

SACLA電子バンチ振り分けの為にキッカー電磁石用 高精度パルス電源の開発とNMRパルス磁場測定

HIGH PRECISION PULSE MAGNET POWER SUPPLY DEVELOPMENT FOR SACLA BEAM-LINE SWITCH AND PULSE NMR MEASUREMENT

武部英樹^{#,A)}、原 徹^{A)}、深見健司^{B)}、大竹雄次^{A)}、稲垣隆宏^{A)}、近藤力^{A)}、田中均^{A)}、
川口秀章^{C)}、吉本宏^{C)}、中島 司^{D)}
Hideki Takebe^{#,A)}, Toru Hara^{A)}, Kenji Fukami^{B)}, Yuji Otake^{A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Chikara Kondo^{A)},
Hitoshi Tanaka^{A)}, Hideaki Kawaguchi^{C)}, Hiroshi Yoshimoto^{C)}, Tsukasa Nakajima^{D)}
^{A)}RIKEN SPring-8 Center, SACLA, ^{B)}JASRI, ^{C)}Nichicon Kusatsu KK, ^{D)}Echo-Denshi KK

Abstract

In order to achieve quasi-simultaneous operation of multi-XFEL beamlines, a pulse-by-pulse electron beam switching system has been developed at SACLA. In this system, a kicker magnet deflects the electron bunch, whose maximum repetition is 60 Hz, into three directions. The power supply for the kicker magnet generates trapezoidal current waveforms, whose polarity and amplitude can be flexibly changed. The stability of the pulsed current is found to be less than 11ppm. The magnetic field at a flat top (4ms) of the trapezoidal waveform is measured by using newly developed NMR system. The magnetic field stability better than 15ppm is confirmed with this NMR. In this paper, the design and development of the high-precision pulse power supply and the newly developed NMR system are described.

1. はじめに

理化学研究所が SPring-8 サイト内に建設した X 線自由電子レーザー施設、SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) は 2011 年 6 月にレーザー発振達成後、2012 年 3 月より利用実験への供用を開始し、現在ビームラインの増設を行っている。

SACLA の電子ビームは、熱電子銃から取り出され S-band、C-band 等の加速管で 8GeV まで加速された後、光源棟にあるアンジュレータでレーザー発振を起こす。増加する実験ユーザーに対応するため、2014 年 9 月に 2 本目のビームラインを増設、更に 2015 年からは 2 本のビームラインにおいて同時に実験が行えるよう、10pps、30pps 又は 60pps の電子バンチを 3 つの方向にバンチ毎に振り分けるシステムを開発している。電子バンチの振り分けは、線形加速器最下流の Matching Section (MS 部) に設置するキッカー電磁石を用いて行う^[1]。キッカー電磁石電源は、最大電流±320A、最大電圧±150V、最大繰り返し 60pps の 4 象限方式のパルス電源とし、16ms の台形波パルスを生産する。

DC 四象限電源は、SPring-8 蓄積リング四極電磁石や SACLA シケイン部の偏向電磁石の補正用電源として用いてきた^[2]。今回開発したパルス四象限電源は、60pps 台形波の Flat Top 部における電流の安定性と再現性を得るために、100kHzFET を使ったスイッチング電源方式を採用し、現状の X 線レーザー発振を維持するために 30ppm(peak to peak; p-p)以下 (目標値 10ppm 以下) の電流安定度を目指している。またインダクティブ負荷に対してパルス電流を供給、

吸収するため、四象限電源方式は高い効率が期待できる。

本報告では高精度パルス電源の開発とパルス電流の高精度測定方法、ノイズの評価方法、NMR 方式のパルス磁場高精度測定器の開発などについて報告する。

2. 高速振り分けシステム

400m の SACLA 線形加速器最下流の MS 部には、現在 DC 偏向電磁石が設置され、電子ビームを+3 度 (53mrad)、0 度、-3 度 (-53mrad) に振り分けている^[2]。その電流安定度は 10ppm (p-p)、リップル許容値は 10ppm (RMS) 以下である。これを Figure 1 に示すキッカー電磁石(9mrad)と DC ツインセプタム電磁石 (43mrad) へ置き換える (2015 年 1 月予定)。DC ツインセプタム電磁石電源の必要安定度とリップルは 10ppm(p-p)である。

