

電磁石用高精度電源に向けたデジタル制御システムの開発

DIGITAL FEEDBACK SYSTEM FOR HIGH PRECISION MAGNET POWER SUPPLY

近藤 力^{A, B)}、福井 達^{A)}、佐治 超爾^{A, B)}、中澤 伸侯^{C)}、深見 健司^{A, B)}、稲垣 隆宏^{A)}、渡部 貴宏^{A, B)}、
高野史郎^{A, B)}、田中 均^{A)}、鈴木 幸雄^{D)}、佐々木伸一^{D)}、寿田 一男^{D)}、片倉 直哉^{E)}、進藤 勉^{E)}
Chikara Kondo^{A, B)}, Toru Fukui^{A, B)}, Choji Saji^{A, B)}, Shingo Nakazawa^{C)}, Kenji Fukami^{A, B)}, Takahiro Inagaki^{A)},
Takahiro Watanabe^{A, B)}, Shiro Takano^{A, B)}, Hitoshi Tanaka^{A)}, Yukio Suzuki^{D)}, Shinichi Sasaki^{D)}, Kazuo Suda^{D)},
Naoya Katakura^{E)}, Tsutomu Shindo^{E)}

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

^{D)}Kudo electric Co., Ltd., ^{E)}Ohkura Electric Co., Ltd.

Abstract

Next-generation synchrotron radiation facilities require various and lots of magnet power supplies with high stability. In order to provide many power supplies with a reasonably low cost in a short production period, we developed a common output current control system using a digital feedback control technology. The system consists of a high-precision analog-digital converter (ADC) circuit and a field programmable gate array (FPGA). FPGA includes a proportional-integral (PI) control logic and a digital pulse width modulation (PWM) function. We first developed the highly accurate ADC circuit of which accuracy is less than 10 ppm (pk-pk). Then we prototyped a DC power supply equipped with the above digital feedback control system. We finally confirmed that the current fluctuation can be suppressed to less than 10 ppm (pk-pk).

1. はじめに

放射光リングでは、ビームの安定性は、電磁石の磁場安定度に強く影響されるため、電磁石電源の出力電流には非常に高い精度や安定度が要求される。従来の電磁石電源では、アナログ技術を用いたフィードバック回路により、高精度が為されてきた。このような電源では、耐ノイズ性や IC 特性を考慮した回路設計、完成後の精密な調整が必要で、回路修正時にはパターン改修などが必要となり、開発には多くのコストや期間が費やされてきている。放射光リングは、多くの電磁石に合わせた多種類の電源が用いられるため、電磁石電源の開発コストは膨大となる。このため、次世代放射光リングでの電源開発では、高精度の要求と、コストや開発期間の抑制を両立する必要がある。

このような要求に対し、我々は、デジタル制御を用いた、統一的なフィードバック制御システムを導入することとした。この制御システムでは、高精度の AD 回路を標準回路として導入し、電源の安定度を容易に引き出すことができる。また、デジタル処理を FPGA で行うことで、動作や構成を容易に変更できるようにしている。このようにして、多様な電源に対応した制御システムを、短期かつ低コストで開発できる。

本発表では、開発したデジタル制御システムの概要と構成についての詳細を述べ、更にデジタル制御システムを用いた電磁石用電源を製作し出力試験を行い 10ppm 以下の高精度制御を実証した測定結果を示す。

2. デジタル制御電源の概要

2.1 全体構成

Figure 1 に、システムの概要ブロック図を示す。この制

御システムは、電流測定用の DCCT とアナログ-デジタル変換回路(AD 回路) と、FPGA 内でのフィードバック制御回路(FB 回路) で構成され、電流フィードバック制御として機能する。それを様々な主回路(電力回路)や、動作制御回路と組み合わせることで、一つの電源として動作するようになる。この方式は、スイス SRS の方式[1]に似ているが、我々の方式では AD 回路などをより簡易化し、また FPGA 周辺回路を電源仕様に合わせて設計することで、より汎用性を高めている。

AD 回路は、DCCT のアナログ信号をデジタル信号化し、FB 回路へ出力するが、この AD 変換時の測定精度が、電源全体の電流精度を決定づけるため、本システム標準となる高精度 AD 回路を新たに開発し、精度の安定化を図った。

