

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 FAST CURRENT MODULATION SYSTEM OF Q-MAGNETS FOR MULTI-ENERGY OPERATION IN SACLA

近藤力^{#, A, B)}, 中澤伸侯^{C)}, 山田遼^{C)}, 家納寛^{C)}, 森本理^{C)}, 福井達^{B)}, 原徹^{B)}
 Chikara Kondo ^{#, A, B)}, Shingo Nakazawa^{C)}, Ryo Yamada^{C)}, Yutaka Kano^{C)}, Osamu Morimoto^{C)},
 Toru Fukui^{B)}, Toru Hara^{B)}
 A) JASRI, B) RIKEN SPring-8 Center, C) SPring-8 Service Co. Ltd.

Abstract

In SACLA, electron beams with a repetition rate of 60 pps are distributed to two XFEL beamlines and a beam transport line to the SPring-8 storage ring shot-by-shot. In order to optimize the beam optics of individual beamline, we developed a magnet system which allows rapid alteration of excitation currents of a quadrupole magnet. The system comprises a laminated silicon steel plate magnet, a digitally controlled bipolar power supply and a trigger/communication system. The system changes the excitation current within 15 ms with a high level of accuracy, namely less than 100 ppm. The maximum range of the current variation is $\pm 100\%$ depending on the type of a magnet and power supply. This system has been in operation since autumn 2023, allowing the XFEL parameters to be adjusted quickly and easily for each beamline.

1. はじめに

X 線自由電子レーザー施設 SACLA では、2 本の XFEL ビームライン (BL2, BL3) と、SPring-8 蓄積リングへの入射ビームライン (XSBT) に、電子ビームを繰り返し 60 pps にて振り分けている [1]。この時、各ビームラインの要求に応じ、ビームエネルギーをショット毎に 6-8 GeV の間で変更しているが、一方で四極電磁石の励磁はこれまで DC 電源を使っていた。このため、振り分け前の線型加速器部ではビームエネルギーの差異によって四極電磁石の集束力が変わり、ビームエンベロップにミスマッチが生じていた。このミスマッチは振り分け後の四極電磁石で補正しなければならないが調整に時間がかかり、XFEL ユーザー実験の効率を下げていた。

そこで電磁石の励磁電流を、ショット毎に変更できるパターン電源および通信制御システムを開発した。これを

線型加速器部の四極電磁石群の一部に導入することで、エネルギーが変わってもビームライン毎に独立にビームエンベロップを保つことができるようにした。本システムは 2020 年冬より開発を開始し、まず既存の DC 電源を改造したユニポーラー型パターン電源を一部の四極電磁石に先行的に導入した [2]。その後、バイポーラー型パターン電源を新たに開発し、2024 年春までに必要とされる四極電磁石全てに導入した。

本報告では、電磁石システムの概要、および新たに開発したバイポーラー型パターン電源の構成と動作結果を述べる。

2. システムの概要と導入計画

Figure 1 に SACLA 線型加速器の概要図と、導入した四極電磁石の種類と場所を示す。SACLA では熱電子銃で生成された電子ビームを、238 MHz~5712 MHz の