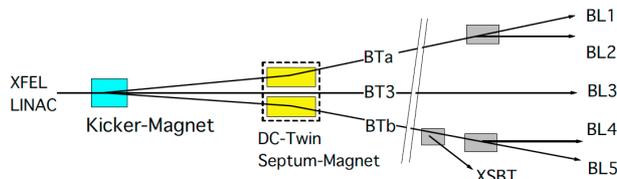


Figure 1: Kicker magnet and DC twin-septum magnet in the Matching Section of SACLA.

最大エネルギー10GeV の電子ビームに対し、キッカー電磁石で約 9mrad、DC ツインセプタム電磁石で更に約 43mrad ビーム軌道を偏向させる。DC ツインセプタム電磁石は磁極長 2000mm、磁極間ギャッ

[#] takebe@spring8.or.jp

幅 22.5mm、最大電流と電圧は 1000A-30V で現在設計製作中である。

キッカー電磁石の運転パターンの例を Figure 2 と Figure 3 に示す。Figure 2 左図は 1 方向にのみ振る場合、Figure 2 右図は BTb と BT3 の 2 カ所に交互に振る場合を示す。また Figure 3 は BTa と BTb、BT3 の 3 方向に交互に振る場合を示す。3 方向に分岐後は、DC 偏向電磁石により、更に BL1, BL2, XSBT, BL4, BL5 の各ビームラインへビームを分岐する。

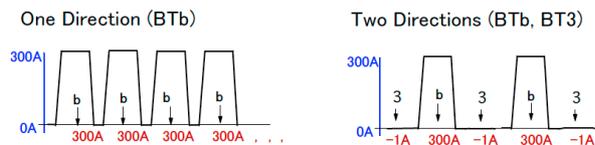


Figure 2: One and two-direction operation pattern of the kicker magnet power supply.

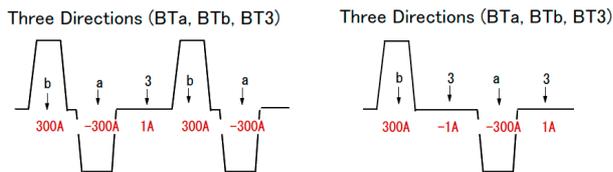


Figure 3: Three-direction operation pattern of the kicker magnet power supply.

キッカー電磁石の主要諸元は Table 1 のとおり。

Table 1: Specification of the Kicker Magnet

Yoke and Pole	Silicon steel sheet, 0.35 mm
Magnetic Field	0.67 Tesla
Pulse Pattern	Trapezoidal waveform
Pole Length	400 mm
Gap height	20 mm
Pole Width	40 mm
Electromagnetic power	5310 A · Turn/Pole
Coil Turns	18 Turn/Pole x 2 poles
Coil Cooling	Water, Hollow conductor
Max. Current	320 A
Max. Voltage	160 V
Inductance	2.6 mH
Resistance	4.4 mΩ
Cable	250sqmm, 20mL, 2mΩ

3. キッカー電磁石電源の設計と製作

キッカー電磁石電源は最大繰り返し 60pps で、16ms の台形波パルスを生成する。SACLA の電子ビームは加速器棟の BC1,2,3 を使って数 fs までパンチ圧縮されるが、安定なレーザー発振を得るにはビーム軌道変動をできるだけ小さくしなければなら

ず、キッカー電磁石 flat top 部のビームが到着するタイミングにおける電流安定度は、30ppm(p-p)以下にする必要がある。またパルス毎にビームエネルギーが異なる運転にも対応しなければならないため、台形波の波高が自由に制御できる必要がある。

