

デジタル制御による電磁石電源の開発および次世代放射光施設への展開

DEVELOPMENT OF MAGNET POWER SUPPLY USING DIGITAL CONTROLLER AND ITS APPLICATION TO NEXT GENERATION SYNCHROTRON RADIATION FACILITY

近藤力^{#,A,B,C}, 谷内努^{A,C}, 山口博史^{A,C}, 青木毅^{A,C}, 深見健司^{A,B,C}, 渡部貴宏^{A,B,C}, 小原脩平^C, 西森信行^C, 中澤伸侯^D, 福井達^B, 田中均^B

Chikara Kondo^{#,A,B,C}, Tsutomu Taniuchi^{A,C}, Hiroshi Yamaguchi^{A,C}, Tsuyoshi Aoki^{A,C}, Kenji Fukami^{A,B,C}, Takahiro Watanabe^{A,B,C}, Shuhei Obara^C, Nobuyuki Nishimori^C, Shingo Nakazawa^D, Toru Fukui^B, Hitoshi Tanaka^B

^{A)} JASRI, ^{B)} RIKEN SPring-8 Center, ^{C)} QST, ^{D)} SPring-8 Service Co., Ltd.,

Abstract

We developed high-precision digital control magnet power supplies aiming at next-generation light sources such as SPring-8-II. The control system consists of a high-precision ADC circuit and an FPGA that processes proportional-integral control and pulse-width modulation. Using the system, the current ripple and long-term stability (8 hours) of the power supply are controlled within 20 ppm. The power supply can be made to fit various magnets by readily adjusting feedback parameters. We also developed a function to synchronize the timing of multi-channel outputs such as three outputs for sextupole steering magnets. The newly developed power supplies have been introduced to the next-generation 3 GeV light source, NanoTerasu.

1. はじめに

加速器の電磁石用 DC 電源では、一般的に数 10 ppm という高い電流安定度が求められており、これを実現するためのフィードバック制御回路には、高精度なアナログ回路が用いられてきた。アナログ回路は高精度が実現できる代わりに、設計に高い技術が必要となり、動作変更や制御調整のたびに、基板の改版や部品の付け替え作業などが必要である。一方、デジタル制御技術を用いることで、制御パラメータの調整が通信操作でも可能であり、動作変更もプログラム変更で対応できるなど、柔軟性の高い電源が実現できる。近年、Field Programmable Gated Array (FPGA) や Analog-Digital Converter (ADC) など、デジタル制御に必要な回路部品が著しい発展を見せており、我々は、これらを用いて、数 10 ppm 以下の電流安定度を持つ、スイッチング方式による電磁石用電源の開発を SPring-8 のアップグレードに備えて行ってきた[1-3]。

今回、電磁石用電源として、運転で求められる機能を新たに開発した。それを基にし、次世代放射光施設 NanoTerasu[4]の電磁石電源を設計、開発した。本報告では、開発した機能と、NanoTerasu における電磁石電源の概要について説明する。

2. デジタル制御電源の概要および機能

2.1 デジタル制御電源の概要

本デジタル制御電源は、出力電流モニタ値を DCCT と 24bit 高精度 ADC 回路によりデジタル化し、それを FPGA で Proportional-Integral (PI)補償と Pulse-Width-Modulation (PWM)処理して、スイッチング回路の出力をフィードバック制御する。FPGA の構成や機能は、電源

への要求機能に合わせて柔軟に変更可能であり、回路設計の工数を抑えることが可能である。また、制御パラメータは、外部通信で変更可能とすることで、磁石毎にパラメータを最適化することを容易としている。

2.2 大電力電源

出力電力が数 kW 以上の電源は、ファミリーを組んだ電磁石の励磁を想定しており、数 100 A の電流を 20 ppm 以下という高い安定度で制御できることが要求される。この安定度を達成するために、高精度の DCCT(Danisense DS シリーズ[5])と、温度調整された高精度 ADC 回路を用いてフィードバック制御を行い、安定度 10 ppm を実現している[1]。

