

SPring-8-II の電磁石電源システム

MAGNET POWER SUPPLY SYSTEM FOR SPring-8-II

近藤 力^{#, A, B)}, 谷内努^{A)}, 増田剛正^{A)}, 藤田貴弘^{A)}, 福井 達^{B)}, 青木毅^{A)}, 田島美典^{A)}, 松原伸一^{A)},
山口博史^{A)}, 中澤 伸侯^{C)}, 深見健司^{A, B)}, 渡部貴宏^{A, B)},
Chikara Kondo^{#, A, B)}, Tsutomu Taniuchi^{A)}, Takemasa Masuda^{A)}, Takahiro Fujita^{A)}, Toru Fukui^{B)}, Tsuyoshi Aoki^{A)},
Minori Tajima^{A)}, Shinichi Matsubara^{A)}, Hiroshi Yamaguchi^{A)}, Shingo Nakazawa^{C)}, Kenji Fukami^{A, B)},
Takahiro Watanabe^{A, B)},
A) JASRI, B) RIKEN SPring-8 Center, C) SPring-8 Service Co., Ltd.

Abstract

Magnet power supplies (PSs) for SPring-8-II, the major upgrade of SPring-8, include approximately 20 high-power PSs with several hundred kW, more than 80 individual PSs with several kW, and around 1,000 DC-link type PSs with 50–200 W. All the PSs will be highly stabilized in current in the order of 10 ppm by using digital controls. This project also aims at saving energy as its goal to the green facility. Therefore, we aim to achieve a power efficiency of over 93% by using SiC MOSFET modules for large power PSs. A method using shunt resistors has been developed to adjust the current of each magnet individually during beam-based calibration. We are also developing a high-speed switcher for future plans. This device is expected to switch a power supply to a backup one without losing stored beam when one of the PSs is failed.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 では、低エミッタンスかつ Green Facility を目指したアップグレード計画 SPring-8-II が始動している[1]。この計画では、磁石は全て入れ替えて 5-bend achromat lattice による磁石構成とし、100 pmrad 以下の低エミッタンスを目指す。また、偏向磁石には永久磁石[2]を用いることで使用電力を削減する。一方で、四極磁石、六極磁石などの多極磁石やステアリング磁石などは、設計や運用面から引き続き電磁石を用いる[3]。これらの電磁石を励磁する電磁石電源は、既存の電源を撤去し、電磁石に応じて新規に設計、製作する。この電源では、10 ppm オーダーの高い電流安定度と共に、消費電力を抑えるための 90%以上の電力変換効率を目指す。また、切替器の導入によりに早急に復旧できるよう、保守性も考慮した設計とする。更に、切替器では将来的な導入も見据えて、電源が故障した時に磁石の励磁電流を維持したまま、出力系統を予備電源に切替えられる高速切替器を開発している。

本電源は、2017 年のデジタル制御を用いた高精度電源の開発[4]からスタートし、その開発を基に、NanoTerasu における電磁石用電源[5]や、SACLA におけるパターン制御電磁石電源[6]などに応用された。これらの開発の成果、経験を踏まえ、2029 年の SPring-8-II 始動に向けて、2025 年から設計および量産を開始し、2027 年夏から SPring-8 をシャットダウンし、1 年強で電源の入替え、ケーブルの配線、および動作試験を行う。

本発表では、このアップグレード計画で用いる電磁石電源の全体システムと、導入した電源技術の詳細について発表する。

2. システム概要

SPring-8-II の蓄積リングは、全 48 セルの磁石群で構成される。全体図を Fig. 1 に示す。内訳としてノーマルセル(NS) 34 セル、入射セル(INJ) 2 セル、マッチングセル(MS) 8 セル、長直線セル(LSS) 4 セルの 4 種類がある。標準セル/入射セル/マッチングセルの大部分の多極磁石は、17種類の電磁石をそれぞれ全周に渡って直列接続する Family を組み、Family 毎に 1 台の電源(Family 電源)で励磁する。この Family 電源は電源室 A に設置する。また、INJ/MS セルの一部の多極電磁石や LSS セルの四極電磁石は、局所的に異なる励磁電流が必要とされるため、1-4 台の直列接続された磁石を励磁する電源(個別電源)を備える。この個別電源は、リング内周側の 4 個所の電源室および入射部電源エリアに設置する。また、ステアリング磁石や六極/八極電磁石のステアリング用補助コイル、八極電磁石のスキュー四極用補助コイルなどは、磁石毎に個別に励磁される。この励磁には

