

TEST OPERATION OF MAGNET POWER SUPPLY AND CONTROL SYSTEM FOR XFEL/SPring-8

Hideki Takebe^{1A)}, Yuji Otake^{A,B)}, Toru Fukui^{A)}, Takuya Otake^{C)}, Yutaka Kano^{B)}, Toru Hara^{A,B)}

^{A)} RIKEN, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo, Hyogo, 679-5148

^{B)} JASRI, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo, Hyogo, 679-5198

^{C)} SPring-8 Service Co. Ltd, 2-23-1 Kouto, Kamigori, Ako, Hyogo, 678-1205

Abstract

The magnet power supplies for the XFEL/SPring-8 have been built and tested at the company's factory, and delivered to SPring-8 in 2009. The required current stability 1×10^{-4} of the power supplies and the other basic characteristics were achieved in the factory test. Further inspections to check the designed current stability, ripple, DAC linearity and control sequences were carried out at the SPring-8 in 2010, and the specifications of the power supplies were consistently confirmed again. Installing the power supplies into 19" EIA racks, and wiring DC power lines to the magnets and AC input power lines are scheduled from August to September in 2010. The final test operations of the power supplies are also scheduled on the same period.

XFEL/SPring-8 電磁石電源の試験と制御

1. はじめに

理化学研究所がSPring-8サイト内に建設しているX線自由電子レーザー施設 (XFEL/SPring-8) の線形加速器棟およびアンジュレータ光源棟において2010年秋からの加速管のエージングに向けて、現在、電磁石、Klystron、Modulator、真空機器、ビームモニター等の据え付けを行っている。電磁石^[1]及びその電源は2009年～2010年に製作が終了し、最終組み込み試験を行っている。

本稿では電磁石電源の性能試験の結果とその制御機器の試験に関して報告する。

2. 電源の仕様と種類

XFEL/SPring-8で使用する偏向、四極、ステアリング、ソレノイドの各電磁石の電源はバイポーラ電源、ユニポーラ電源、及び四象限電源の三種類に分類される^{[2][3]}。表1に示すとおり定格別に合計14種類の電源を用いる。線形加速器棟(Li)と、Matching Section以降の光源棟(MS-Un:BL1とBL3用)の内訳台数も示す。20A以下の小型電源はトランジスタードロップ方式、130A以上の電源、及び±12Aの四象限電源にはFET、IGBTを使ったスイッチング電源方式をとる。

電流安定度の許容値は100ppm P-P (U7のみ10ppm)、リップル許容値は100ppm RMS (U7のみ10ppm)である。偏向電磁石、Magnetic Lens、及び四極電磁石にはユニポーラ型電源を、Steeringと一部の四極電磁石には、バイポーラ型を使用する。ビームバンチ圧縮用などのシケイン部の偏向電磁石4台は1台の電源で直列に通電し、各電磁石に±1Aの補正用

四象限電源が接続される。光源棟のBT3用シケイン部の偏向電磁石4台は直列に130AのU9電源で励磁し、各電磁石には±12Aの補正用四象限電源(Aux2)が接続される。またアンジュレータ光源棟のBeam Lineの切替を行う振り分け電磁石にも300Aの主電源の他に残留磁場調整のための±12Aの四象限電源が接続される。なお昨年の設計からはシケイン部のQ電磁石電源が追加された。

表1：電源定格別種類と台数

ユニポーラ電源	種別	Li	MS-Un	合計
3A, 4V	U1	12	0	12
5A, 5V	U2	16	0	16
11A, 7V	U3	22	54	76
20A, 17V	U5	13	0	13
20A, 42V	U6	2	0	2
130A, 30V	U9	0	1	1
300A, 25V	U7	0	2	2
600A, 58V	U8	0	2	2
バイポーラ電源				
±3A, 4V	B1	62	74	136
±3A, 8V	B2	42	42	84
±10A, 5V	B3	2	0	2
±10A, 10V	B4	2	0	2
四象限電源				
±1A, 10V	AUX1	13	4	17
±12, 10V	AUX2	1	4	5
合計 Ch 数		192	178	370