電源は、電力回路と制御ユニットで構成される。さらに、電力回路は、整流回路と複数のスイッチングユニットで構成される。スイッチングユニットの構成数は、電力に応じて変更され、今回は 1,2,4 で設計している。このとき、2 ユニットまたは 4 ユニットで構成している場合、スイッチング周波数は 20 kHz であるが、ユニット間でスイッチングのタイミングをそれぞれ半周期または 1/4 周期ずらし、実効的なスイッチング周波数を増やし、また、ユニット毎の電流のスイッチングリップルを互いに打ち消し合わせることで、出力電流のリップルを抑えるものとした。また、制御ユニットは、フィードバック処理を行う FPGA、インターロック処理や外部との通信を担う Programmable Logic Control (PLC) を、制御用電源と共に収めて構成されている。このように、基本設計を統一化し、更に主要回路をユニット化することで、設計の共通化や量産性の向上、交換作業の簡便化などを図っている。

2.3 ステアリング磁石用電源概要

ステアリング磁石用の電源(STR 電源)は、出力電力は高々 200 W 程度の電源であるが、磁石毎に個別に接続されるため、多数の電源が必要になる。そこで、量産性

[#] ckondo@spring8.or.jp

や保守性を考慮して、1台の制御ユニットで、最大8台の出力ユニットの通信制御と電力供給を行う構成とした。制御ユニットは、PLC-CPU とタッチパネルを備え、出力ユニットの操作や設定、また上位制御系と EtherCAT にて通信する。また、CAN 通信により出力ユニットの動作制御やデータ収集、パラメーター設定などを行う。更に、AC-DC 整流ユニットを備え、三相 200 Vac 電力を 280 Vdc に変換して各出力ユニットに給電する。このような構成にすることで、通信制御の機器や整流回路を共有して部品点数を減らせることや、出力ユニットの機能を簡略化して汎用性を高められること、制御ユニットの PLC プログラムの書き換えのみで電源の動作を変更できるなど、様々な利点を持たせる事ができる。

出力ユニットは、280 Vdc を DC-DC 変換で出力に応じた最適な DC 電圧とし、それをフルブリッジ型スイッチング回路でバイポーラー出力を行う。出力電流は小型 DCCT(UP200A[6])で測定され、高精度 ADC でデジタル変換して、FPGA で PI 制御と PWM 変調を行うことで、出力電流をフィードバック制御する。また、出力ユニット1台に対して、出力数を 2 または 3 つとしている。これは、回路の共有化だけでなく、後に述べる六極電磁石のステアリング機能のためでもある。

制御ユニットと出力ユニットは 19 インチラックに組み込むものとし、磁石構成に合わせて出力ユニット数を変更できる。また、トラブルが発生した場合は、不具合の起きたユニットのみ交換することで速やかに復旧できるものとした。この交換作業中は、他のユニットは出力を継続したまま行えるものとし、ビーム運転への影響を極力抑えられるようにした。

2.4 ステアリング磁石用電源における機能開発

STR 電源では、実際の運転に合わせて様々な機能が要求される。まず、バイポーラー出力として正負の全出力範囲において要求される電流安定度を実現する必要があるが、これはスイッチング電源が苦手とする 0 A 付近の小電流領域も含まれる。そのため、この領域の電流を安定化させる両極性スイッチング動作を開発した。また、六極電磁石に3対の補助コイルを使ってステアリング磁場を発生させる。この時、3対の励磁電流は、高次磁場を抑制するため、一定の比率であることが要求される。この比率を、電流変更時であっても維持できるよう、3対の電流を同期して変更できるものとした。最後に、ビーム軌道に外乱を与えることで、位置モニタと磁石間の相対位置を測定する時、ステアリング磁場を周期的に変動させるパターン動作が要求される。

