

大容量加速器用電磁石電源の内製化

IN-HOUSE PRODUCTION OF A LARGE-CAPACITY POWER CONVERTER FOR ACCELERATOR MAGNETS

渡辺泰広^{#, A)}, 中根雅人^{B)}, 井上正樹^{C)}, 吉村直己^{C)}, 弓野雄一^{C)}

Yasuhiro Watanabe^{#, A)}, Masato Nakane^{B)}, Masaki Inoue^{C)}, Naoki Yoshimura^{C)}, Yuichi Yumino^{C)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency

^{B)} Aimusu

^{C)} Taiei Engineering

Abstract

This paper presents in-house production of a large-capacity synchrotron magnet power supply with a maximum voltage of ± 2400 V, maximum current of ± 750 A, and a repetition frequency of 25 Hz, aiming to replace the sextupole magnet power supply of the J-PARC RCS. To product this power supply, we developed a power unit that integrates an IGBT, drive circuit, cooling fins, and a DC capacitor, as well as a digital control unit using a SoC FPGA.

1. はじめに

シンクロトロンで使用される電磁石電源は、加速する粒子のエネルギーに応じて電流パターンを高精度で制御する必要があり、特に大容量電源の場合、同時に受電側の電力変動や高調波対策が必要になるため高い技術力が要求される。通常、加速器で使用される電磁石電源は、発注仕様書に性能仕様を規定し、受注した製作会社の責任において設計及び製作される。しかし、シンクロトロン用電磁石電源の場合、受注会社が製作した電磁石電源がそのまま使用できることは稀であり、たびたび調整や改造を行いながら運用しているのが実情である。

本論文では、J-PARC RCS 六極電磁石電源の更新を目的として、最大電圧 2400 V、最大電流 750 A、繰り返し周波数 25 Hz のシンクロトロン用大容量電磁石電源の内製化に挑戦した。ここで示す内製化とは、電磁石電源の設計(主回路設計、制御回路設計、構造設計)、部品調達、試験検査、ソフトウェア製作を所内で行い、製造は外注会社に図面を提供して製作することである。この電磁石電源は、電源ユニットをモジュール化して直並列接続することにより、任意の定格電圧、電流に対応することが可能である。本電磁石電源を製作するため、IGBT、ドライブ回路、冷却銅板、直流コンデンサを一体化した電源ユニットと、SoC FPGA を使用したデジタル制御回路を開発した。

2. 電磁石電源仕様

Table 1 に J-PARC RCS 六極電磁石電源の仕様を示す。J-PARC RCS の六極電磁石[1]は、大強度加速時のビーム不安定性を抑制するため、加速中にクロマティシティを積極的に制御することが要求されている。そのため、時間変化の大きな電流パターンが必要であり、現在使用している電源では電圧容量が不十分であることから、電源電圧の増強を計画している。新たに開発する電磁石電源は、負荷である電磁石や電力ケーブルの耐圧を考慮して、最大電圧は ± 2400 Vとしている。

Table 1: Power Supply Parameters

最大出力電圧	± 2400 V
最大出力電流	± 750 A
電流パターン	Arbitrary
受電電圧	三相 400 V
受電容量	80 kVA
外形寸法	幅: 1800 mm 奥行: 1500 mm 高さ: 2300 mm
冷却	水冷(純水): 80 L/min

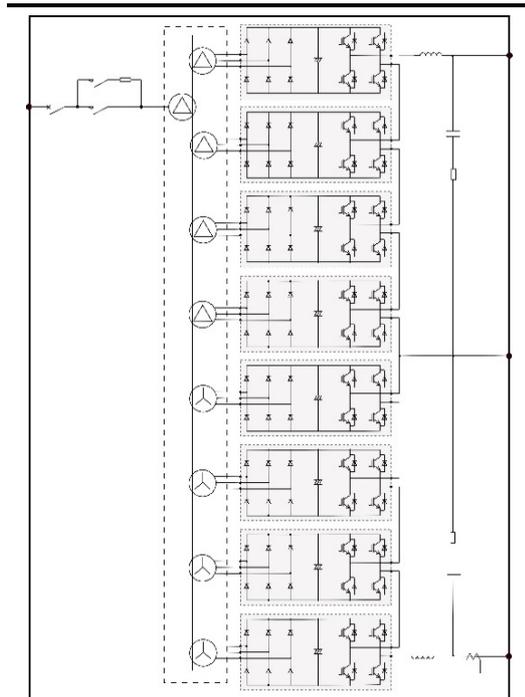


Figure 1: Circuit configuration.