小型電源は、受電とシャーシを共有化した2電源を1式とし、1枚のカードで制御する。また低コスト化

¹ E-mail: takebe@spring8.or.jp

のため、基本的にローカル操作機能を省きリモート制御のみとするが、iDIOのFPGA機能でDAC設定値をUp/Downさせる簡易型Local Control Systemも利用できる。冷却方式は空冷で、形状はEIA標準ラック組み込み型、1式の大きさは高さ4U~5U,奥行き550mmである。130A, 300Aの中型電源は1電源を1式とし、水冷方式でEIA標準ラック内に収容される。600Aの大型電源は、1電源を1式、水冷式の自立型である。XFEL LINAC棟と光源棟内の電磁石の配置を図1に示す。

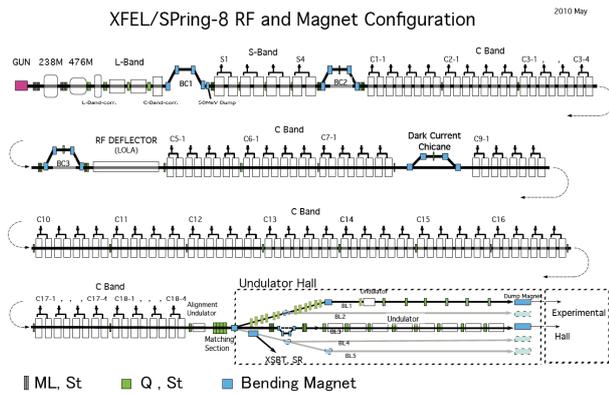


図1：XFELの電磁石の配置

3. 電源の基本性能試験

3.1 製作と試験の状況

電源は2009年8月から2010年7月までに製作され、工場試験の結果は全て仕様値内に入っていた。LINAC用電源はLOCAL制御が無い場合工場試験ではi-DIOを模擬したSwitch-Boxで行うと同時に、I/Fなどの確認試験のために、VME, Opt-CC, i-DIOを接続し簡易プログラムを用いても行った。また各種1台ずつの先行機をSPring-8サイト内に持ち込み、VME, i-DIOを接続し、詳細な制御プログラム開発試験も含めて電源の通電制御試験を行った。

3.2 安定度測定結果

図2にB1-2タイプ一号機をSPring-8 XFEL棟 Klystron Gallery内に持ち込み、実負荷に接続した時の電流安定度を示す。B1-2とはB1電源2台の一式型である。外部に付けた2台の高精度DCCT(HITEC TOPACCシリーズに10ターン巻き; 60A, 10Aで10V出力)の電圧をDMMで60秒毎に12時間計測した。DCCTによる実電流値、及び、環境温度を同時に測定したものである。長時間安定度は 2×10^{-5} 内に入っており、仕様値を十分に満たしている。

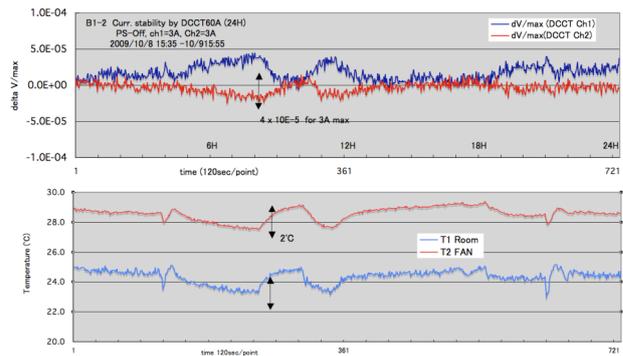


図2：B1の電流安定度と環境温度

この安定度データから環境温度との相関関係を図3に示す。温度係数はch1が $-17 \text{ppm}/^\circ\text{C}$, ch2が $12 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ であった。

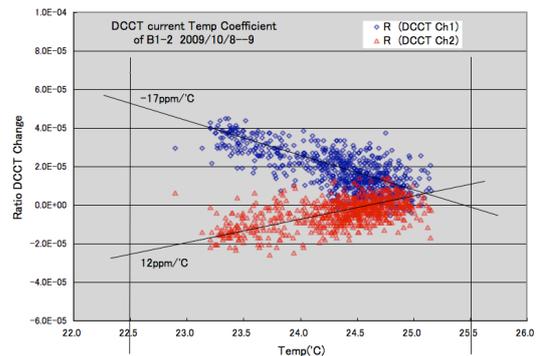


図3：B1電源の電流温度係数

同様にU3タイプ一号機の安定度を図4に示す。高精度DCCTを用いた実電流値、電流モニター値(内部シャントを10Vに増幅)、及び、室温とFAN出口温度を同時に測定したものである。このFAN出口温度と安定度の相関関係を図5に示す。温度係数はDCCT実電流が $-12.6 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ に対して電流モニターが $7.5 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ と小さくなっているのは電流制御用シャントとモニター用シャント及びAMPの温度係数が逆になっている為と考えられる。