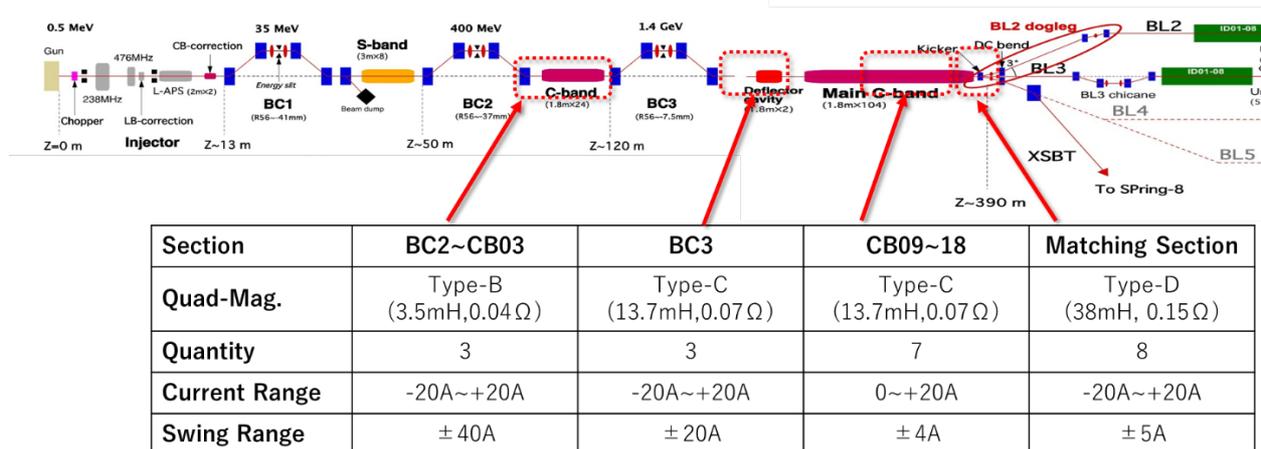


Figure 1: Schematic layout of the configuration of SACLA and required specifications of quadrupole magnets of the fast current change system.

ckondo@spring8.or.jp

Table 1: Specifications of Pattern PSs, B8p and U5p[2]

	Bipolar PS (B8p)	Unipolar PS (U5p)
Current	- 20A~+20A	0A ~ +20A
Voltage	- 70V~+70V	0V ~ +16V
Output Channel	1ch	1ch
Stability	<200 ppm (pk-pk)	<200 ppm (pk-pk)
Switching Freq.	50 kHz	(Dropper)
Input Power	3 Φ AC200V	3 Φ AC200V
Feedback Control System	Digital Control (FPGA:Zynq-7020)	Analog Circuit
Size	W482mm x D600mm x H221mm	W482mm x D590mm x H221mm

RF 加速により 1.5 GeV まで加速しながら、速度変調と 3 段のシケイン(BC1,BC2,BC3)によってバンチ長を 20 fs 程度まで圧縮する。その後、約 100 本の C-band 加速管 (主加速部)で 6-8 GeV まで加速する。その後、振り分け (MS) 部のキッカー電磁石により 2 本の XFEL ビームラインと SPring-8 へのビーム輸送ラインに振り分けられる。

XFEL ビームライン BL2, BL3 では、各実験ユーザーの要望に応じて、主加速部下流加速管の加速 RF をショット毎に ON/OFF することでビームエネルギーを個別に調整しているため、ビーム光学系の最適化には、これ以降の主加速部と MS 部の四極電磁石の励磁量をビームエネルギーに応じてショット毎に変更できるようにする必要がある。また、SPring-8 への入射では、将来的にはビームエネルギーを現在の 8 GeV から 6 GeV に下げ、かつ数 ps の長バンチビームで入射する計画である。バンチ長を伸ばすには、BC2 と BC3 の間の C-band 加速管の位相を大きく変える必要があり、加速管の集束力の変化分を今回導入した BC2 から BC3 の四極電磁石で補正する。

このような励磁電流を 60 pps の繰り返して高速に変更するシステムでは、電磁石のパルス化や、通信システムのトリガ同期などが必要となるが、励磁用の電磁石電源のパターン動作化が大きな開発要素となった。今回パターン電源の開発は、ユーザー利用への早期導入のため、2 段階に分けて進めた。第一段階では、導入決定から 1 年程度の期間で、主加速部における 8 箇所の四極電磁石と電源を交換した。この部分は、電流の振幅が比較的小さく極性を反転させる必要がないため、既存のユニポーラー型の DC 電磁石電源を高速応答化するという部分的な改造で対応し、設計などの開発工程を大幅に短縮した。同時に、電磁石電源の通信制御システムを改造し、外部トリガに同期して電流変更を行えるようにした。この開発については、以前の発表[2]に詳しい。第二段階では、残りの BC2~BC3、MS 部のインダクタンスが大きく違う 3 種類の電磁石に対し、電流を両極領域で大きく振れる電源が求められており、このような大電力のバイポーラー型パターン電源を、約 2 年かけて新たに開発した。

