

J-PARC RCS 主電磁石電源制御システムの開発

DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM FOR J-PARC RCS MAIN MAGNET POWER SUPPLIES

渡辺泰広^{#, A)}, 谷教夫^{A)}, 井上圭吾^{B)}
Yasuhiro Watanabe^{#, A)}, Norio Tani^{A)}, Keigo Inoue^{B)}
^{A)} Japan Atomic Energy Agency
^{B)} Nippon Advanced Technology Co., Ltd

Abstract

In J-PARC RCS, dipole magnets and seven families of quadrupole magnets are excited with a DC-biased 25 Hz sinusoidal waveforms using an individual resonant circuits. There power supply comprises of many load and control device, therefore control system of the dipole and quadrupole magnet power supply operates stand alone from accelerator control system. This paper reviews dipole and quadrupole magnet power supply control system and operation summary.

1. はじめに

J-PARC RCS は繰り返し周波数 25 Hz という速い繰り返しで運転することから、主電磁石は共振回路を用いて励磁される。J-PARC RCS の主電磁石は、1 種類 25 台の偏向電磁石と 7 種類合計 60 台の四極電磁石から構成されており、それぞれ独立した共振回路により励磁される。これらを励磁するための電源は、偏向電磁石電源 2 台と四極電磁石電源 7 台及びチョークトランス 32 台と共振コンデンサバンク 44 バンクから構成されている。RCS の主電磁石電源は回路規模が大きく、1 つのシステムとして制御及び運用を行う必要があることから、主電磁石電源全体で完結した制御システムを設けている。主電磁石電源全体の制御システムは、電源及び共振負荷のインタロック制御を行うインタロックシステム、J-PARC 全体のタイミング系に同期させるためのタイミングシステム、電源の出力電流波形及び出力電圧波形を定期的にモニタするためのモニタシステム、電流フィードバックを計算機制御するための電流制御システムから構成されている。これら多数の制御装置は、LAN を介して 3 台の制御用 PC を用いて分散処理している。制御用 PC は、WindowsPC を用いており、制御プログラムは Labview を用いて開発した。

2. 主電磁石電源システム構成

Figure 1 に主電磁石電源全体のシステム構成を、Figure 2 に電源 1 台あたりの制御システム構成を示す。偏向電磁石は 25 台 (内、モニタ用が 1 台) あり、1 台ごとにチョークトランス 1 台及び共振コンデンサ各 1 バンクから構成される共振回路を構成している。偏向電磁石電源は、直流電源と交流電源に分けて励磁されている。四極電磁石電源は 7 ファミ

リ (QFN) あり、各ファミリーにつきチョークトランス 1 台と共振コンデンサ 3~6 バンクからなる共振回路を構成している。四極電磁石電源は、直流と交流を一括して供給する電源から構成されている。

3. 電源制御システム

3.1 インタロックシステム

偏向電磁石電源及び四極電磁石電源にはそれぞれ PLC が 1 台内蔵されており、電源内部の異常信号の検出と高圧遮断器の ON/OFF、電源の ON/OFF や電源の非常停止シーケンスを処理している。電源の負荷である電磁石、チョークトランス、共振コンデンサの異常信号は数が多いため、PLC を内蔵している保護インタロック盤で一度集約した後、各電磁石電源に内蔵している PLC に外部インタロック信号としてハードワイヤーで接続している。また、保護インタロック盤は MPS(Machine Protection System)や PPS(Personal Protection System)などの上位制御系との取り合いも一括して処理している。PLC はすべて FA-M3 シリーズ (横河電機製) を使用しており、LAN を介して PLC 制御用 PC とリンクしている。各 PLC のステータスデータは、PLC 制御用 PC から 1 秒周期で収集され、EPICS IOC を介して上位制御系にデータを渡している。

主電磁石電源では、ビーム加速中の非常停止を極力避けるため、非常停止の停止シーケンスは異常の種類により 2 種類に分けている。電源の過電流や過電圧など、検出したら直ちに電源を停止させる必要がある異常については、電源を非常停止すると同時に MPS 信号を発砲している。一方、温度上昇や、冷却水の流量低下など直ちに電源を停止させる必要がない異常については、MPS 発砲後 100ms 後に電源を停止させている。