2.4.1 小電流領域の両極スイッチング

バイポーラー出力のスイッチング電源は、Fig. 1(a)のようなフルブリッジ型スイッチング回路で実現できる。図中の4つのスイッチング素子(Qa, Qb, Qc, Qd)のうち、Qa と Qd の Gate に ON パルスを送ることで正電圧が、Qb, Qc に ON パルスを送ると負電圧が出力される。

一般的なPWM制御では、正電圧出力のみ、あるいは負電圧出力のみといった単極の出力動作とし、その ON パルス幅により出力量を制御する(Fig. 1(b)右)。このとき、パルス幅を t_g とすると、平均出力電流 $\overline{I_{out}}$ は、

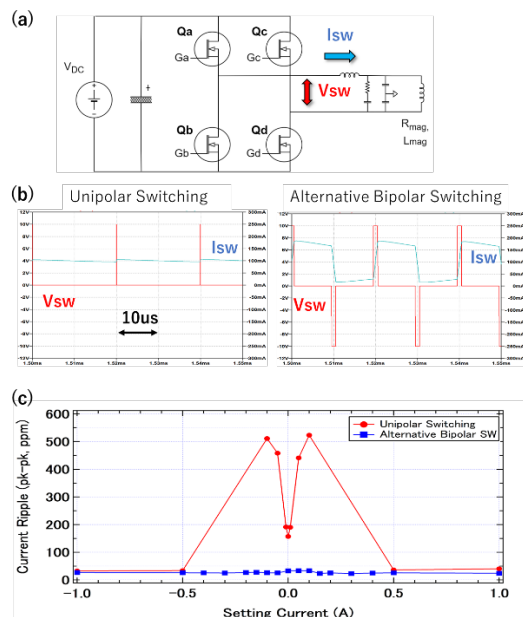


Figure 1: (a) Schematic layout of switching circuit. (b) Simulated waveforms of current and voltage in unipolar switching(left) and alternative bipolar switching (right). (c) Measured current ripple dependence on setting current for two switching methods.

$$\overline{I_{out}} = \frac{V_{DC}}{R_{mag}} \frac{t_g}{T_{SW}} \quad (1)$$

で表される。ここで、 T_{SW} はスイッチング周期、 V_{DC} は DC-link 電圧、 R_{mag} は負荷の抵抗値である。このような単極出力のパルス幅だけで制御する場合、出力が小さくなるほど Gate 信号のパルス幅も短くなり、パルス幅がスイッチング素子の応答時間よりも短くなると、スイッチング動作が不安定になり、電流リップルが増大する。

我々は、このような小電流領域でも電流リップルを抑えるため、両極スイッチングによる動作手法を開発した。この両極スイッチング動作は、小電流出力時には、正出力と負出力を、半スイッチング周期毎に交互に行い、そのパルス幅の比で出力を制御する(Fig.1(b)左)。このとき、正電圧出力のパルス幅を t_{g+} 、負電圧出力のパルス幅を t_{g-} としたとき、平均出力電流は、

$$\overline{I_{out}} = \frac{V_{DC}}{R_{mag}} \frac{(t_{g+} - t_{g-})}{T_{SW}} \quad (2)$$

となり、両パルス幅の比で電流制御が為される。

この方式により小電流領域の電流リップルを抑えた一例として Fig. 1(c)に、単極スイッチングによる方式と両極スイッチングによる方式の電流リップルの実測値を示す。単極方式では、最大で 500 ppm 程度まで増大したのに対し、両極方式では 30 ppm 程度に収まっており、要求値である 50 ppm 以下にリップルを抑え込めることを確認した。

2.4.2 3出力の同期動作

六極電磁石用 STR 電源は、3 対のコイルの励磁電流バランスを、電流変更中でも一定に維持しておく事が要求される。そのため、電流変更時には3出力の変更比率を一定にし、かつ電流変更タイミングを同期させるものと