3. 機器詳細

3.1 制御系の構成

Figure 2 に、本システムの構成図を、また Fig. 3 に動作シーケンスのタイムチャートを示す。システムは、パルス対応型の四極電磁石、パターン電源をコアとし、トリガシステム、通信システム、インターロックシステムで構成される。

トリガシステムは、SACLA の Trigger Delay Unit(TDU) の LVPECL 信号を LVDS 信号に変換し、さらに TTL 信号に変換し、複数の電源に分配している。

通信制御には、高速な通信が可能な EtherCAT 通信を用い、SACLA 電磁石電源用の通信回路 iDIO[3]を改造して使用した。この改造では、ショット毎に EtherCAT 通信を通じて電流設定値を受け、さらに外部トリガで変更開始信号(DAC Strobe)を電源の制御回路に送信する。外部トリガから送信までに約 1 ms の遅延時間があり、この間に出力電流のモニタ値など電源の状態を読み出し(ADC Busy)して、ショット毎の電流値を上位制御系に送信できるようにしている。なお、変更開始信号のタイミングのジッタは 0.3 ms 程度である。

パターン電源の制御回路は、iDIO から変更開始信号

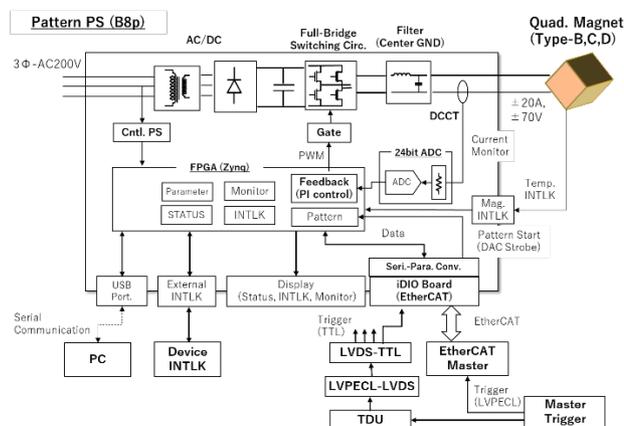


Figure 2: Configuration of the fast current change system.

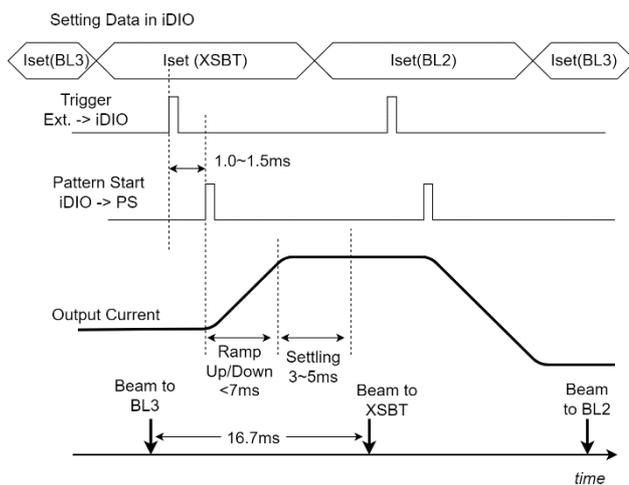


Figure 3: Time chart of the fast current change system.