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

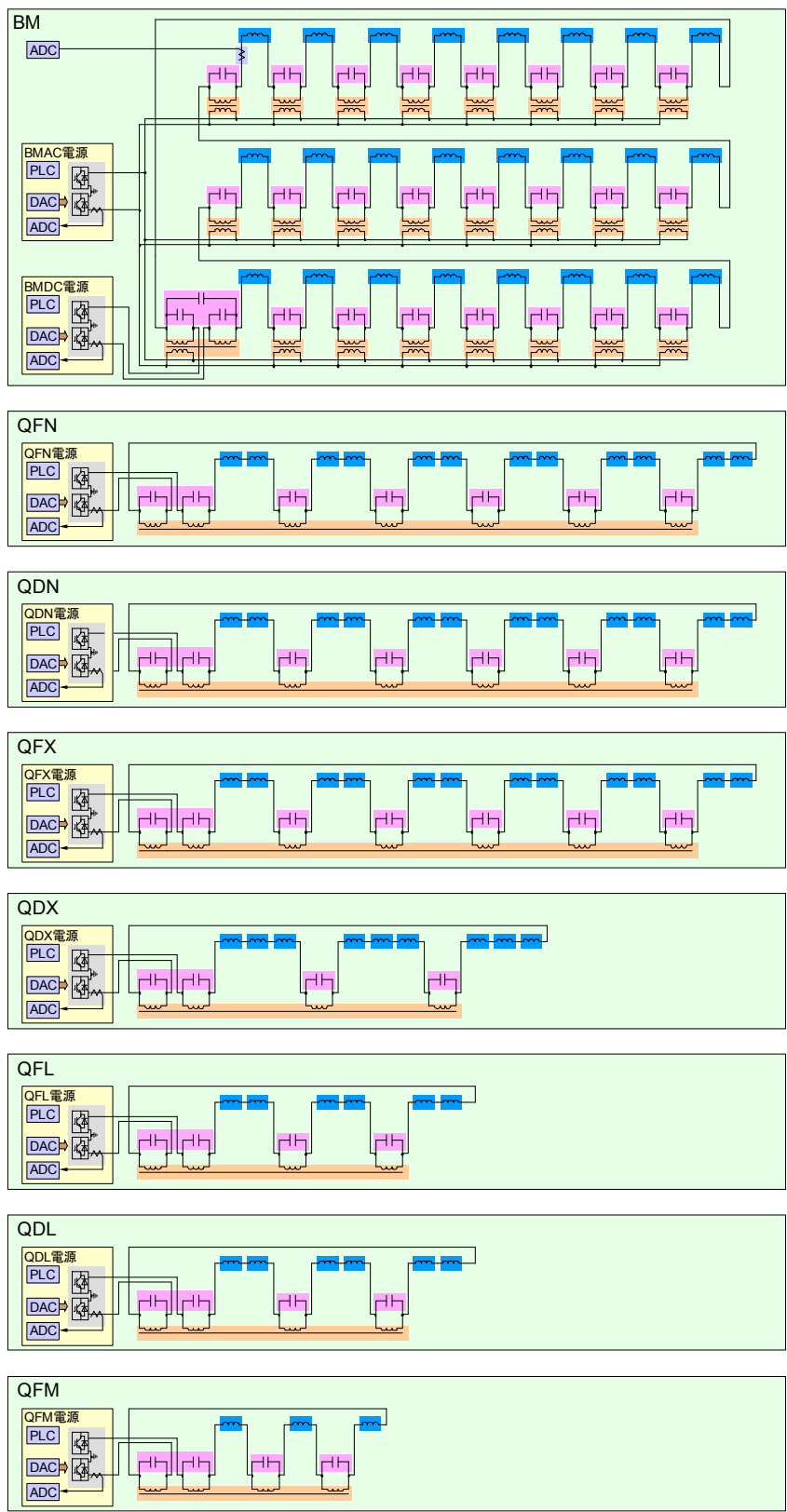


Figure 1: System configuration of Main magnet power supply.

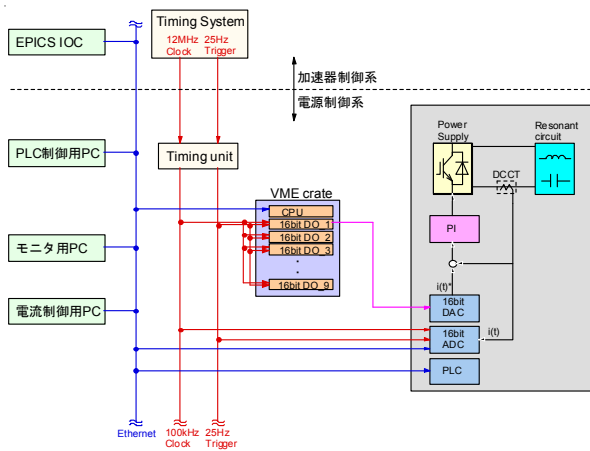


Figure 2: Control system per one power supply.

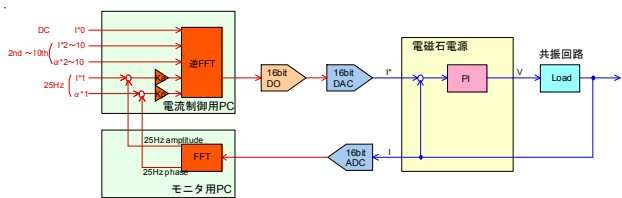


Figure 3: Control block of current control.