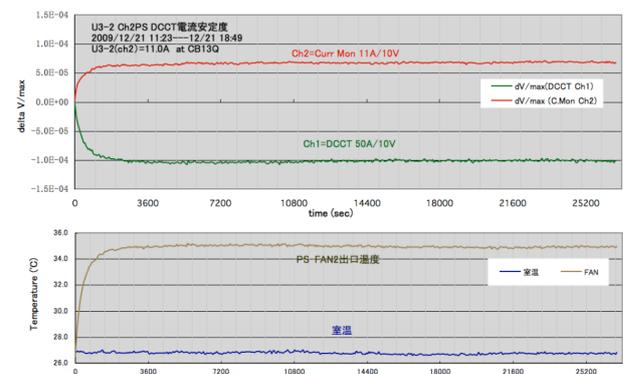


図4：U3の電流安定度

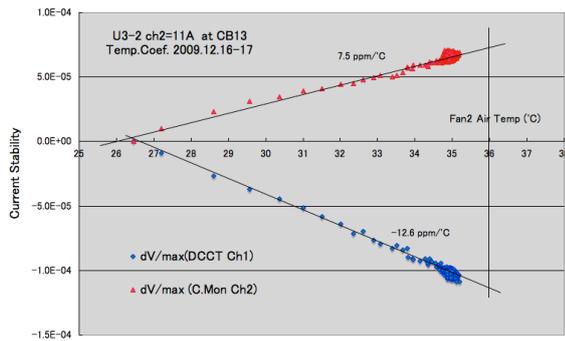


図5：U3の電流温度係数

3.3 2ch収納方式での安定度への影響の測定

一筐体で2台電源を収納した際に他方のチャンネルの電流を変えた時の安定度を調べた。B1-2電源において、Ch2を-3Aから+3Aまで振った時のCh1の電流安定度を図6に示す。DCCTによる実電流は7ppm以内で安定していた。電流モニター出力の変化は20ppmであり仕様値を十分満たす。なお電流モニター出力は 2.4×10^{-4} ほど変化している。

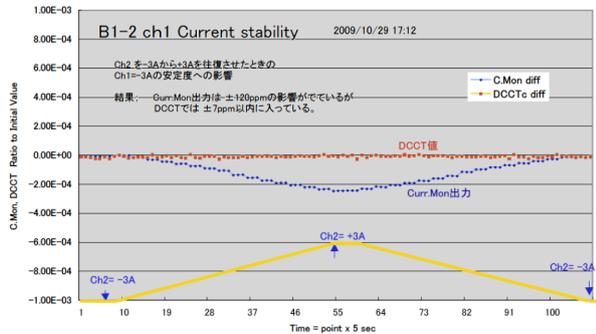


図6：B1-2の2ch間の相互干渉

3.4 DAC設定精度試験

U3電源Ch1 (CB13-QMに接続) にDACの設定を0x (16進) 0000から0xFFFF (0A~11.3A)の範囲で15秒毎に0x1111ずつ変化 (全てのbitが変化) させ、5秒毎に取った電流値 (DCCT, Current monitor) の変化を図7に示す。DAC値は往復して変化させた。

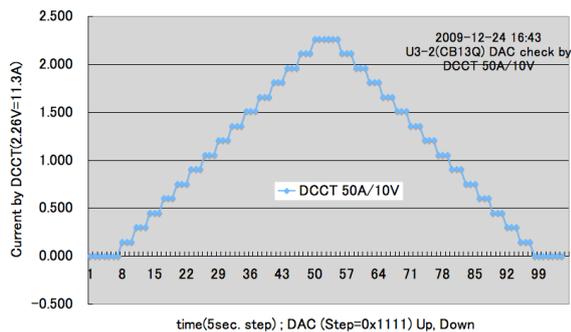


図7：DAC設定に対するDCCT電流値

上記DACの各Step間での電流変化幅のバラツキを図8に示す。その誤差は (11A定格に対して) 9ppmであった。このDACはLinear Technology社のLTC1821であり十分にSpecを満たしている。