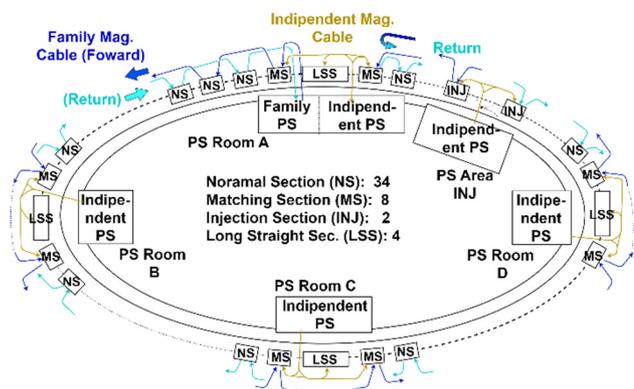


Figure 1: Schematic layout of the cable configuration of family and independent magnet in SPring-8-II storage ring.

[#]ckondo@spring8.or.jp

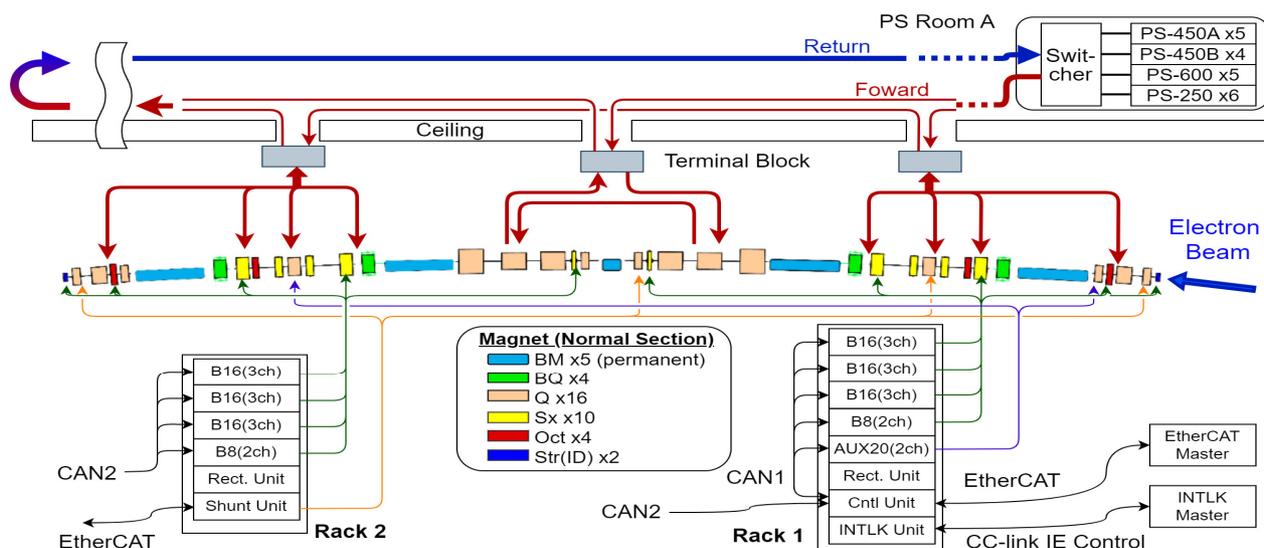


Figure 2: Schematic layout of magnets and power supplies for one normal cell.

50-200 W と比較的小電力かつ多数必要となるため、整流回路を共有した DC-link 型電源を用いる。この電源は、内周通路に1セルあたり2~3ラックに収納する。

ノーマルセルにおける磁石構成と電源の接続を Fig. 2 に示す。Family 電源や個別電源は5つの電源室および電源エリアに設置され、その出力ケーブルは電源室から天井上を渡って電源-磁石、磁石同士を接続する。DC-link 型電源は内周通路から床下のセルダクトを通じて配線される。六極電磁石や八極電磁石の一部では、メイン磁場と同時にステアリング磁場やスキュー四極磁場を発生させるため、メインコイルに併せて補助コイルが巻かれている。また、四極電磁石の一部では、チューン補正や BPM の Beam Based Calibration[7]などで局所的に電流変更が要求される。これには、四象限型の補正電源やシャント抵抗を用いる。

