J-PARC MR 用 10MW 級電磁石電源の開発

山崎長治* 井川英一* 吉野輝雄* 佐藤耕輔** 斎藤房男**
中村衆*** 松本浩*** 小林仁***

Development of 10 MW Class Power Supply for Electromagnets of J-PARC MR

Choji Yamazaki*, Eiichi Ikawa*, Teruo Yoshino*, Kosuke Sato**, Fusao Saito**,
Shu Nakamura***, Hiroshi Matsumoto***, Hitoshi Kobayashi***

Abstract – A 10 MW-class high-precision power supply was developed for the electromagnets of a large proton accelerator (J-PARC). This power supply consists of an advanced self-commutated current-source type converter (ACSC) using IEGTs and a hybrid filter. The current ripple was less than 1×10^{-6} , and the tracking error was less than $\pm 0.5 \times 10^{-4}$. With this power supply, the proton beam was successfully accelerated to 30 GeV, which is the target energy of the first stage of J-PARC.

キーワード：電流形変換器，高精度電源，加速器，電磁石

Keywords : Current-source type converter, High-precision power supply, Accelerator, Electromagnets

1. まえがき

高エネルギー加速器研究機構(KEK)と日本原子力研究開発機構(JAEA)は，共同で大強度陽子加速器施設（略称：J-PARC）の建設を進めてきた。この施設には周長 1568m のリング(MR)があり，このリングには陽子ビームの軌道を形成するための電磁石が多数配置されている。電磁石電源には最も重要な性能として， 1×10^{-6} 以下の電流リプル， $\pm 0.5 \times 10^{-4}$ 以下の追従性が要求される。

開発した電磁石電源は，スナバ回生方式の電流形自励式コンバータ(ACSC: Advanced self-commutated Current-Source type Converter) [1]とハイブリッドフィルタ[2]を組み合わせた構成となっている。またコンバータの素子には 10MW 級の大容量ということから，4500V-2100A 定格の IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)を使用した。

本電源はまず 1/16 スケールモデルでの工場試験を実施し，電流リプルおよび追従性が要求性能を満たすことを確認した。[3]

その後これらの電磁石電源は J-PARC 施設に組み込まれ，

2008 年 12 月 23 日には，J-PARC の第一段階の目標値である陽子ビームの 30GeV までの加速に成功し，現在はニュートリノ実験など，種々の科学実験が進められている。

2. 電磁石電源の構成

開発した 10MW 級の電磁石電源の構成を図 1 に示す。ハイブリッドフィルタは，パッシブフィルタ部と可変インピーダンス制御部で構成される。表 1 に電磁石 BM と QFN 用の電磁石電源についての基本緒元を示す。

表 1 電磁石電源の基本緒元

Table 1. Parameters of developed power supply.

1) Electromagnet	BM	QFN
2) Power	10 MW max	6.3 MW max
3) Current	2186 A max (CT: 3015 A)	1507 A max (CT: 1507 A)
4) Operating current	1574 A	707 A
5) Voltage	4.5 kV	4.2 kV
Electromagnet inductance	103.5 mH ×16 = 1.656 H	59.7 mH ×48 = 2.866 H
Configuration		
1) ACSC	IEGT 4500 V - 2100 A (1S-2P-6A)×2S 450 Hz (9 pulse PWM)	
2) Hybrid filter	IGBT 3300 V - 400 A 2S×8P 16 kHz (2 kHz×8)	

* 東芝三菱電機産業システム株式会社
〒183-8511 東京都府中市東芝町 1
Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corporation

** 株式会社東芝 電力システム社
〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8
Toshiba Corporation, Power Systems Company

*** 高エネルギー加速器研究機構
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1, Oho, Tsukuba-Shi, Ibaraki 305-0801

図 1 電磁石電源の構成
Fig. 1. Configuration of developed power supply.

3. 電流形自励式コンバータの基本動作

スナバ回生方式の電流形自励式コンバータで最も特徴的なのは、図 2 に示すようにアームにコンデンサ Cs を備えていることである。この回路構成では、図 3 に示すような 4 つの動作モードがある。

- (1)オン状態：スイッチング素子 S1, S2 が、ダイオード D2, D1 を通して 2 並列で通電している。
- (2)ターンオフ：スイッチング素子 S1, S2 がオフすると、ダイオード D2, D1 を通しコンデンサ Cs に充電される。
- (3)オフ状態：コンデンサ Cs に充電された状態で、アームがオフの状態になっている。
- (4)ターンオン：スイッチング素子 S1, S2 がオンすると、まずコンデンサ Cs からの放電でエネルギー回生をした後、通常のオン状態に移行する。

図 2 電流形自励式コンバータの構成
Fig. 2. ACSC configuration.