キッカー電磁石電源は±320A, ±150V, 60pps の四象限電源方式で、高い安定性を得るために、FET を使った 100kHz PWM 方式の電源を 8unit 並列にした方式を取った。また電子ビームを直進させて BL3 に入射する場合には、キッカーの残留磁場除去のため ±0.2A 程度の低電流における制御精度も必要である。そのため、出力系に直列ダイオードを入れて、その順方向電圧降下により ±0.2A 付近での制御性を向上させている。

パルス電流波形は、予め PLC の SD カードから取り込まれ FPGA にセットされる。波形は Figure 4 に示すとおり、立上がり 5.6ms (T2), Flat Top 部 4.8ms (T3, T4), 立下がり 5.6ms (T5) で 60pps 運転を可能にする。電子ビームが通過するのは、flat Top 部の最後部の 0.6ms であり、この部分の電流の要求安定度とリップルは 30ppm(p-p)である。

台形波パルス flat top 部の電流値は、最大 4 つの値が上位制御システムの VME から運転前に送られ、電源内部に記憶される。外部からのトリガー信号に同期して、4 つの電流値に対応したパルスが順次出力され (Figure 5)、リスタート信号で 1 番目のパルスに戻る。トリガー信号は最短 16.6ms、リスタート信号は 66.6ms で繰り返される。

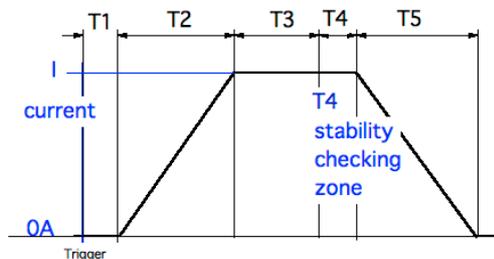


Figure 4: Magnet current waveform. The total time of T1~T5 is 16.6ms.

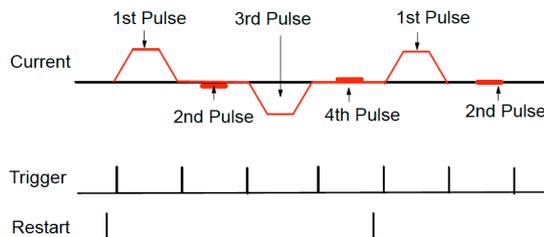


Figure 5: Four-pulse operation pattern, trigger and restart signals are delivered from SACLA timing system.

キッカー電磁石は 0.35mm 厚の電磁鋼板積層型で、パルス磁場に対する損失を下げ周波数応答性をよくしているため、数 kHz 以下の電流ノイズは抑えておかなければならない。トリガー信号はビーム到着の 10.4ms 前に送られるが、ビーム到着タイミングにお

ける安定度やノイズを押さえるため、100kHz の FET の On/Off のタイミングをトリガー信号に同期させ、ノイズの多い FET の起動パルスの立ち上がりおよび立ち下がりタイミングをビーム時刻からずらすようにしている。

AC420V-3 相受電トランスで整流された DC 電圧 250V は、まず FET-Unit 内のコンデンサーに蓄積される。そして 20A の MOS-FET^[3] (素子の定格は 63A) を使った 4 象限電源を 2 並列にした unit を、8 台並列に接続し電流を制御する (Figure 6)。冷却は unit 1 台あたり 2.5L/min、2 unit が直列の水冷却方式をとる。電源全体の冷却水は 15L/min、圧損 0.2MPa である。AC420V 3 相 40A 受電トランスは、受電系に戻るノイズ対策も考慮して設置されている。

電源の Local Control はタッチパネルから行う。トリガー信号系は、SACLA の RF 系と同じ LVDS を使用している (Figure 7)。電流の基準電圧は、高精度の DAC (AD669) を FPGA から高速でセットし、高精度の DCCT (MACC+) と比較して FET の PWM

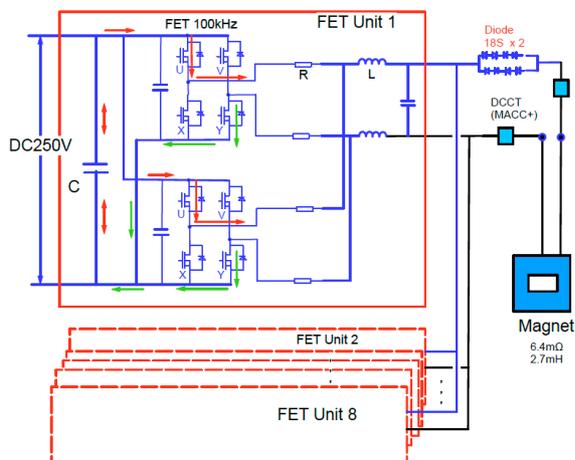


Figure 6: Block diagram of the kicker magnet power supply.