[#] yasuhiro.watanabe@j-parc.jp

出力電圧の大きな電源を設計するために、部品点数を低減するという観点からいけば、例えば定格電圧 3300 V といった高圧 IGBT を使用することが考えられる。しかし、高圧 IGBT を用いた電磁石電源は、高電圧をスイッチングすることにより生じるスイッチングノイズが大きな問題となる。さらに、高圧 IGBT の場合、スイッチング速度が遅いためスイッチング周波数が高くすることができず、低圧 IGBT と比較すると電流リップルを低減するためのフィルタ回路が大型化するという問題がある。そのため、開発した電磁石電源は、部品点数が増加するという問題はあるが、フィルタ回路を小型化するという点を重視して電圧定格 650 V の IGBT を用いて、直列多重回路を構成することにより所要の出力電圧を得る構成としている。

Figure 1 に電磁石電源の主回路構成を示す。整流器用変圧器と三相ダイオード整流回路+フルブリッジ回路を基本回路としている。フルブリッジ回路の直流リンク電圧は 360 V であり、フルブリッジ回路 8 回路の出力側をそれぞれ直列接続することにより、出力電圧 2400 V を実現している。各フルブリッジ回路のキャリア波形は、それぞれ位相差を設けることにより、等価的スイッチング周波数を大きくして、スイッチングによる電流リップルを低減する。

8 回路のフルブリッジ回路にそれぞれ絶縁された直流電圧を供給するため、整流器用変圧器の二次側は 8 巻線あり、 Δ 結線 4 巻線、Y 結線 4 巻線として全体で 12 パルスダイオード整流回路を構成することにより受電電流の高調波を低減している。

フルブリッジ回路の出力側には、スイッチングによる電流リップルを低減するため、DC リアクトルとコンデンサ、抵抗から構成されるパッシブフィルタ回路を設けている。

3. 大容量電源ユニットの開発

大容量電源では、多数のスイッチング素子や直流コンデンサ等の部品が必要となるため、基本回路を構成する部品をユニット化して、これらを直列又は並列接続することにより、所要の電圧及び電流容量を得る。本論文では、三相ダイオード整流回路とフルブリッジ回路を一体化した、650 V/1500 A の大容量電源ユニット[2]を開発した。

Table 2 に電源ユニットの仕様を、Fig. 2 に主回路構成を示す。電源ユニットで使用する IGBT は、価格や入手性の観点から、定格 650 V/300 A の IGBT を選択した。定格電流 1500 A を得るため、IGBT を 5 並列接続して共通のゲート信号で駆動している。

Figure 3 に電源ユニットの機構設計を示す。電源ユニットの機構設計では、IGBT やダイオードといったパワーデバイスの冷却構造と、IGBT と直流コンデンサ間の低インダクタンス構造が重要である。

パワーデバイスの冷却には、1 枚の水冷銅板を用いており、これにダイオードモジュール 1 個と IGBT モジュール 10 個を実装した。IGBT モジュールは水冷銅板の両面に実装することにより、冷却効率を高めている。水冷銅板の冷却水取り合いは、電源ユニット故障時の交換時間を低減するためクイックカプラを用いている。

IGBT のスイッチング時のサージ電圧を低減するため、IGBT と直流コンデンサ間は低インダクタンス配線とする必要がある。導体は薄板銅板を用いて、絶縁板を挟んで

プラス側導体とマイナス側導体を構成することにより、相互インダクタンスを用いて自己インダクタンスを打ち消す構造としている。さらに、IGBT と直流コンデンサを 1 対 1 で配置して主回路配線を極小化している。これにより、スナバ回路を用いることなく、サージ電圧を十分に抑制している。

Table 2: Power Unit Parameters

内部回路	三相ダイオード整流回路+フルブリッジ回路
入力電圧	3 相 220V
直流リンク電圧	360 V
IGBT	650V/300A×10 個
直流コンデンサ	450 V/5600 uF×12 個
絶縁耐圧	2400 Vrms
冷却	水冷(純水): 10 L/min
外形寸法	幅: 172 mm 奥行: 460 mm 高さ: 440 mm
質量	32 kg

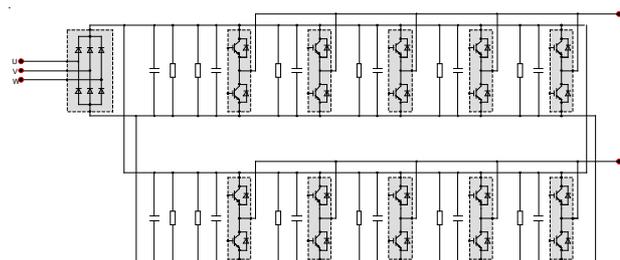


Figure 2: Circuit configuration of the power unit.