また、電磁石の過熱や冷却水量低下といった負荷インターロック信号は、セル毎に設置されているインターロック子機で収集され、電源室のインターロック親機で全磁石の信号を一括処理し、外部からの停止指令も含めて全電源の停止処置などを行う。

上位制御系からは EtherCAT 通信により遠隔制御できるものとしている。

3. 電磁石電源

3.1 電源概要

本プロジェクトで製作する Family 電源、個別電源、DC-link 型電源の定格、数量などを Table 1 に示す。

電源は、全て FPGA(AMD Zynq 7000 [8])を用いたデジタル制御によるスイッチング電源としている。この方式では、基本機能を備える標準 FPGA コードを、電源機能に合わせて部分的に変更する設計手法をとる。これにより、制御回路の共通化を図れることで設計期間を短縮でき、また将来的な機能追加といったの拡張性を持たせられる。また、フィードバック制御のパラメーター変更を、タッチパネルからの入力操作や、遠隔制御の通信により簡易に行えるようし、調整を短時間で行えるものとしている。これにより負荷パラメーターの違う複数の電磁石でも、一種

類の電源で対応できるようになり、電源種類を削減でき、量産性の向上や予備品の削減といったメリットを持たせることができる。

3.2 Family 磁石用高電圧大電流電源

Family 磁石用電源は、多数の直列接続された磁石群に励磁電流を流すため、出力電流 250-600 A、出力電圧 280-1000 V、電流安定度は定格に対し 20 ppm 以下が要求される。

この電源の構成図を Fig. 3 に示す。複数のスイッチング回路を並列駆動するスイッチング電源とし、この回路の並列数は電源の定格出力電流に応じて変更する。また、出力側には切替器を備え、電源の故障時にはブスバーの付け替え作業により、予備電源への切替を容易かつ短時間で行えるものとする。上位制御の通信は EtherCAT 通信で行う。

このような大電力電源の変換効率を高めることは、電力削減だけでなく、電源のコンパクト化や冷却設備への負担軽減などの利点が多い。本電源では 93%の変換効率を目標としており、これを達成するために Silicon-Carbide(SiC) MOSFET モジュールを用いることでスイッ

Table 1: Specifications of Magnet PSs in SPring-8-II

PS Name	Polarity	Output	Current/ Voltage	Quantity (Backup)
Family PS				
U450A	Unipolar	1	450 A/1000 V	5 (1)
U450B	Unipolar	1	450 A/600 V	4 (0)
U600	Unipolar	1	600 A/700 V	5 (1)
U250	Unipolar	1	250 A/280 V	6 (1)
Independent PS				
U300MS	Unipolar	1	300 A/15 V	60 (5)
U450MS	Unipolar	1	450 A/20 V	22 (4)
DC-link PS				
B7	Bipolar	2	+/- 7 A/9 V	76 (4)
B16	Bipolar	3	+/- 16 A/8 V	290 (8)
AUX20	4-Quad.	2	+/- 20 A/10 V	53 (4)

チング回路の低損失化を目指した。今回、耐電圧 1.7 kV を備えた三菱電機製 SiC MOSFET モジュール[9]を用い、1.2 kV, 200 A のスイッチング回路を試作した。Figure 4 に試験回路の外観を示す。この回路では DC-link コンデンサと MOSFET 間をラミネート絶縁した銅バーで配線し、寄生インダクタンスを 50 nH 以下に抑えている。この回路を用いてダブルパルス試験を行い、スイッチング特性を測定した。Figure 5 にターンオフ時の電流、電圧波形を示す。サージ電圧はピーク値で 1400 V であり、モジュールの耐電圧に収まることを確認した。

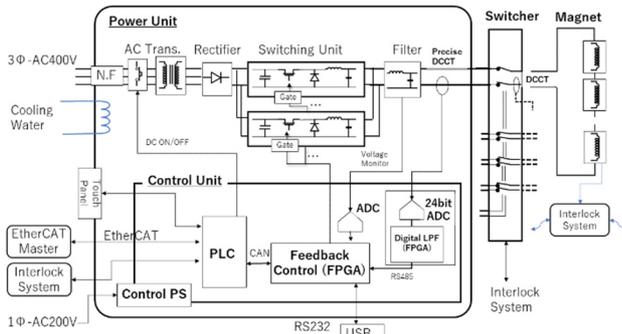


Figure 3: Schematic diagram of Family PS.