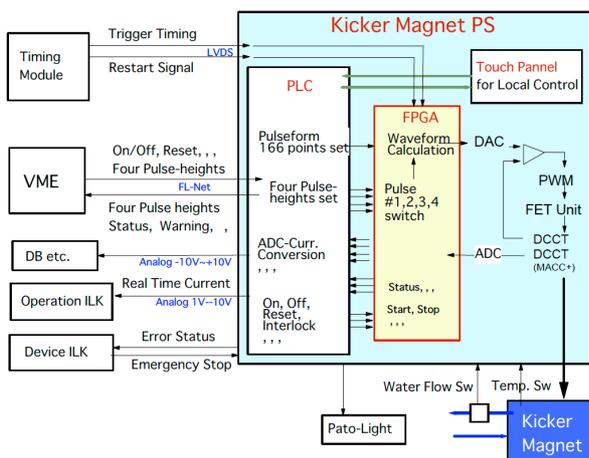


Figure 7: Control and interlock system for the kicker magnet power supply.

を制御している。これらの安定度に影響するアナログ制御回路は、恒温槽に入れて $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以内で温度を安定化している。

4. キッカー電磁石電源の性能検査

4.1 DCCTによる電流測定

電源と電磁石間のケーブルに DCCT (MACC+, TOPACC など)を入れて測定を行った。Figure 8 にキッカー電磁石電源を、272A, 272A, 272A, -272A のパターンで運転した時の測定電流波形を示す (緑色)。この Flat top 部を、DCCT (TOPACC:T06-8, B600)の出力電流の変換電圧 (緑色) から Offset 回路(Lecroy; DA1855A)によって 4.54V を差し引き、0V 付近をオシロスコープ(TDS5104B)で拡大表示したのも Figure 8 に併せて示す (紫色)。紫色の拡大部はリップルの大きさであるが、環境からのノイズも含んでいるため P-P で 0.2mV となり、DCCT のオフセット電圧 4.54V に対して 44ppm と大きい。そのため電池式 Offset-Amp で 10 倍に拡大する回路を作成した (10V 以上に拡大しないように Clipper 回路を入れている)。その結果は Figure 8 の茶色で並記され、ノイズを含めたリップルの大きさは p-p で $1\text{mV}/10 = 0.1\text{mV}$ になり、DCCT の 4.54V に対して 22ppm となる。定格電流の 320A に対しては、19ppm に相当する。

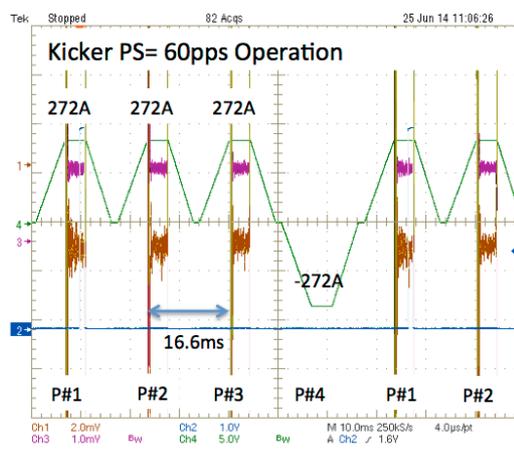


Figure 8: DCCT currents (green), magnified with Lecroy differential circuit (purple line) and battery-based offset amplifier (brown line, amp. factor=10), are shown. Current values of the kicker magnet current pattern are 272A, 272A, 272A, and -272A, respectively.