図 3 電流形自励式コンバータの基本動作
Fig. 3. Operating principle of the ACSC.

この回路方式では、交流側のコンデンサが不要になり、従来の電流形自励式コンバータと比べ、交流側の共振現象を回避できるという特徴がある。

4. ハイブリッドフィルタの基本動作

ハイブリッドフィルタは、図 1 に示すようにパッシブフィルタ部と可変インピーダンス制御部で構成される。可変インピーダンス部は、抵抗とスイッチング素子を直列接続したもので 8 多重化された構成としている。1 素子当りのスイッチング周波数が 2kHz で、8 多重により等価 16kHz の動作としている。スイッチング素子には、3300V-400 A 定格の IGBT を 2 直列で使用している。

可変インピーダンス部の動作原理を図 4 に示す。基本動作は、電流のリプル成分をバイパスさせることにより、電磁石側に流れる電流のリプルを低減させるというものである。並列補償であるため、この部分を流す電流は定格電流の数%の小電流で良いという利点がある。

図 4 並列補償動作
Fig. 4. Operation of the parallel compensator.

本電源のハイブリッドフィルタの特性を図 5 に示す。200Hz を境界にして、パッシブフィルタ部と可変インピーダンス制御部とで減衰効果領域を分担している。可変インピーダンス制御部は、制御ゲインを調整することで低周波領域での特性変更が可能である。

図5 ハイブリッドフィルタの特性
Fig. 5. Characteristics of the hybrid filter.

5. 制御装置の基本構成

制御装置の基本構成を図6に示す。電流指令値と電磁石電流を高精度で検出して電流偏差をとるアナログ部分は、ペルチェ素子を用いた恒温ユニットに収納し、高精度を確保している。電流偏差は1000倍した後にデジタル化し、その後は32ビットのCPUとDSPによる全デジタル制御としている。また電流指令値から、電磁石定数 ($R+sL$) により電圧指令値を生成しており、このフィードフォワード要素は追従性を改善する上で重要な機能となっている。

フィードバック制御の電流検出としては、P側電流とN側電流の平均化したものを用いている。これはコモンモードの電流リップルをキャンセルすることを目的としている。

実際の電磁石は、図7に示すようにリング周長約1500mに亘って配線されており、全体の浮遊容量も約 $3\mu F$ と大きくなっている。そのためコモンモードの電流リップル対策は、性能改善の重要なポイントとなる。

図7 電磁石のケーブル接続
Fig. 7. Cabling configuration of electromagnets.

そこで電磁石側を対称配線することにより、コモンモードの電流リップルが、P側、N側でより同一に流れるような配慮をした。また電磁石の対称配線は、電磁石の上部、下部において同位相でコモンモードの電流リップルが流れることになり、発生磁場としてもコモンモードをキャンセルするという効果がある。

6. 試験結果

試験結果を図8から12に示す。

図8は実運用での通電波形である。電流指令値と出力電流の電流偏差を測定し、追従性を確認した。電流偏差は、CTの検出最大値に対する比率で表している。台形波パターン（フラットベース：193A，フラットトップ：1574A，立上り時間：1.9s）での通電により、陽子ビームの加速をし、加速に必要な性能に達していることを確認した。

図9はフラットベース電流(193A)でのFFT結果を示す。200Hz以下の周波数では、ハイブリッドフィルタの可変インピーダンス制御により、電流リップルは低減されている。しかしながら、600Hz、1200Hz、および1800Hzの電流リップルは大きいので、今後同調フィルタを追加する計画である。

図6 制御装置の基本構成
Fig. 6. Control method.

図 10 は P 側電流と、P 側電流と N 側電流の平均電流の電流リップル波形を示したものである。図 11 と 12 は、図 10 に示す電流の FFT 結果である。P 側電流と N 側電流の平均電流では、コモンモードの電流リップルがキャンセルされていることがわかる。

7. まとめ

J-PARC MR 用の 10MW 級電磁石電源を、IEGT を用いたスナバ回生方式の電流形自励式コンバータと、IGBT による可変インピーダンス制御部を備えたハイブリッドフィルタを組み合わせた構成で開発した。これらの電磁石電源により、J-PARC の第一段階の目標値である陽子ビームの 30GeV までの加速に成功した。J-PARC ではさらなる陽子ビームの強度向上を進めており、電磁石電源としても電流リップルと追従性の改善を、さらに進めていく計画である。