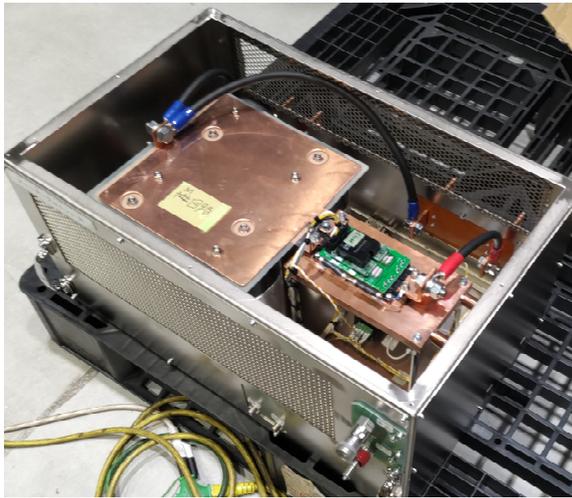


Figure 4: Photograph of test unit using SiC module.

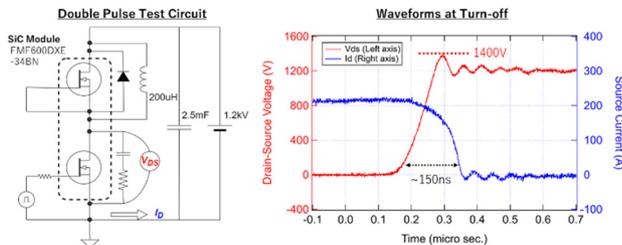


Figure 5: (Left) Circuit diagram of double pulse test circuit. (Right) Measured waveforms of source-drain voltage (red) and drain current (blue) of the low-side SiC MOSFET at turn-off switching.

3.3 単独磁石用大電流電源

MS、INJ、およびLSSのセルでは、励磁電流を個別に変更する多極電磁石がある。これらは 1-4 台の電磁石を直列接続して1台の電源で励磁するため、これには定格 300-450 A, 15-20 V の大電流電源を用いる。電流安定度は 20 ppm 以下、電力効率は 90%以上を目指す。また、数量は約 80 台が必要となる。

この電源の回路構成を Fig. 6 に示す。三相 AC 200 V を受電し、整流回路で DC 化し、フルブリッジ回路で高周波スイッチングを行い、高周波トランスで電圧変換して再び整流する構成とする。筐体はラックマウント型とする。また、1 台の制御ユニットと 13-15 台程度の電源を組み合わせ使用。制御ユニットは、タッチパネルによる操作や、EtherCAT による上位制御系との通信機能を備える。制御ユニット～電源ユニット間は CAN 通信で取り合う。この CAN 通信では、最大 20 台の電源ユニットと通信できるものとしているが、ケーブル距離が CAN 通信の仕様値 30 m を超える場合が想定される。そこで、ケーブル間に中継器を設けて、40 m 以上でも安定に通信できるものとした。

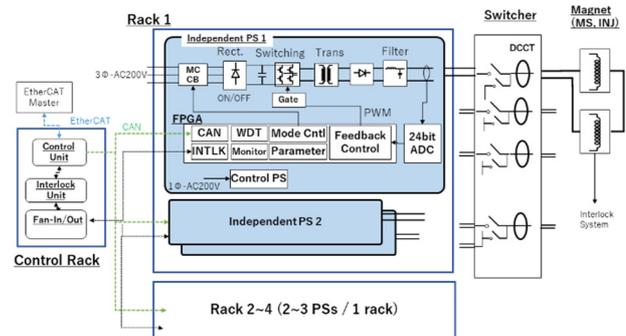


Figure 6: Schematic diagram of independent PS.