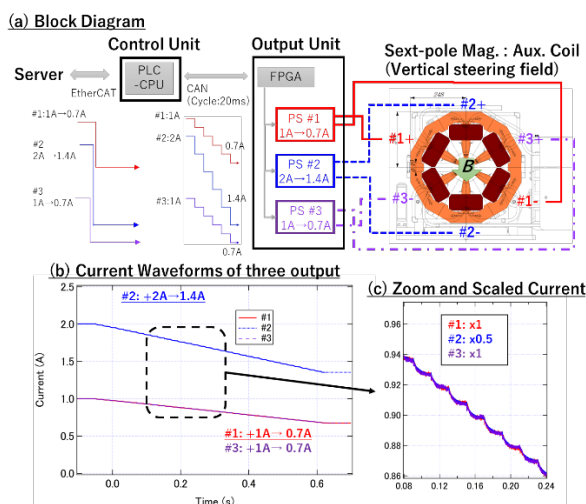


Figure 2: (a) Block diagram of steering PS and auxiliary coils of sextupole magnet. (b) Current waveforms of three outputs when the currents are changed from (1A, 2A, 1A) to (0.7A, 1.4A, 0.7A). (c) Zoomed and scaled waveform.

した。これを実現するシステムの構成図と電流変更時の電流変化のイメージを、Fig. 2 に示す。電流変更を行うとき、まず制御ユニットが外部から3出力の目標電流値を受ける。そして、内部の PLC-CPU が 3 出力の電流の変更比率が一定になるよう 1 ステップ(20 ms)毎の電流変更量を計算する。そして、制御ユニットから CAN 通信を通じて、出力ユニットへ 20 ms 毎に電流設定値を送信する。出力ユニットは受信した設定値に応じて3出力をそれぞれ変更する。このとき、電流制御を行う FPGA は、3 出力の変更タイミングを同期することで、1 ステップ中の電流比率のズレも極力抑えるものとしている。

Figure 2(b)に、3 出力の電流設定値を其々(1.4 A, 2.0 A, 1.4 A)→(0.7 A, 1.4 A, 0.7 A)へと、比率を 1:2:1 で変更した場合の電流波形を示す。また、縦軸を規格化したときの波形を Fig. 2(c)に示す。ここから、3 出力は電流変更のタイミングが揃っており、かつ電流変更中も各電流比率が維持されていることが分かる。

2.4.3 パターン動作機能

STR 電源は、出力電流を 0.5~1 Hz 程度の周期的な変動を加える機能が要求されている。この変動パターンは、様々なパターンが想定されるため、任意のパターンに対応できるよう、次の構成とした。まず、制御ユニットの PLC-CPU に 100 点の電流設定値のテーブルを持たせ、ここに外部から任意の値を書き込めるものとした。そして、パターン動作を開始すると、このテーブルの値を、出力ユニットへ 20 ms 毎に、設定値として順々に送信する。出力ユニットは、受信した設定値に応じて都度、電流を変更していく。このようにすることで、出力ユニットは最大 2s 周期で、任意パターンの電流出力が可能となる。

3. NanoTerasu における電磁石電源

3.1 概要および構成

次世代放射光施設 NanoTerasu は、3 GeV の線型加速器(Li)とビーム輸送ライン(BT)、そして周長約 360 m の低エミッタンス蓄積リング(SR)で構成される。これらの加速器では、電子ビームの軌道補正のため、多数の電磁石と、それらに励磁電流を流すための多くの電磁石電源が用いられる。今回、この電磁石電源として、デジタル制御方式が採用され、この方式を元に設計、製作、設置を行った。

電磁石と電源の大まかな組み合わせは、励磁電流が 20 A 以下の磁石に対しては STR 電源を用い、50 A 以上の励磁電流を流す磁石に対しては、大電流電源を用いるものとした。Table 1 に、使用した電源の種類と主な電気定格を示す。