FB 回路は、FPGA 内で構築され、電流誤差、PI(Proportional-Integral)制御、PWM 出力までを、デジタ

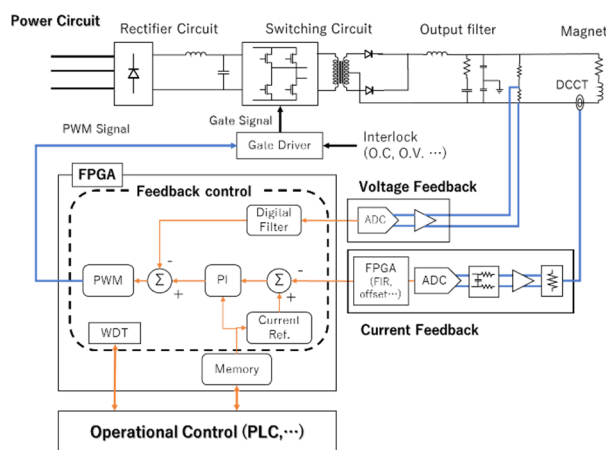


Figure 1: Block diagram of power supply with digital feedback control system.

ckondo@spring8.or.jp

ル処理で行うもので、一般的にはフルデジタル制御と呼ばれる方式とした。FB 制御を FPGA 内にて一括で行うことで、アナログ回路を削減でき、環境ノイズや温度依存性の影響を抑えることができる。また、制御構成では、PI 制御と PWM 制御という、一般的かつシンプルな構成にすることで、既存の電源システムへ適用し易くし、かつアナログ制御の技術者が理解を容易にしている。

この制御システムは、FB 制御回路として、様々なスイッチング電源に組み込んで使用する。この時、電源毎の構成や動作の違いを、FB 回路の HDL コードを部分的に書き換えることで対応できるため、汎用的なシステムになり得る。

2.2 電流測定回路(DCCT, AD 回路)

電流検出回路は、出力電流を 10ppm 以下の高精度で測定し、デジタル信号に変換後にデータを 100kHz のレートで出力する。AD 回路の主な仕様を Table 1 に示す。

電流検出器には、測定精度や絶縁特性を考慮し、シャント抵抗ではなく DCCT を用いるものとした。今回、10~200A まで電流測定にはソフトエナジー社の UP-200A を選定した[2]。この DCCT は、高性能の割に安価で、かつ変調周波数が 50kHz 以上のため、低周波領域のフィードバック特性が重要な電源への利用に適している。ただし、長期安定性が重視される場合や、200A 以上の大電流の電源では、コストが高くなるが、Danisense 社の DS200 または DS600[3]の使用を考えている。

開発した AD 回路(Fig. 2)では、DCCT の電流出力をバーデン抵抗で受けて電圧変換し、完全差動アンプ、アンチエイリアジングフィルタを通り、24bit ADC(LTC2380-24[4])にてデジタル信号に変換される。この ADC は逐次変換型で、高精度かつ高速な変換が可能のため、応答性の低い Δ - Σ 型 ADC よりも、高速なフィードバック制御に有利である。AD 回路内の FPGA では、デジタル変換された信号に対して FIR(Finite Impulse Response)フィルタによる高周波ノイズの除去と、オフセット校正が行なわれる。FIR フィルタは、比較的大きな論理容量と、FIR タップ数に応じた遅延が発生するが、応答が安定的なため、調整し易い利点があるので採用した。オフセット校正後の信号は、SPI 形式で、100kHz のレートで出力される。伝送信号は RS-485 の差動伝送としている。なお、長距離伝送時などのノイズ環境下での使用を想定し、信号に

Table 1: Specifications of ADC Circuit

DCCT	UP200A for 10-200 A DS600 for 200-600A
Resolution	24 bit
Anti-aliasing Filter	20 kHz
Digital Filter	FIR
Data Output Rate	100 kHz
Output Data Interface	RS-485, SPI Master
Power Supply	± 18 -24V, +5V

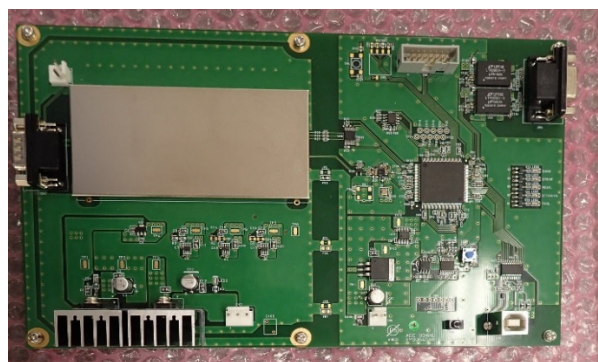


Figure 2: ADC circuit board.