3.4 DC-link 型小電力電源システム

DC-link 型電源は、定格が 7-20 A, 8-10 V と、200 W 以下の小電力の電源であり、先に示したステアリング磁場、スクュー四極磁場を発生させる補助コイルの励磁、及び四極電磁石の電流補正に用いる。

DC-link 型電源の構成は、Fig. 7 に示すとおり複数の電源ユニットに対し制御ユニット1台、整流(DC)ユニット 1 台とし、機器を共有することで製作コストの削減を図る。整流ユニットは、AC 200 V を整流して DC 280 V に変換し、複数の電源ユニットに一括で DC 給電する。電源ユニットは、給電された DC 280 V を DC-DC コンバーターで降圧後、フルブリッジ・スイッチングで出力制御をする。1 台のユニットで 2~3 出力を備えており、出力毎に独立して動作する。この電源には、全電流領域において 50 ppm 以下の出力安定度が求められており、特にスイッチング動作が不安定になりやすい 0 A 付近の小電流領域では両極スイッチング[5]を用いることで電流を安定化する。また、補助コイルを有する電磁石では、一つの磁石に複数の電源が接続されることになるため、コイル間結合を通じて電源間でフィードバック制御動作が干渉し合う。そのため、フィードバック制御パラメーターは干渉

の影響が小さくなるよう調整する必要がある。

四極電磁石の電流補正に用いる四極補正電源(AUX電源)は、直列接続された複数の電磁石の内、1台の磁石の励磁電流を個別に増加または減少させる電源である。このため、メイン電源から通電される負荷電圧を基準に出力電圧を上げることで励磁電流を加算し(Source動作)、下げることで電流を減算する(Sink動作)、四象限動作を行う電源としている。四象限動作の詳細は他の発表に詳しい[10]。出力回路の電位は、負荷の電位に固定されるため、スイッチング回路は対地間で絶縁される。なお、AUX電源をメイン電源の出力端直近の負荷に接続する場合は、メイン電源からはAUX電源の対地間コンデンサが容量負荷として働くため、メイン電源のフィードバック制御に影響を及ぼす場合がある。このため、AUX電源の設計時にメイン電源や磁石構成を考慮して対地間コンデンサの容量を決定する必要がある。

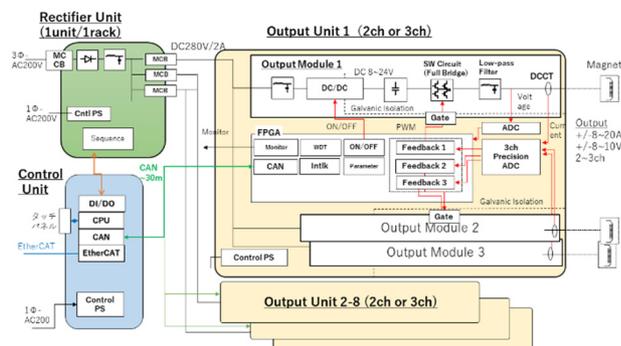


Figure 7: Schematic diagram of DC-link type PS.

3.5 Shunt 抵抗による電流変更方式

四極電磁石の磁場中心に対する BPM の電気中心のオフセットをビームの応答から測定する Beam-Based Calibration が行われる。この測定では、BPM の最寄りの四極電磁石の励磁電流を個別に変化させる必要があるが、電流変更量は固定量でもよい。そこで、最寄りの四極電磁石に AUX 電源が付いていない場合には、AUX 電源の代わりに Shunt 抵抗による電流変更方式を用いる。

この方式は、Shunt 抵抗を磁石と並列に接続し、通電をリレー回路で ON/OFF 動作することで、磁石の励磁電流を 3-4% 程度変化させる。この ON/OFF は、遠隔で操作する。この Shunt 抵抗回路は、計 170 台近くを導入するが、AUX 電源よりも低コストで調達できるため、そのコスト削減の効果は非常に大きい。

3.6 インターロックシステム

本磁石システムは、磁石と電源が複雑に接続されているため、冷却水の流量不足、過熱といった磁石異常や電源異常を一括で監視、処理を行うインターロックシステムを組む。これは、インターロック親機1台と、セル毎または電源室毎に設置されるインターロック子機全 53 台で構成され、機器間は CC-Link IE-Control で接続する。子機は各磁石の異常を検知し、親機に送信する。親機は子機が収集した磁石異常や電源異常を集約し、インターロック処理を行い、停止指令を親機から直接 Family 電源

に、あるいは子機を通じて個別電源、DC-link 型電源に出力する。また、上位インターロックシステム(機器保護インターロック)への電源異常状態の出力や電源停止指令の入力も担う。他にも、切替器のドア開閉による電源停止なども行う。