を受けると即時に電流変更を開始し、Ramp up/down 動作に 7 ms 以下、その後の電流整定を 3~5 ms 程度で行う。これにより、電子ビームが磁石を通過する約 15 ms 後の電流安定度 200 ppm(pk-pk)以下を実現する。

また上位通信システムは、RF システムで採用されている同期システム[4]を改造して、iDIO の電流設定値の変更をビーム間のタイミングで、EtherCAT 通信経路にて行えるものとした。

3.2 四極電磁石

四極電磁石のヨークには、電流変更時に発生する渦電流を抑制するため、厚さ 0.35 mm の積層珪素鋼板を用い、要求される四極磁場に応じて 3 種類の電磁石 (Type-B,C,D) を製作した。各電磁石の負荷パラメーターなどは Fig. 1 中に示す。

3.3 バイポーラー型パターン電源

今回開発したバイポーラー型パターン電源(B8p)の主な仕様を Table 1 に示す。また、参考のために先行して開発したユニポーラー型パターン電源(U5p)の仕様値も併記する。

高インダクタンス負荷をパターン動作させる時、電源に必要な電圧 V は、負荷の抵抗 R だけでなくインダクタンス L と電流変更速度にも依存し、その大きさは

$$V = L \frac{dI}{dt} + RI \quad (1)$$

で決まる。BC 部および MS 部の電流の振幅が大きい四極電磁石では、電源の電圧は 70 V 以上が要求される。このような出力を持つ電源にドロップ方式を用いると、内部の発熱が大きくなり電源の大型化や高コスト、周囲への放熱などが問題となる。そこで、高効率化が可能なスイッチング方式を選択した。また負荷電流を減ずる時には、励磁エネルギーを電源側で吸収する四象限動作を行うこととなる。この時電源側にはエネルギー吸収時の対策が必要となるが、今回は整流回路の DC-link コンデンサ容量を大きくすることで吸収時の整流回路の過電圧を防ぐものとした。

また予備品の抑制などの保守性を考慮して、3 種類の電磁石に対し一種類の電源で対応するものとした。このとき、負荷のインダクタンスが一番小さい Type-B の 5 mH と一番大きい Type-D の 40 mH の間で 8 倍も違い、これらを高速かつ高い安定度で電流整定を行うには、フィードバック制御のパラメーターを負荷に合わせて個別に調整し、最適化する必要がある。そこで Spring-8 の電磁石電源の高度化に向けて開発した FPGA によるデジタル制御システムを用いることとした。このシステムは、Proportional-Integral(PI)制御と PWM 制御をデジタル処理で行い、各パラメーターは外部 PC からシリアル通信で変更する。詳細は先の発表[5]に詳しい。今回、これに設定値をパターン変更する機能などを追加した。

短時間で電流を整定する際重要となるのが、フィードバック制御応答性の高速化である。本電源では、目標電流近くまで到達した後に、3~5 ms 程度の時間で電流を精度よく整定し、変動幅を 200 ppm 以下に抑える事が要求される。そこで、フィードバック制御の応答性、すなわちゼロクロス周波数を 1 kHz 以上が確保できるよう、次の

ように設計した。まず電力回路側では、スイッチング周波数を 50 kHz の高周波スイッチングとした。スイッチング周波数を高くすることで制御帯域が広く取れる一方、性ビームダクトは数 10 kHz 以上の高周波の磁場は減衰するため、50 kHz の電流リップルによるビームへの影響は抑えられる。また、出力部の Low Pass Filter(LPF)のカットオフ周波数を 3 kHz 以上にすることで、電力回路の応答性を確保した。次に、フィードバック制御のリファレンス波形は台形型とし、屈曲点には適度なスムージングを入れることで整定時のリングングを抑えた。その上で、パターン動作を確認しながら PI 制御パラメーターなどの種々のパラメーターを調整し、整定動作の最適化を行った。フィードバック制御の開ループゲインの測定結果について、典型例を Fig. 4 に示す。測定は四極電磁石 Type-B を負荷とし、DC+20 A の出力で行った。測定手法は以前の発表[2]に詳しい。測定結果から、ゼロクロス周波数 1.8 kHz、位相余裕 27°、ゲイン余裕 2.4 dB と高速かつ安定したフィードバック制御が実現できている事を確認した。