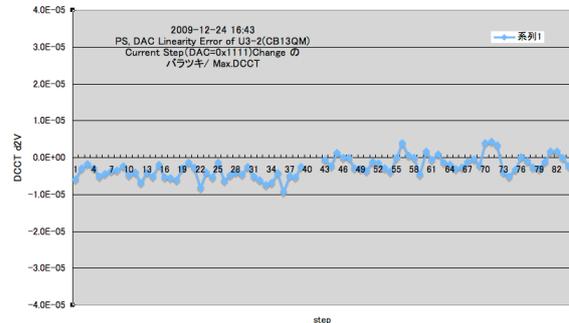


図8：DAC設定に対する各Step間での差異

次にBipolar電源(B1)について0A付近で同様にDAC精度を調査した。DACの値を0x7FF0から1ビットづつ増やして0x8010まで往復して測定し、各Step間の電流変化量を調べた。図9のとおりCurrent Monitorの値では各ビット間のバラツキは±7ppmに入っている。DCCTでの測定は入力がい小さいためにノイズ等が大きくなり特に0A付近(点57:上昇時, 点165:下降時)では±12ppmであった。

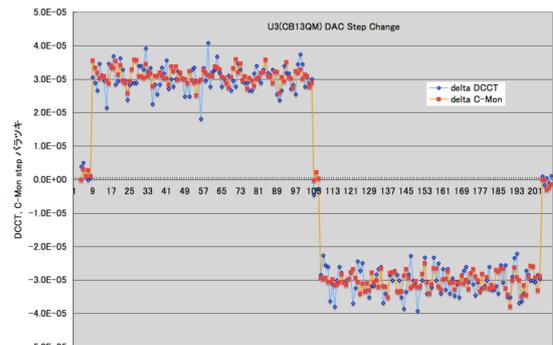


図9：DAC設定に対する各Step間での変化幅 (Bipolar電源。0A付近は点57, 165)

3.5 電流リップル

ビームトンネル内の実際の電磁石に繋いだU3電源の電流を0A, 5.5A, 11Aに設定し、高精度DCCT、Current Monitor (DCCTは50A/10V、Curr.Mon.は11A/10V)の出力をFFT (Ono Sokki CF7200)で測定した。いずれも許容値範囲(10ppm)以内であることを確認できた。Current Monitor出力をFFTの電圧データから電流に換算したグラフを図10に示す。

60Hz, 180Hzのリップルは $-84\text{dBA} = 6 \times 10^{-5} / 11\text{A} = 6\text{ppm}$ 以下である。DCCTに比べてCurrent Monitorが大きいのは観測系に商用周波数ノイズが乗っている可能性がある。

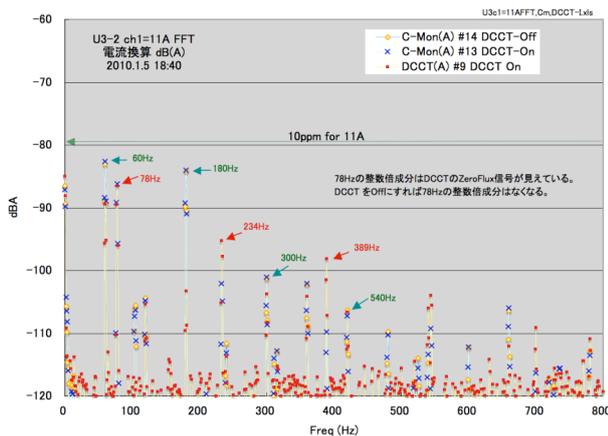


図10：FFTデータ（電流値換算）

またDCCTがONの場合には測定用DCCTがZero-Fluxを作るための信号（78Hzとその三倍、五倍、）がノイズとして見える。DCCT制御回路をOFFにすれば無くなり、電源の性能を示すものではない（黄色丸）。これと比較するためにDCCTの出力電圧波形をオシロで見ると出力は小さすぎて読めないが、電流モニター端子の10V/11Aの出力で数100Hz以下のリップルが $\pm 0.1\text{mV}$ ($\pm 10\text{ppm}$)程度であることを確認した。