線型加速器・ビーム輸送ラインでは、100 台以上かつ 18 種類の電磁石に対して、大電流電源 3 種類 9 台、STR 電源 5 種類 54 台で対応し、設計工数の抑制や予備品の削減を図った。このように、1 種類の電源で複数種の電磁石を用いる場合、電磁石の負荷パラメーターに応じて電源の制御パラメーターを最適化する必要が生じる。そのため、制御パラメーターを容易に調整できるという特徴を活かし、多数の電源を現場設置後に調整している。

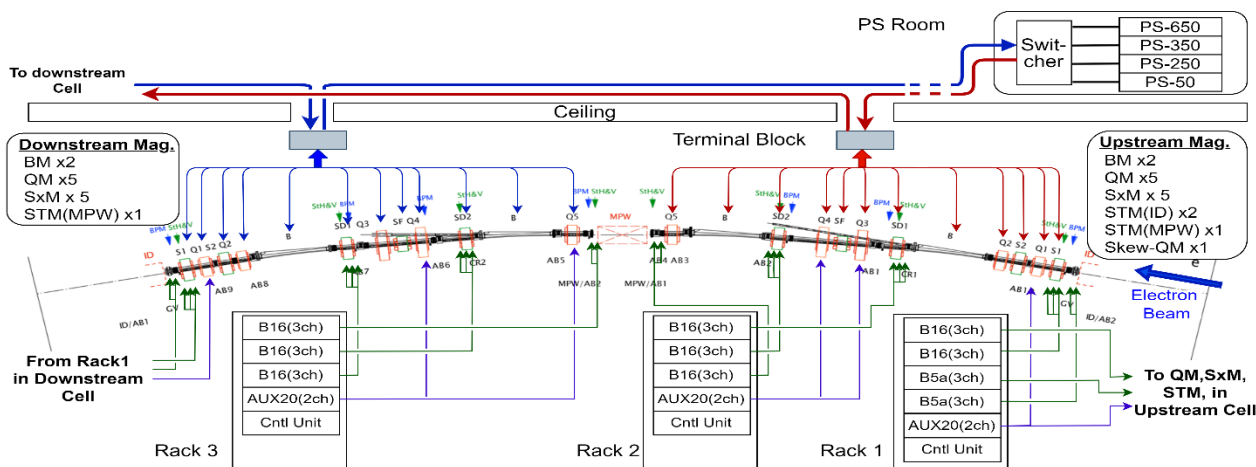


Figure 3: Schematic layout of magnets and power supplies for one cell in storage ring in NanoTerasu.

Table 1: Specifications of Magnet PSs in NanoTerasu

| PS Name | Polarity | Out-put | Current/Voltage | Quantity (Backup) |
|----------------------|----------|---------|-----------------|-------------------|
| High Power PS | | | | |
| U650 | Unipolar | 1 | 650A/400V | 2 (1) |
| U350 | Unipolar | 1 | 350A/200V | 4 (1) |
| U50 | Unipolar | 1 | 50A/50V | 3 (1) |
| U250 | Unipolar | 1 | 250A/110V | 6 (1) |
| U330 | Unipolar | 1 | 330A/60V | 3 (0) |
| U170 | Unipolar | 1 | 170A/30V | 5 (1) |
| U300 | Unipolar | 1 | 300A/20V | 1 (0) |
| DC-link PS | | | | |
| B5a | Bipolar | 3 | +/- 5A/4V | 46 (3) |
| B5b | Bipolar | 3 | +/- 5A/10V | 19 (1) |
| B12 | Bipolar | 2 | +/- 12A/20V | 17 (1) |
| B16 | Bipolar | 3 | +/- 16A/8V | 133 (4) |
| U20 | Unipolar | 2 | 20A/10V | 6 (1) |
| AUX9 | 4-Quad. | 2 | +/- 9A/20V | 5 (1) |
| AUX20 | 4-Quad. | 2 | +/- 20A/9V | 50 (2) |