なお、電源 OFF 時のノイズを Figure 9 に示す。電源 OFF 時のノイズは 0.08mV 程度であった (Figure 9 で見られる大きなノイズは同じ棟内の Klystron の変調電源の PFN コンデンサーの充電およびサイクロンの起動に起因するもので、ビームタイミングとは約 5ms ずれている)。

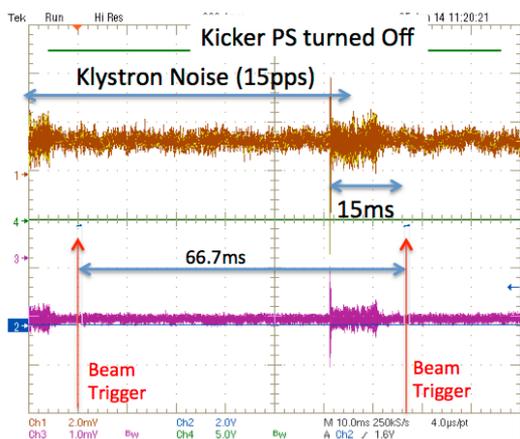


Figure 9: Magnified DCCT voltage with Lecroy differential circuit (purple line) and battery-based offset amplifier (brown line, amp. factor=10) when the kicker power supply turned off.

Klystron 変調電源の充電時以外のビームタイミングにおけるノイズがガウス分布であると仮定し、キッカー電源の電流安定度を、二乗の差の平方根でノイズを差し引き算出すると、キッカー磁石電源電流リップルは定格電流に対して 11ppm (p-p)となる。測定用 DCCT の種類や定格によって、台形電流パターンに依存する 30~100ppm の差異が見られたため、NMR を用いた磁場測定を行い確認した。

4.2 磁場測定による安定度測定

4.2.1 Pickup coil による測定

前項 4.1 の測定では、FET の高周波ノイズを除去するため 100kHz の filter をかけている。実際に高周波成分が影響していないかを、磁石の磁場を Pickup Coil で測定することにより確認した。Figure 10 は、磁石 Gap 中に 21mm 径、20 ターンの pick up コイルを入れ出力電圧を測定したものである(緑色)。

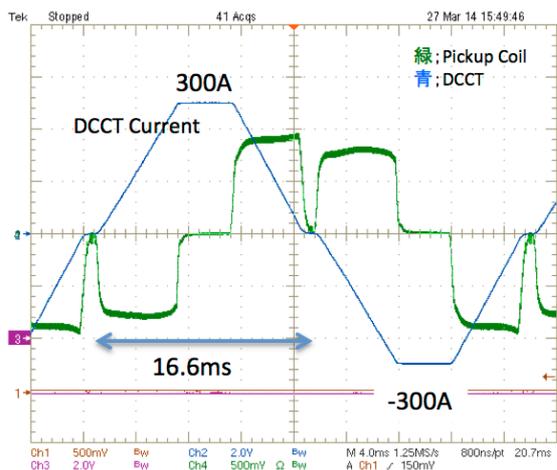


Figure 10: DCCT current (blue line) and pickup coil voltage (green line) in the magnet gap.

電流の立ち上がり、下がり時では 0.75V, -0.8V の電圧が出ている(立ち下がり時間 T5 は 5ms に変更)。この部分を積分して磁場と比較することで校正係数を決め、flat top 部の電圧の積分値から磁場リップルを求める。Figure 10 の flat top 部を拡大したものを Figure 11 に示す。FET Switching 時のノイズが±40mV 以上、それ以外の FET OFF 時の部分では±5mV のノイズが見える(緑色)。なお青線は DCCT の波形であり、いずれも Filter は外してある。この期間の Pickup Coil 電圧を積分すると茶色の線になり、磁場リップルの大きさに相当する。リップルの磁場への寄与は 7ppm 以下であることが確認できた。

なお、加速器のトリガー信号を使い FET Switch が OFF である時刻にビーム時刻を合わせているが、FET の On/Off を制御する FPGA 回路の Clock は十分安定である事も確認された。