また、バイポーラー出力の電源は、0 A 近辺の小電流領域でも高い電流安定度が要求されるが、この領域はスイッチング動作が不安定になりやすい。そこで、小電流領域では、スイッチング周期の半周期毎に正出力と負出力を交互に行い、そのパルス幅の比で出力を調整する両極スイッチング動作[5]を用いることで、電流の安定化を図った。

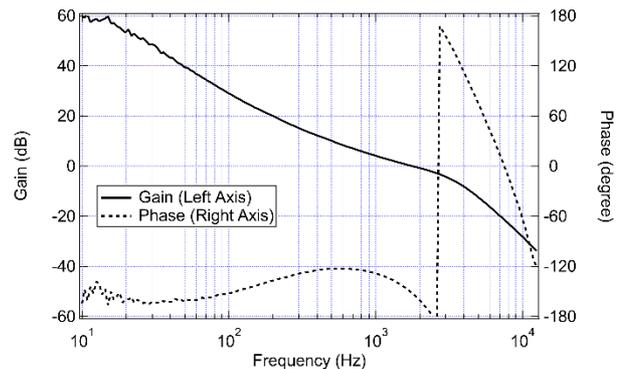


Figure 4: Measured feedback loop gain of the pattern PS for Q Type-B with 20 A output current.

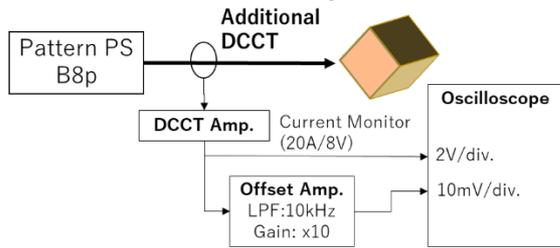
4. 出力試験

Figure 5 に電源を各電磁石に接続し、パターン出力させた時の典型的な負荷の電流波形と電流測定セットアップの模式図を示す。制御パラメーターは負荷毎に最適化している。出力電流波形は、外部 DCCT を入れて測定している。さらに、このモニタ信号に高精度オフセットアンプ[6]を用いてオフセットをかけ、フラットトップ部をオシロスコープで拡大することで、電流安定度を 10 ppm 以下の精度で測定した。

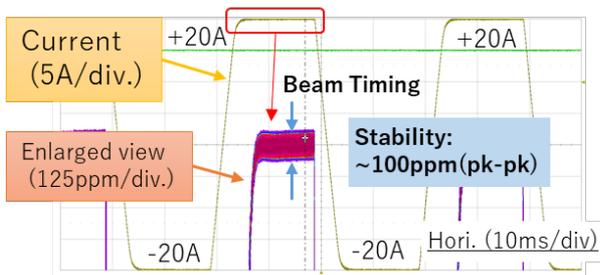
これらの測定結果から、電流整定はトリガから 12~13 ms 後には完了していることが分かる。また、電流安定度を、トリガから約 15 ms 後のビームタイミングにおける電流変動で定義した場合、各電磁石の電流安定度は 20~100 ppm(pk-pk)と評価でき、要求仕様の 200 ppm(pk-pk)以下を満たしていることを確認した。なお

磁石 Type-B では、他の磁石に比べてフラットトップ部の電流変動幅が大きく見えるが、これは負荷のインダクタンスが小さいためスイッチング動作による 50 kHz のリップルが重畳しているためである。