蓄積リングは一周 16 セルで構成されており、その基本セルの磁石と電源の構成を Fig. 3 に示す。各セルは偏向磁石(BM)1種類 4 台、四極磁石(QM)5 種類 10 台、六極磁石(SxM)5 種類 10 台は、種類毎にファミリーを組んでおり、各1台の大電力電源(PS-U650, -U350, -U50, -U250)により励磁される。また、六極磁石の3対の補助コイルは、STR 電源で個別に励磁し、ステアリング磁場を生成している。一部の四極磁石は、磁石毎に補助電源(QM-aux PS)が接続され、磁石個別に磁場調整を行えるようにしている。他に、単独ステアリング磁石(STR-ID, STR-MPW)や Skew 四極磁石(Skew-Q)などは、個別に STR 電源が接続される。大電力電源は 11 台 4 種、STR 電源は 3 種 200 台近くで構成される。

ファミリー磁石用の大電流電源は磁石電源室に設置され、ケーブルはトンネル天井を通じて各セルの磁石に渡される。天井ケーブル経路は、リングを反時計回りで一周させて RF 空洞部で折り返し、時計回りで電源室まで戻している。このように行き還りのケーブルを揃えて並べることで、ループ面積を小さくし不要なノイズ放射を抑えている。なお、往きのケーブルは各セルの上流部の磁石を、還りのケーブルは各セルの下流部の磁石に接続している。トンネル内では端子盤で中継し、可とう性を考慮してシールド無しケーブルとしている。

一方、STR 電源は、内周保守通路に設置された 19 インチラックに組み込まれ、磁石間ケーブルは床下ピットを通じてトンネル内に引き込み、磁石に直接接続している。

ケーブルは、放射線劣化を考慮してノンハロゲンケーブルとしている。また、ケーブル径は、ケーブル長による電圧降下だけでなく、さらに環境温度や発熱による表面温度が最大でも 45°C 以下になるよう考慮して選定した。

3.2 インターロック

磁石インターロックは、電磁石の過熱や冷却水低下が起こった時に、電磁石電源を停止し、また線型加速器の

電子銃を停止するなどの役割を担う。

機器構成を Fig. 4 に示す。蓄積リングでは、インターロック親機1台と 17 台の子機で構成され、これらは CC-link IE-Field 通信でリング接続がされている。子機は各セルやセクションに配置され、磁石の温度や水流量の異常を監視して、情報を親機へ送信している。また、親機からの電源許可信号を受けており、これを STR 電源の制御部へ分配し、停止司令時に STR 電源も停止できるものとしている。親機は、子機からのインターロック信号を集約し、また外部から安全系など許可信号を受けている。これらが正常である場合に、ファミリー電源や STR 電源への出力許可信号を出す。

線型加速器側では、磁石インターロック機器がクライストロンギャラリーの電子銃付近とビーム輸送ライン付近の2箇所に設置され、蓄積リング親機と CC-link IE Control 通信で繋がっている。各セクションの主要な電源が停止した場合は、電子銃付近のインターロック機器が電子銃制御部へ出射停止信号を送る。

インターロックの詳細情報は、CC-link IE-Control で接続している情報収集システムを通じて、データベースへ上げている。

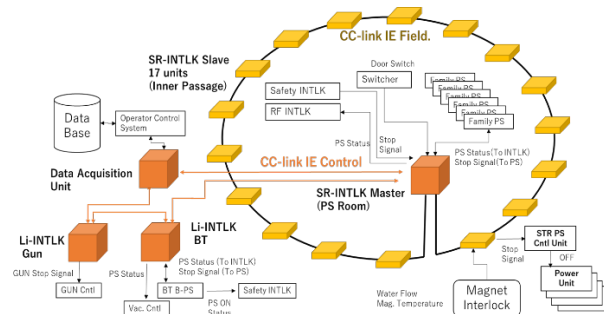


Figure 4: Schematic layout of magnet interlock system in NanoTerasu.