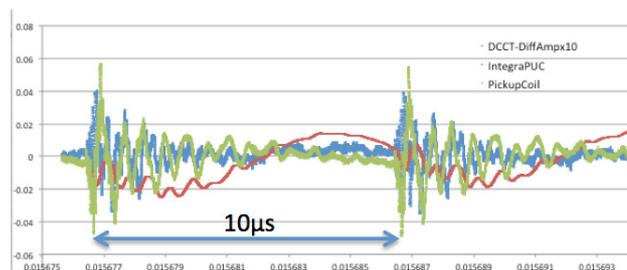


Figure 11: DCCT current (blue line) and pickup coil voltage (green line) in the magnet gap and its integrated voltage (brown line). The FET switching noise can be seen for 10µs. The measured pickup coil voltage integrated for a certain period (0.6ms) corresponds to a magnetic field ripple of less than 0.05gauss (7ppm).

4.2.2 NMR による測定

DCCT の信号には 20ppm 以上のノイズが含まれているが、Pickup coil の測定電圧の積分値から数 10kHz 以上のリップル、ノイズはビームに影響しないであろう事が分かった。更に長時間の安定度を確認するため、NMR を用いた磁場測定を行った。この NMR は、台形で時間変化するパルス磁場に対して、外部からのタイミング信号によって 0.6ms 幅のゲートを設けることでサーチ磁場を制御し、flat top 部の特定の時刻における磁場の測定を可能にしている(エコー電子 kk; EPM-6700SP)。SPring-8 のシンクロトロンでは 1pps の偏向電磁石の磁場を同様の NMR で測定した経験はあったが、60pps, 7kG の磁場の中では金属ケースが使えず編線型のシールドを付けるなど工夫がされた。

サーチ磁場のノコギリ波を 0.6ms の flat top 内に収めることで、NMR 共鳴信号をパルス磁場に対しても長時間安定にロックさせることができています(Figure 12)。



Figure 12: Measured NMR signal at the flat top of the pulsed magnetic field, with an auto-search mode.

Figure 13 は Trigger=60pps (Restart= 15pps)のパターンで、Restart 信号から 10.4ms 後（第 1パルスの Flat Top 部）の磁場を測定しプロットしたものである（Figure 13, 赤）。前半の 3 時間半は連続する 4パルスの波高値パターンを 272A, 0A, 272A, 0A に設定している。初めの 30 分間で 0.4Gauss ほど上昇し、その後ゆっくり下降している(0.25Gauss/2H)ことがわかる。後半は 4つのパルスパターンを 272A, 0A, -0.6A, 0A に変更した後は、投入エネルギーが半分になったためか非常にゆっくりしたドリフトになった。この時、DCCT で測定した電流安定度は 15ppm 内に入っていたので、ドリフトは磁石が要因と考えられる。

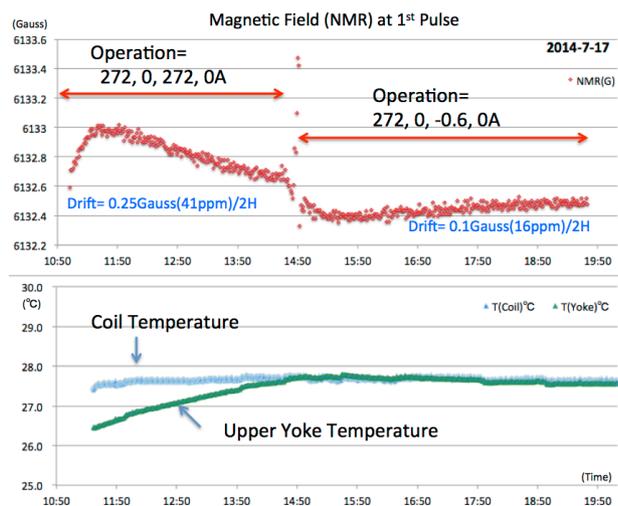


Figure 13: Magnetic field drift of the 1st pulse (272A) measured by using the NMR (red line). Different drift patterns are found in different pulse operating patterns. Magnet yoke (green line) and coil (blue line) temperature drifts are also indicated.