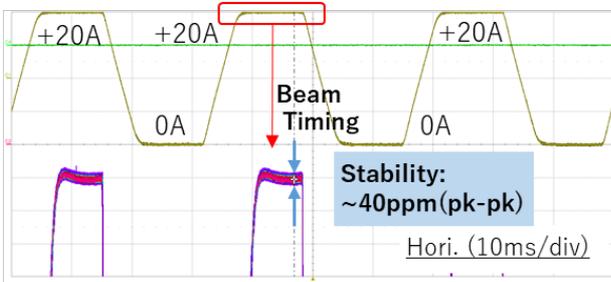
a) Measurement Setup



b) Q_Type-B: -20A ↔ +20A ※50Hz



c) Q_Type-C: 0A ↔ +20A ※60Hz



d) Q_Type-D: +16A ↔ +20A ※60Hz

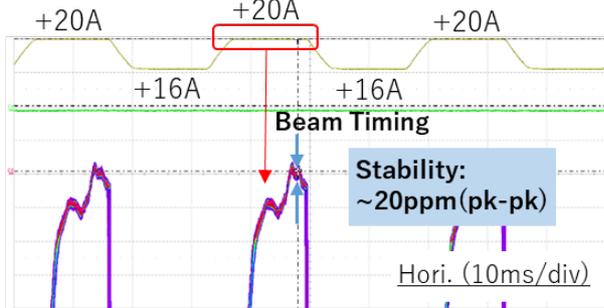


Figure 5: a) Schematic layout of a measurement setup. Measured waveforms of the current (yellow) and enlarged views of the flat-top (red) for quad. magnet (b) Q_Type-B, (c), Q_Type-C, and (d) Q_Type-D. The stabilities are estimated by the current fluctuations at the beam timing indicated by the arrows.

5. 設置および運用

パルス四極電磁石およびパターン電源の設置は、電源の量産や運転停止期間に合わせて3段階に分けて行った。一段階目として、2022年3月に主加速部下流部分(CB09~18)に四極電磁石 Type-C とユニポーラー型パターン電源 U5p を7セット設置し、トリガシステム、通信システムも含めて DC 出力での運用を開始した。その後第二段階として2023年9月にMS部に四極電磁石 Type-D とバイポーラー型パターン電源 B8p を8セット設置し、ビームライン毎のビームエネルギーに合わせた高速電流変更を開始した。第三段階として2024年3月に、BC2, BC3 部に四極電磁石 Type-B,C およびバイポーラー型パターン電源 B8p を6セット設置した。これらは、将来的に SPring-8 のアップグレード時の長バンチビームの入射を行う時に、高速電流変更を行う予定である。Figure 6 に電磁石および電源の設置例の外観図を示す。

高速電流変更システムを導入したことで、2つのビームラインでの XFEL 運転では、各 BL で独立してビーム光学系の調整が行えるようになり、XFEL 調整時間が格段に短くなるなど、ユーザー実験の効率化に貢献している。



Figure 6: Photographs of the installed Q Type-D magnets in the matching section (Upper), and the pattern PSs (Lower).

謝辞

本電源の開発において、電源の設計、製作、および動作試験を行った工藤電機株式会社の寿田氏、佐藤氏、および佐々木氏らに感謝致します。電磁石の設置や GUI 製作などを行ったスプリングエイトサービスの技術員の方々に感謝致します。また、電磁石を製作した株式会社 TOKIN、配線作業を行った日立造船株式会社の方々に感謝致します。

参考文献

- [1] T. Hara *et al.*, “Low-emittance beam injection for a synchrotron radiation source using an X-ray free-electron laser linear accelerator”, *PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS* 24, 110702 (2021).
- [2] S. Nakazawa *et al.*, “既存 DC 電磁石用電源をベースにした高精度パルス駆動電磁石電源の開発”, *Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Aug. 29 – Sep. 1, 2023*, pp. 509-512.
- [3] H. Takebe *et al.*, “XFEL/SPring-8 電磁石電源の試験と制御”, *Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan. August 4-6, 2010*, pp. 647-650.
- [4] T. Fukui *et al.*, “The Design of the Control System for the SACLA/SPring-8 Accelerator Complex to Use the LINAC of SACLA for a Full-Energy Injector of SPring-8” *IPAC2019, Melbourne, Australia, 2019*, pp. 2529-2531.
- [5] C. Kondo *et al.*, “High precision digital control magnet power supplies”, in *Proc. IPAC'23, Venice, Italy, 2023*, pp. 3773-3775.
- [6] S. Nakazawa *et al.*, “高精度低雑音オフセットアンプの開発”, *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31 - August 3, 2019*, pp. 979-982.