3.3 保守性

電源トラブルが発生したときに、復旧作業を少人数でかつ迅速に行えるよう、以下のような仕組みとしている。ファミリー磁石用大電力電源は、電源タイプ毎に1つの予備機を準備しているが、出力のケーブルの切替がネックとなっていた。そこで、出力側に設置した切替器によって磁石との接続経路を、通常機から予備機にブスバーにて容易に変更可能とした。Figure 5 に、切替器の外観と内部構造の写真を示す。作業ミスを防止するよう、表示の明確化や組み合わせの単一化を図った。なお、切替器の出力側には、励磁電流測定用の DCCT を備えており、常時の電流測定や、切替時の電源のオフセット個体差の補正を行えるものとしている。

STR 電源の出力ユニットのトラブル時は、故障したユニットを予備ユニットに交換することで対応する。このとき他の出力ユニットの出力を停止せずに交換可能としており、作業による加速器への影響を極力抑えるものとしている。

保守交換用の部品などは、ユニットや部品の共通化を行うことで、必要な数量を抑えられるものとした。

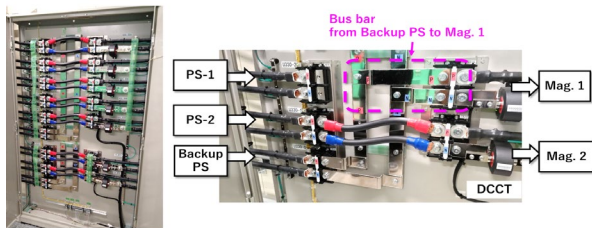


Figure 5: (Left) Full view of PS switcher. (Right) Photograph of power line connection switched from PS-1 to Backup PS.

4. まとめと今後

我々は、次世代放射光用の電磁石電源を、デジタル制御技術を用いて開発した。ファミリー磁石などを励磁する大電流電源では、主要回路を共通モジュール化することで、設計の共通化や量産性の向上を図った。またステアリング磁石用電源は、整流回路や制御機能の一本化を図り、コスト削減を目指した。また、小電流領域の電流安定性を実現するため、両極動作によるPWM制御を開発し、電流リップルを 50 ppm 以下に抑えることに成功した。また、複数出力の同期性や、簡易なパターン変更機能などを開発した。

このように開発した電源を、東北の次世代放射光施設 NanoTerasu の電磁石電源システムに展開した。この施設では、20 台以上の大電流電源と、250 台以上のステアリング電源で構成され、保守性を考慮した設計とした。本電源は、2023 年より運用が開始された。

更に、SPring-8 のアップグレード計画でも、これらのデジタル制御技術を用いた電磁石電源の使用を検討している。

謝辞

電源開発および NanoTerasu の電源の量産、設置を行って頂いた、工藤電機株式会社の寿田氏、鈴木幸雄氏、松氏、および技術員の方々、ニチコン株式会社の直江氏、山中氏および技術員の方々に深く感謝致します。また、電源の設置作業に尽力して頂いた NAT の浅野氏を始めとする技術員の方々に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 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.
- [2] T. Watanabe, S. Takano, and H. Tanaka, “Updates on Hardware Developments for SPring-8-II”, in Proc. IPAC'18, Vancouver, Canada, 2018, pp. 4209-4212.
- [3] Takahiro Watanabe and Hitoshi Tanaka, Synchrotron Radiation News, vol.1, no.1, 2023, pp.3-6.
- [4] N. Nishimori, “A New Compact 3 GeV Light Source in Japan”, in Proc. IPAC'22, Bangkok, Thailand, 2022, pp. 2402-2406.
- [5] <http://www.danisense.com/images/pdf/0-600A/DS200ID.pdf>
- [6] <http://www.softenergy-controls.co.jp/product/sensor.html>