3.7 ケーブル配線

電源から磁石までのケーブルは、各電源室の Family 電源や個別電源から天井上を通過して、トンネル内の磁石に接続される大電流ケーブルと、DC-link 型電源から床下セルダクトを通して磁石に配線される小電流ケーブル、そして同じくセルダクトを通すインターロックや Shunt 切替などの信号ケーブルに大別される。

Family 電源のケーブルの天井上配線は、Fig. 1 に示しているように電源室 A から LSS を除き奇数セルを時計回り一周して、反転し偶数セルを時計回り一周するように配線する。

大電流ケーブルは、更に天井上ケーブルとトンネル内ケーブルの2つに区分されるが、天井上のケーブルは、費用や作業期間を抑制するため、既存のケーブルを最大限再利用するものとする。ただし、中継端子台の増設、および一部のケーブルの組み替え、追加配線は必要となる。一方、トンネル内ケーブルは全て撤去し新規に配線する。

DC-link 型電源からの電流ケーブルや、信号ケーブルは、保守通路からセルダクトを通じてトンネル内の各磁石やインターロック、Shunt 切替器に配線される。これら、全て新規に配線する。

4. スケジュール

電磁石電源の製作は、2025 年春から開始し、2027 年夏の間で完了する予定である。天井上ケーブルの配線などは、2026 年から事前準備を開始する。2027 年夏の SPring-8 シャットダウン後に、既存の電源や不要ケーブルの撤去を行い、その後、機器の設置や追加ケーブルの配線を開始する。トンネル内のケーブル配線は、磁石据付の進捗に合わせて行い、2028 年秋に完了する予定である。また、通電が可能になった電源から順次、動作確認および調整を行い、2028 年 12 月頃には全電源の運用を開始する。

5 高速切替器の開発

電磁石電源の故障は、蓄積リングの運転停止の主な原因の一つである。この対策として電源の信頼性を高めるのは重要ではあるが、電源の堅牢化をつき進めていくにつれ、開発の時間や製作コストなどは飛躍的に増大していく。更に、使用する電源の数が増えるほど全体の停止頻度も増大するため、費用対効果も考えると限界がある。

そこで、電源故障時にビームがロスしないように、磁石の励磁電流は維持しながら、電源の出力系統を故障電源から予備電源に自動的かつ高速で切替える Hot Swap 方式が研究されている[11]。SPring-8 でも、Hot-swap が行える高速切替器の開発を進めており、ここでは試作した高速切替器の概要と動作試験の結果を報告する。

Figure 8 に、開発した高速切替器の概要図を示す。制

御ユニット1台と、通常電源(PS1)、予備電源(PS2)、および切替ユニットで構成される。切替ユニットは、系統毎に、系統切替用 IGBT スイッチと逆流防止用ダイオード、また正負端子間の環流ダイオードを備える。通常電源が故障すると、制御ユニットは通常電源の停止をハードワイヤを通じて検知し、即時に通常電源側の IGBT を OFF にする。これにより磁石の励磁電流は通常電源から環流ダイオードに転流し、磁石やケーブルの抵抗とインダクタンスに応じて減少していく。この間に、制御ユニットは予備電源に設定電流や制御パラメーターなどを RS485 通信にて送信し、その後、予備電源系統の IGBT を ON、予備電源の出力も開始させる。予備電源は出力電流をランピングしながら上昇させ、励磁電流を停止前の電流値まで回復させる。

今回、2.8 mH, 10 mΩ の電磁石負荷を用い、200 A, 20 V の2台の電源を用いて、高速切替の実証試験を行った。Figure 9 に、切替時の各電源の出力電流と磁石の励磁電流の波形を示す。この結果から、通常電源が停止してから 1.2 ms で予備電源が出力を開始し、励磁電流の低下率は 0.9%程度に収まることを確認した。また、切替開始から約 3 ms で励磁電流を切替前の値にまで戻せることを確認した。

今後、更なる高速化や、損失の低減などの改良を重ね、将来的に SPring-8-II に導入することを目指している。

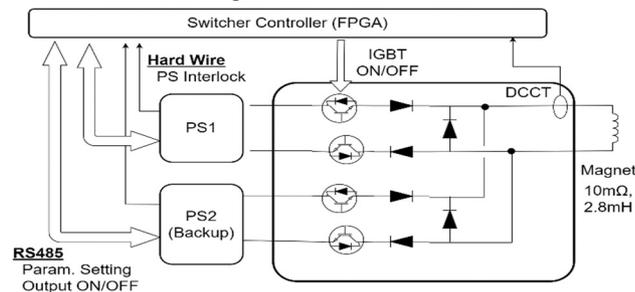


Figure 8: Schematic diagram of the fast switcher for magnet power supplies.