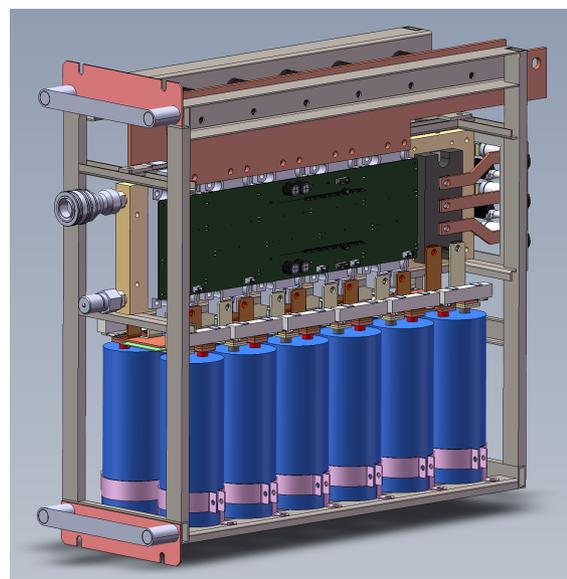


Figure 3: Mechanical design of the power unit.

4. SoC FPGA を用いた電源制御ユニットの開発

大容量電源では、多数のゲート信号や入出力信号を制御するために、多数のプリント基板や PLC モジュールが必要となる。さらに、これら制御機器間を接続する配線やそのための端子台、各制御機器に供給する制御電源など多数の付帯部品が必要となる。大容量電源の場合、電源盤の列盤 1 面以上を占める程度の規模になる場合もある。そのため、本論文では、電源制御に関わるすべての演算機能を SoC FPGA に集約することで、19 インチラック 2U のケースにすべての制御機器を収納した電源制御ユニット[3]を開発した。

Figure 4 に電源制御ユニットのハードウェア構成を、Fig. 5 に電源ユニット内の写真を示す。電源制御ユニットは、1 枚のメイン基板と 2 枚の拡張基板から構成されている。

メイン基板は、SoC FPGA として Zynq-7000、メインメモリとして DRAM、外部メモリとして eMMC と SD CARD、SoC FPGA の起動用メモリとしてフラッシュメモリを実装している。インターフェイスとして、Ethernet 2ch とデバック用として UART を実装している。その他、タイミング信号用に SFP を実装している。

SoC FPGA は、1 つのチップに FPGA (PL) と CPU (PS) が内蔵されている。FPGA 側にはフィードバック制御などの低レイテンシが要求される演算を実装している。CPU 側は OS として Linux を使用しており、Linux 上で上位制御系との通信やデータ収集などの各種アプリケーションソフトを動かしている。

拡張基板は、デジタル制御基板とアナログ制御基板各 1 枚から構成されており、メイン基板にコネクタで直接接続している。デジタル制御基板は、フルブリッジ回路のゲート信号用として PWM 出力信号 32ch と、電磁開閉器やリレーを制御するため、DI、DO を各 16ch 設けている。アナログ制御基板には、電源の出力電圧と出力電流信号を高精度で検出するため 18 bit、1 MS/s の ADC を 2 ch 設けている。

5. 電磁石電源の機構設計

Figure 6 に電磁石電源の内部構造を、Fig. 7 に外観写真を示す。開発した電磁石電源は、既設電磁石電源と比較すると電圧容量が 2 倍以上となるが、設置スペースを増やすことはできないため、電源寸法は既設電磁石電源以下に納める必要がある。しかし、変圧器、リアクトル、IGBT、直流コンデンサ等の主回路構成部品の寸法や員数は電源定格により決まるため、部品の配置や主回路配線の配置を調整して実装密度を上げる必要がある。特に、主回路配線の内、フルブリッジ回路の出力側は大電流が流れるため銅バーを用いており、できるかぎり配線長を短くする必要がある。電磁石電源の部品で寸法及び質量が大きい装置は、整流器用変圧器とフィルタ回路に用いる DCリアクトルであるため、電源盤の下側に配置する。DC リアクトルの上部には電源ユニット 8 台を配置して、主回路配線を短くしている。電源ユニット間の主回路配線は電源ユニットの後面のみであり、前面は制御配線と冷却水配管用のフレキシブルチューブのみで、冷