4. 電源の制御と試験

電源の遠隔制御には、SPRING-8 LINACやSCSS試験加速器でも実績のあるVME-光IO方式を改良した、i-DIOカード方式を用いる^{[2][3]}。i-DIOカードは電源の裏パネルから実装し光IOカード1枚（入出力点数64bit）で2電源を制御する。i-DIOのFPGAプログラムには以下の三点の機能を持たせている。(1)電流監視データ(ADC)を移動平均を取る機能、(2)電流設定データ(DAC)と電流監視データ(ADC)を常に比較し、それらの差が設定値以上になると偏差異常信号を出し、出力電流を監視する機能、(3)電源のSwitch状態でDACデータを増減させ、簡易的なLocal制御を実現する機能である。

電流Shuntの出力は、電源に組み込んだADCで $250\mu\text{S}$ 毎にSamplingされ1ms周期でi-DIOにデータを渡し、FPGAのProgramで4～128回の移動平均化処理をした後DACの値と比較される。比較結果が偏差規定値を超えると、DO経由で電源に異常信号を渡す。平均回数、偏差規定値は上位計算機から予め設定できるようになっている。

なお電源のADC、DACはともに定格電流値にて0xF800に設定される。従って最大電流は0xFFFFで定格の103.3% (Bipolarは106.6%)になる。

4.1 ADC移動平均機能

B2電源に3A通電して、i-DIOでの電流モニターADC値の移動平均の効果を測定した。ADC移動平均回数パラメータを16, 32, 64, 256, 1024 に変えて500

回取ったデータのばらつきを図11に示す。i-DIOのDIの1回のデータ取り込みがこのとき $50\mu\text{s}$ になっているので各パラメータでの時間は0.8, 1.6, 3.2, 12.8, 50.2msであり、移動平均として電源IFからの回数は1, 2, 3, 12, 50回に相当する。この測定では移動平均回数=1回で 3×10^{-4} 、12回の平均の場合では 3×10^{-5} 以内の精度で監視ができています（標準偏差はそれぞれ 1.2×10^{-4} 、 2.3×10^{-5} であった）。このADCはLinear Technology社LTC1605であり、Samplingは商用電源周波数に同期させている。

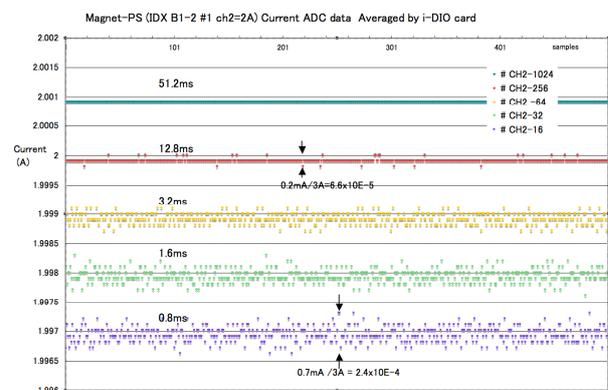


図11：電流値ADCデータの移動平均数による違い

4.2 電流自己監視システム

B2, U1, U5などの小型電源の先行機で前述のi-DIOによる電流値ADC監視システムの試験を行った。ADC平均回数、DACとの偏差規定値を上位計算機から設定出来ることを確認した。DACとADCの比較結果が偏差規定値0.1%を超えると、DO経由で電源に異常信号を渡し、なおかつ、i-DIOのレジスタに異常回数を記録する。8時間以上の試験でそのADC値が安定で、異常回数が増加しないことを確認した。これにより、定常運転時には $\pm 0.1\%$ で電流値異常を監視して数十ms以内で機器保護インターロックシステムに異常アラームを上げてビーム入射を即座に停止する方式が可能であると考えられる。なおビームルートなどを規定する大型電源にはADCやi-DIOを利用しないハードウェアでの電流監視回路も内蔵する（図12）。

4.3 電源のローカル制御

中型以上の電源については、電源のフロントパネルのSwitchからi-DIOのDIとFPGAを利用してあるStep幅でDACの値をUp/Downさせて電流をローカルで制御できる。このStep幅は基盤上のDIP SWにて4種の値を選択できる（この機能はi-DIOカードの上位Masterカードとの接続が無い場合でも実現する）。

光源棟に設置する小型電源ではフロントパネルのSwitchスペースを節約し、フロントのコネクタからSwitch Boxを接続してローカル制御が出来る（図13）。これらの電源でON, OFF, Reset, 電流Up/Downの制御が出来ることを確認した。