3.2 タイミングシステム

J-PARC RCS は 25 Hz の繰り返して運転しており、主電磁石電源は加速器全体のタイミングシステムに同期させる必要がある。従って、主電磁石電源制御システムの中でタイミング信号を必要としている装置は、すべてこのクロック信号とタイミング信号に同期させる必要がある。

J-PARC では、中央制御棟にあるマスタークロックから光ケーブルを介して各電源室及び装置室に 12 MHz のクロック信号と 25Hz のタイミング信号が供給される^[1]。主電磁石電源制御システムで使用している ADC 及び DAC は、すべて 16 bit、100 kHz サンプルングに仕様を統一しており、100 kHz のクロック信号を必要としている。そのため、主電磁石電源制御システムでは、いったんタイミングユニットで 12 MHz のクロック信号と 25 Hz のタイミング信号を受けて、12 MHz のクロック信号は 100 kHz に分周して、各 ADC、DAC に 100 kHz のクロック信号及び 25 Hz のタイミング信号を分配している。

3.3 モニタシステム

モニタシステムは、各電源の出力電圧及び出力電流を周期的にサンプルングするためのものである。各電源の出力電流波形及び出力電圧波形は、2ch、垂直分解能 16 bit、サンプルング周波数 100 kHz の ADC を内蔵している波形レコーダ（日立造船製）を用いてモニタしている。波形レコーダは、各電源に 1 台内蔵しており、さらに偏向電磁石電源の場合、モニタ電磁石の電流モニタ用に 1 台使用しているた

め、システム全体では 10 台の波形レコーダがある。ADC は、前述のタイミングユニットから供給される 100 kHz のクロック信号と 25 Hz のトリガ信号を基準にサンプルングしている。

すべての波形レコーダはモニタ用 PC から制御しており、LAN を経由して 10 秒周期で 1 秒間波形データをサンプルングしている。波形レコーダ 1 台あたりの 1 回のサンプルングデータは $2\text{ch} \times 16\text{ bit} \times 100\text{ k}$ ポイントであり、そのまま保存しておく膨大な量になる。そのため、サンプルングしたデータは FFT を行い直流から 10 次までの位相及び振幅値を保存、記録している。

3.4 電流制御システム

RCS の主電磁石電源の負荷は、電磁石の他にチョークトランスと共振コンデンサを含む共振回路である。共振コンデンサは油入フィルムコンデンサを使用しており、絶縁体に使用しているポリプロピレンの静電容量は負の温度特性を持っており、共振コンデンサは屋外に設置していることから外気温の変化により負荷のインピーダンスが大きく変化する。電源内部の電流フィードバック制御のみでは、共振周波数 25 Hz 成分のドリフトが大きくなり電流安定性が悪化するため、電源制御システムでは、電源内部の電流フィードバック制御に加えて、計算機制御による遅い電流フィードバック制御を行っている^[2]。

Figure 3 に主電磁石電源の電流制御ブロック図を示す。電源内部の電流フィードバック制御は、アナログのリファレンス電流信号と DCCT で検出した出力電流信号から PI 制御を介して電源の電圧指令値を作成している。計算機による遅い電流フィードバック制御は、出力電流波形の 25 Hz の振幅と位相のみ目標値と検出値が一致するようにアナログのリファレンス電流信号を調整する。電流制御用 PC は、先に述べたモニタ用 PC から出力電流 FFT の 25 Hz の位相成分と振幅成分を取得し、電流目標値から比例制御を介して電流指令値を作成する。なお、高調波電流を調整して高調波磁場成分を低減するため、高調波電流指令値は 10 次まで設定している^[3]。直流成分と高調波成分はドリフトがほとんどないため、フィードフォワード制御のみ行っている。以上から得られた電流指令値を逆 FFT し、電源周期 1 サイクル (25 Hz、4000 点) の 16 bit の時間領域の電流パターンデータを作成する。

電流制御用 PC で作成されたパターンデータは、LAN を経由して VME の CPU ボードに転送する。転送されたデータは、DO ボードにおいて外部クロック信号 100 kHz に同期したデジタルパターンに変換される。このデジタル信号は、パラレル信号として転送され、電源の制御回路に内蔵されている 16 bit DAC においてアナログデータに変換され、電源内部のリファレンス電流信号となる。

4. まとめ

本論文では、J-PARC RCS の主電磁石電源全体制御システムについて概要を述べた。本システムは、

2008 年のビーム運転開始から運用を開始しており、
現在まで問題なく使用されている。

参考文献

- [1] F. Tamura, et al., “J-PARC Timing system”, Proceedings of ICALEPCS2003, 247-249.
- [2] Y.Watanabe, et al., “Development of a Feedback Control System for Resonant Power Supplies in the J-PARC 3-GeV Synchrotron”, Proceedings of IPAC2013, 672-674.
- [3] Y.Watanabe, et al., “速い繰り返しの電磁石における高精度トラッキング制御”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 538-540.