更したために負荷抵抗が低下し、対地静電容量が増加した。この影響としてリップル性能が悪化することがわかった。この対策としてハイブリッドフィルターの抵抗変更と電源内のフィルター C の変更を検討する必要がある。(2) 電流立ち上がり部において 0.5A 程度の振動が発生しており、ビームのトラッキングに深刻な影響を与える可能性がある。原因として電源フィルターの共振のダンピング不足が考えられるので対策を検討している。(3) 電流の変化に対する磁場の追従性は 10^{-4} オーダーと評価され、これに対しては電流パターンを修正することで対応する予定である。

参考文献

[1] F.Saito, et al., "DEVELOPMENT OF MAGNET POWER SUPPLY FOR J-PARC 50-GEV SYNCHROTRON", Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, August 4-6, 2004.