(2010 年 8 月 7 日発表)

図 8 通電波形

Fig. 8. Output performance.
(Electromagnet: BM)

図 11 フラットベース電流での FFT 結果
Fig. 11. Flatbase DC current waveform spectrum.
Idp_h (Electromagnet: QFN, 85A)

文 献

- [1] E. Ikawa and K. Noda: "Development on Advanced Current-source-type Self-commutated Converter for Accelerator Electromagnets", the 13th S.A.S.T, Suita, Osaka, Japan, pp.60-62, 2001.
- [2] E. Ikawa, T. Yoshino, Y. Mori, M. Muto and K. Noda: "Development on Hybrid Filter for High-precision Power Source to Accelerator Electromagnets", the 13th S.A.S.T, Suita, Osaka, Japan, pp.286-288, 2001.
- [3] K. Okamura, F. Saito, E. Ikawa, T. Yoshino, Y. Mori and M. Muto: "Development on 10MW class High-Precision Power Supply for Accelerator Electromagnets", The 2005 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2005), Niigata (Japan), pp.1495-1498, April 2005.

図 9 フラットベース電流での FFT 結果
Fig. 9. Flatbase DC current waveform spectrum.
(Electromagnet: BM, 193 A)

図 10 フラットベース電流での電流リップル波形
Fig. 10. Flatbase ripple current waveform.
(Electromagnet: QFN, 85 A)

図 12 フラットベース電流での FFT 結果
Fig. 12. Flatbase DC current waveform spectrum.
(Idp_h + Idn_h)/2 (Electromagnet: QFN, 85 A)

【質 疑】

東京工業大学・磯部高範氏

千葉工業大学・西田保幸氏

【質問 1】 電圧形コンバータと比較して、電流形コンバータの方が小さくなるポイントは何か。

【回答 1】 電圧形コンバータの場合、一旦交流を直流に変換し、その後に電磁石へ出力をする。そのため大容量の変換器が 2 式必要になる。一方電流形コンバータの場合は、交流から直接電磁石へ出力することになるので、大容量の変換器は 1 式で済み、構成がシンプルとなる。

【質問 2】 図 2 のキャパシタ Cs の容量はいくらか。

【回答 2】 キャパシタ Cs の容量は、BM 用で $400\mu\text{F}$ 、QFN 用で $268\mu\text{F}$ である。充放電するエネルギー量が大きい場合コンデンサも大きくなり、素子を収納する盤の約半分のスペースを占めている。

【質問 3】 図 1 の電源セットは、何台同時に稼働するのか。

【回答 3】 10MW 級の大容量電源が 6 セット、6MW 級の電源が 4 セット、他 0.5MW 級の小容量電源も含めて、全部で 20 セットが同時に稼働する。

東京工業大学・嶋田隆一氏

【質問 1】 スナバエネルギー回生方式のスイッチの大きい特徴の一つは、ソフトスイッチングではないか。

【回答 1】 スナバエネルギー回生方式の電流形自励式コンバータでは、ソフトスイッチングでの運転も可能である。大容量のコンバータになるほど、また用途により、この特徴を大きく活かすことができると考えている。

【質問 2】 スナバのコンデンサが大きいように思えるが、電圧形での電圧源のキャパシタバンクを考えれば、やはり小さいのではないか。

【回答 2】 電圧形コンバータの場合、一般的には大きなキャパシタバンクは必要であり、今回のような 10MW 級電源ともなると、なお更であると考ええる。コンデンサの大きさでの比較をした場合、スナバエネルギー回生方式でのスナバのコンデンサの方が、外形的には有利であると考えている。

【質問 1】 3～4 秒周期での電流の増減で、回生が発生するのか。

【回答 1】 電流パターンでの通電をしているので、電流が立下る時に回生は発生する。

【質問 2】 回生電力による脈動による問題は発生していないのか。

【回答 2】 当初から現運用の電流パターン通電での受電系の脈動は考慮しており、特に問題は発生していない。ただし、将来運転増強する際には、平準化の対策が必要であることは認識しており、別途処置することになっている。

大阪大学・三浦友史氏

【質問 1】 電圧形で電源を構成した場合、コイル電流及び全体の制御性は、電流形と同等の性能が得られるか。

【回答 1】 電磁石電源としては、電磁石への通電電流の電流フィードバック制御が基本であり、これは電流形、電圧形に関係なく制御系は同様の構成で実現できる。実際に数 MW 級の電圧形の実績もあり、同等の性能は得られている。