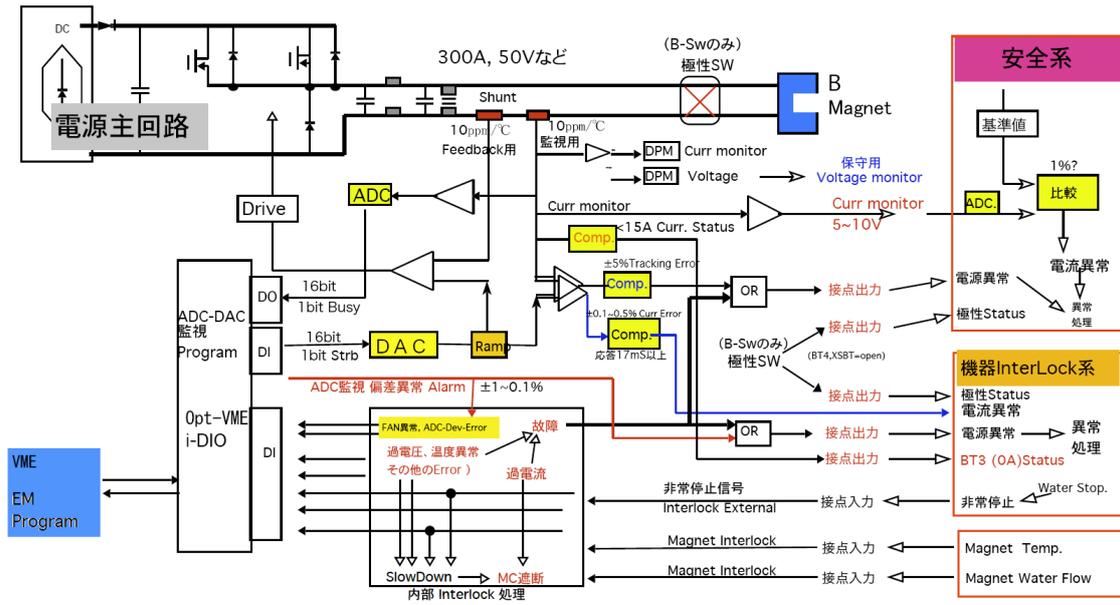


図12：大型電源の電流制御と自己監視のBlock図。



図13: Local Control Boxを繋いだ光源棟用小型電源

5. まとめ

2009年夏の線形加速器用の電源 8 種類の完成に続き、光源棟の小型電源 8 種類が2010年春に完成し詳細な試験を行って来た。また600Aの大型電源は6m長のダンプ磁石の製作工場に持ち込んで磁場測定を兼ねた通電試験を行った。電流安定度などで十分な性能が得られ、電流監視の精度については、i-DIOを用いても10E-4の精度が得られた。今後他の機器も組み合わせたノイズ試験などを行う予定である。2010年7月には大半の電源がラックに納入され、配線工事など最終調整と準備を進めている。

電源の製作、配線工事は複数のメーカーが行っており、部品の共通は出来なかったが、I/Fの統一化を計ることで、ユニットの入れ替えが出来る様に

した。今後大量台数の電源制御するためのさらなる制御プログラムの試験と開発を行ってゆく。

6. 謝辞

i-DIOの開発と資料作成に際し多大なご協力を頂いた日立造船(Hitachi)の方々、電源の製作をお願いした三菱電機特機、株式会社IDX、工藤電機KKの方々に深い感謝の意をここに表明します。

参考文献

- [1] Kano, et al., "XFEL Electro-Magnets and Their Excitation Characteristics", in this proceedings.
- [2] H.Takebe, et al., "Power supply Design for the XFEL/SPring-8 Magnet", (FP51) Proceedings of the 4th Accelerator Symposium in Japan, Wako, Aug. 3, 2007
- [3] H.Takebe, et al., "Power Supply System for the XFEL/SPring-8 Magnet", (TPMGA02) Proceedings of the 6th Accelerator Symposium in Japan, Tokai, Aug. 6, 2009
- [4] H.Takebe, et al., "Power Supply Control System for the XFEL/SPring-8 Magnets", (TUP067), Proceedings of the 6th ICALEPCS'09 in Japan, Kobe Oct. 13, 2009