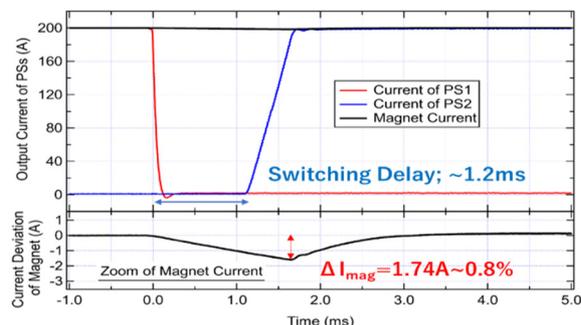


Figure 9: (Upper) Measured current waveforms of PS1 (red) and PS2 (blue), and magnet (black). (Lower) Zoomed waveform of current deviation of the magnet.

5 まとめ

SPring-8-II では、デジタル制御を用いた 20-50 ppm の

高い電流安定度をもつ電磁石電源を用いる。電源は、Family 電源、個別電源、DC-link 型電源に大別され、Family 電源では SiC スイッチングモジュールを用いることで、最大 1 kV の高電圧出力を 93%以上の高効率で行えることを目指している。個別電源、DC-link 電源は、それぞれ 80 台、420 台といった多数を電源が必要とされるため、制御ユニットを共有化するなどのコスト削減を目指す。Family 電源や個別電源には、ブスバー方式の切替器を備え、電源故障時に短時間の作業で復旧できるものとする。将来的には Hot-swap が行える高速な切替器の導入を目指している。

謝辞

SiC スイッチングモジュールや高速切替器の開発、試験では、工藤電機株式会社の寿田氏、佐藤氏、佐々木氏らの協力をいただいたことに感謝します。また、CAN 通信試験では、ニチコン株式会社の長谷川氏ら、カナデビア株式会社の仲谷氏らに協力をいただいたことに感謝します。Shunt 抵抗の開発では、アイデン株式会社の方々に協力をいただき感謝致します。

参考文献

- [1] T. Watanabe *et al.*, “SPring-8 Upgrade Project: Accelerator Redesigned and Restarted”, *Synchrotron Radiation News*, 2023, 36:1, 3-6.
- [2] T. Taniuchi *et al.*, “SPring-8-II 縦勾配型偏向永久磁石の製作”, in these proceedings.
- [3] K. Fukami *et al.*, “SPring-8-II 蓄積リング磁石システム” in these proceedings.
- [4] C. Kondo *et al.*, “Digital Control System of High Precision Magnet Power Supply for SPring-8-II”, in *Proc. IPAC'19*, Melbourne, Australia, 2019, pp. 1259-1262.
- [5] C. Kondo *et al.*, “High precision digital control magnet power supplies”, in *Proc. IPAC'23*, Venice, Italy, 2023, pp. 3773-3775.
- [6] C. Kondo *et al.*, “SACLA マルチエネルギー運転における四極電磁石の高速電流変更システム”, *Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2024*, Yamagata, pp.708-712.
- [7] Z. Marti *et al.*, “Fast beam-based alignment using ac excitations”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 23, 012802 (2020).
- [8] AMD Zynq 7000 Products Selection Guide, <https://docs.amd.com/v/u/en-US/zynq-7000-product-selection-guide>
- [9] SiC パワーモジュールデータシート, https://www.mitsubishielectric.co.jp/semiconductors/powerdevices/datasheets/sic/fmf600dxe-34bn_e.pdf
- [10] H. Takebe *et al.* “SACLA 偏向電磁石補正用4象限電源の設計と製作”, *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan)*, pp.353-356.
- [11] “EBS Storage Ring Technical Report”, ESRF, Grenoble, France, 2019, <https://www.esrf.eu/files/live/sites/www/files/about/upgrad/e/documentation/Design%20Report-reduced-jan19.pdf>