は 24bit のデータ信号のほかに、エラー検出用に 3bit のパリティビットが付いている。

この AD 回路では、高精度な AD 変換を追求するため、アナログ部とデジタル部の GND パターンを分離によるノイズ混入の防止や、金属ケースを用いた電磁ノイズの遮断などの工夫を施している。また、基板背面を水冷板などに接触させ、温度安定化を行うことも可能な設計としている。供給電源には、 ± 18 ~24V と +5V が必要で、いずれもドロップパー式の低ノイズ電源を用いている。

2.3 フィードバック制御回路(FB 回路)

FB 回路の演算処理構成は、Fig.1 に示しているとおり、AD 回路からのデータ受信から、フィルタ機能、誤差検出、PI 制御、PWM 制御の信号出力まで、全てを FPGA 内で処理している。また、出力電圧に対するフィードバックもオプションとして使用できるよう受け口を用意している。

フィードバック制御には、一般的な PI 制御を用いている。PI 制御は、パラメーターも比例ゲインと積分ゲインの 2 つで、調整が容易である。これらのパラメーターは、外部から変更できるものとしており、調整作業を簡便化している。

これらの演算処理は、個々の処理を、各々 IP コアを用いてモジュール化した構成としている。このため、処理の一部を変更、あるいは追加する場合は、個別に IP コアを変更、追加することで、容易に改造できる。また、内部構成が明確となり、多様な電源への改造を容易としている。

なお、今回は FPGA に Xilinx の Zynq-7020[5]を用いて、後述の試験用電源を製作している。このとき、FPGA に載っている CPU を用いて、動作制御回路(PLC)との通信やインターロック処理など、補助的な機能を実現した。ただし、この機能は、使用する FPGA や動作制御回路に合わせて変更するものとしている。

Table 2: Specifications of the Digital Feedback System

FPGA Core	Zynq 7020 (Xilinx)
Development Tool	Vivado
Operation Clock	200 MHz
Switching Frequency	≤ 100 kHz
Current Ripple (DC-1kHz)	< 2mA pk-pk (10 ppm)
Long-term Stability	< 2mA/8hour

2.4 電力回路と動作制御回路

FB 回路は、スイッチング回路と Gate 回路を介して接続され、PWM により電流制御をする。この Gate 回路には、ワードワイヤーで動作するインターロック機能が組み込まれ、安全を担保している。

動作制御回路は、電源の動作やインターロック処理、操作、外部通信を受け持ち、また FB 回路との通信制御も担う。この回路は、PLC やマイコンなどが利用でき、それに応じて、FB 回路間の通信方式を変更する。なお、FB 回路とはウォッチドッグ機能(WDT)で相互に動作を監視しており、どちらかの不具合が発生した場合は、出力が停止される。

3. AD 回路の精度測定

開発した AD 回路の測定精度を確認するため、5V_{DC} の高精度信号源を製作した。これを用いて、測定した結果を Fig. 3 に示す。また、測定データを、オフライン解析で DC-1kHz の帯域に絞ったところ、そのバラツキは約 8.4 ppm(6σ)であった。これより、高精度の AD 変換が可能であることを確認した。また、48 時間の長時間測定では、測定値の変動は、初期のドリフトを除くと、3 ppm 以下であることを確認した。

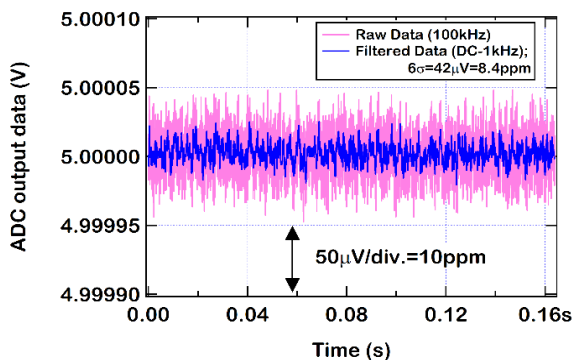


Figure 3: ADC raw data (pink line) measuring the output of highly accurate 5 V_{DC} source, and FIR filtered data (blue line) with bandwidth frequency between DC to 1kHz.