却水配管の取り合いはクイックカップラを用いているため、電源ユニットは容易に前面に引き出すことが可能である。

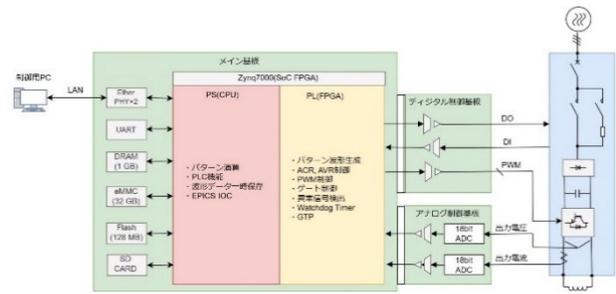


Figure 4: Hardware configuration of the power supply controller.

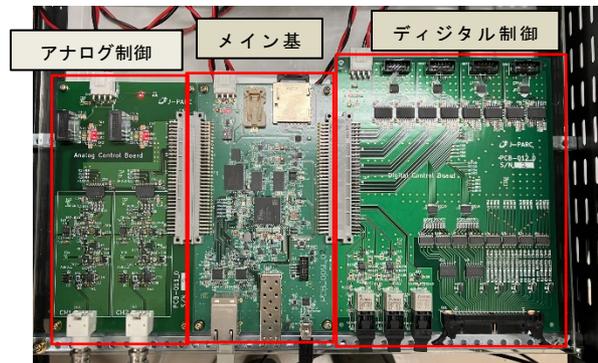


Figure 5: Photograph of the power supply controller.

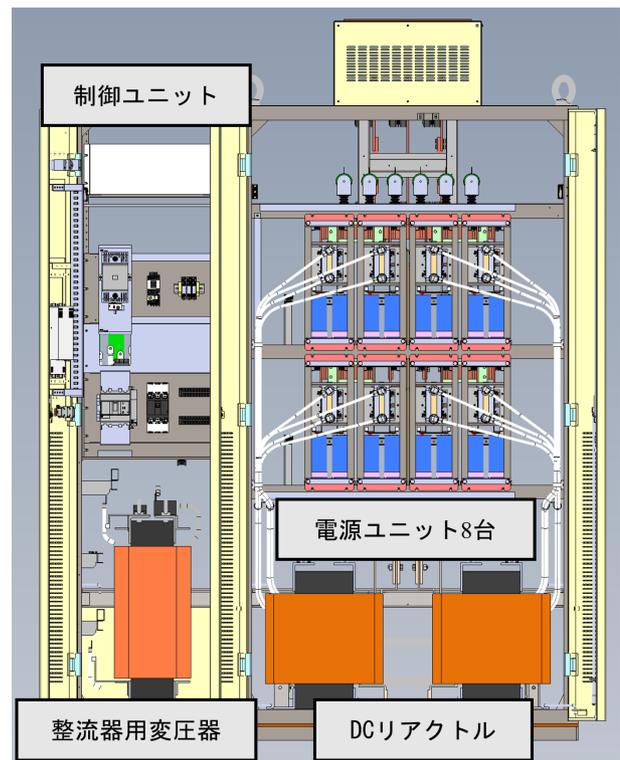


Figure 6: Mechanical design of the power supply cabinet.

6. まとめ

現在、電磁石電源の回路設計及び構造設計はすべて完了している。主要な部品はすべて入荷されており、一部部品の組立を開始している。制御ユニット上で動作させるファームウェアやソフトウェアについては、上位制御系との通信機能を除きすべて実装が完了している。今後は、電源ユニットの組立及び電源盤への実装を行う予定である。

参考文献

- [1] Y. Watanabe *et al.*, “Rapid-cycling power supplies for the J-PARC RCS Sextupole magnets”, Proceedings of IPAC2011, pp.3338-3340, 2011.
- [2] Y. Watanabe, “650V IGBT を用いた低圧大電流水冷電源ユニットの評価試験”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 994-997.
- [3] Y. Watanabe *et al.*, “J-PARC RCS 主電磁石電源制御系の更新”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 1024-1028.



Figure 7: Photograph of the power supply cabinet.