4.2.3 Hall 素子による残留磁場の測定

BL3 方向にビームを通過させるためには、キッカー電磁石磁場が 0 Gauss になっていなければならないが、NMR 装置では 0 Gauss 付近の測定が出来ない。そのため、キッカー電磁石の Gap 内に Hall Gaussmeter (Lakeshore; 460)の Probe を入れて 0 Gauss 付近の測定を行った。パルス磁場を計測しなければ

ならないため、Gaussmeter のアナログモニター出力をオシロで観測した。30kGauss/3V の Range では 10mV 程度の測定精度しか得られないため、6kGauss 付近の磁場に対しては十分な測定精度はなかった。しかし、0 Gauss 付近を 30 Gauss/3V Range にてオシロで測定したところ、10mGauss の測定分解能が得られた。Figure 14 に DCCT(緑)、DCCT と Offset-Amp(紫)、Hall Gaussmeter Analog Monitor(茶)の各波形を示す。

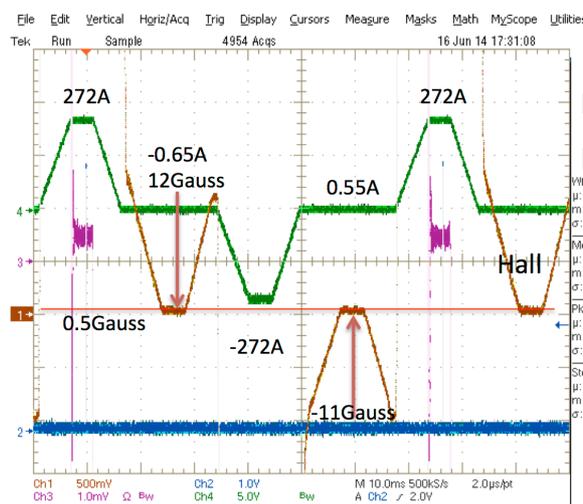


Figure 14: DCCT current (green line), and Hall Gaussmeter monitor voltage (brown line). Remanent magnetic fields (-11G and 12G) are decreased within 0.5G by applying -0.65A and 0.55A correction pulsed currents.

電流は 272A, -0.65A, -272A, +0.55A 通電時のものであり、272A 直後の 0A 時の磁場は 12Gauss, -272A 直後の 0A 時の磁場は 11Gauss あったが、-0.65A, +0.55A のパルス電流を与えることによって 0.5Gauss 以下になっている。

5. まとめ

60pps キッカー電磁石電源を開発し、要求仕様 30 pps (p-p) を満足する電流安定度を確認した。またノイズ環境の中でのリップル電流の確認のために、いくつかの測定方法を試行した結果、PickUp Coil を使うことで磁場リップルが 7~8ppm であることが確認できた。長時間安定度については、外部トリガーに同期させたゲート型 NMR を使うことで特定の時刻の磁場を高精度で測定することができ、0.1 Gauss(16ppm)/2H の安定度を確認した。

電源製作に関して新規の MOS-FET 素子を使ったこと等によって多種の苦労があったが、仕様を満たし、目標値をほぼ満たしたものが完成した。

DCCT の種類や定格によっては、パルス運転パターンの履歴現象と思われる測定電流値の差異が観

測されたが、それは磁石の履歴現象とは別の問題である事が分かった。今後これらの現象を詳細に調べていきたい。

6. 謝辞

今回の高精度パルス電源とパルス磁場測定用 NMR 測定装置の設計、製作に協力頂いた、ニチコン草津工場、エコー電子 kk の関係者に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T.Hara, et al., “Development of the electron bunch distribution system at SACLA”, in this proceedings.
- [2] H.Takebe, et al., “Four quadrant power supply system for SACLA bending magnets”, (MOPS037), Proceedings of the 8th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2011)
- [3] [http://ixapps.ixys.com/DataSheet/DS100409B\(IXFL132N50P3\).pdf](http://ixapps.ixys.com/DataSheet/DS100409B(IXFL132N50P3).pdf).