4. 試験電源

4.1 電源構成

開発した、AD 回路とデジタル制御システムを用いて、出力電流の高精度、高安定度を実証するため、200A 30V ユニポーラー出力の電磁石用電源を製作した。電源の主要な仕様は、Table 3 に示す。構成は、電力ユニットと、制御ユニットに分かれている。電力部は、Fig. 1 に示す通り、一般的な絶縁型のスイッチング DC 電源で、フルブリッジ回路による 40kHz の高周波スイッチングを行い、トランスで電圧変換することで、低電圧大電流を出力する。電流リップルを 10 ppm (pk-pk)以下に抑えるため、DC 整流部では三相整流と高 LC 積のフィルタにより、AC ラインの変動を抑えている。また、40 kHz の高周波スウィ

Table 3: Specifications of Magnet Power Supply

Load Magnet Impedance	34mΩ, (1 mH@1kHz)
Input Power	3Φ-200 V _{AC}
Output Voltage	30 V max.
Output Current	200 A max.
Switching Frequency	40 kHz

ッチングとすることで、出力フィルタのカットオフを 1kHz 程度と比較的高く設定し、残留する AC リップルをフィードバック制御で抑制できるものとした。

この試験電源を用いて、出力の電流リップル測定と長時間安定度測定を行った。試験電源と測定風景を Fig. 4 に示す。このとき、出力電流の測定は、電源のフィードバック制御用とは別の測定用 DCCT を用いており、リップル測定では DS600 を、また長期安定度測定では HITEC の DCCT を使用した。

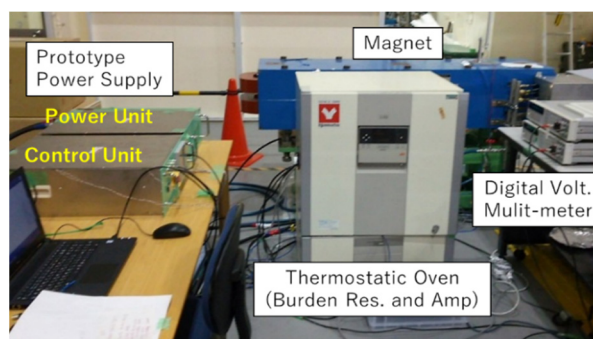


Figure 4: Magnet power supply with digital feedback system at a test bench.

4.2 リップル測定

定格 200A 出力時の電流リップルを、FFT アナライザによるスペクトルを Fig. 5 に示す。1Hz-10kHz の全帯域でのリップルの大きさは 2 ppm(pk-pk)以下であり、当初の

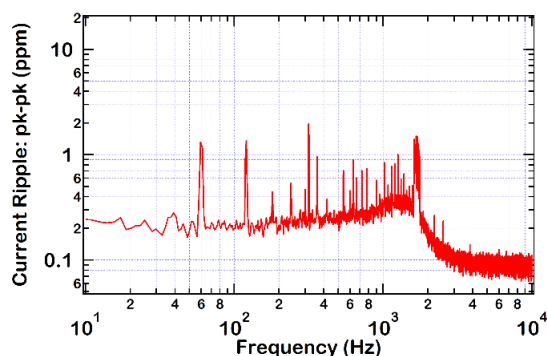


Figure 5: FFT amplitude of output current of a test power supply. The operation condition was 200 A rated operation.

目標である 10ppm(pk-pk)の目標を達成していることを確認した。これにより、今回開発したデジタル制御システムにて、高精度の電流制御が可能であることを実証した。

4.3 長時間安定度

200A 出力にて長時間運転を行い、出力安定度を測定した。このとき、測定用 DCCT(HITEC)は、バーデン抵抗やアンプ回路を恒温槽に入れて、0.5°C以内に温度変動を安定化して、温度依存性を抑えている。

Figure 6 に、約 20 時間連続運転したときの出力電流(赤線)と大気温度(青線)のトレンドを示す。出力変動は、2 mA(10 ppm)以下で 20 時間以上、安定的に動作することを確認した。このとき約 30 分周期で、約 3ppm の電流変動が見られ、実験室の大気温度の変動(約 1°C)に同期していた。これは、電力ユニット内に設置している、FB 制御用の DCCT(UP-200A)のヘッドが非温調であるため、この温度依存性によるものと推定される。

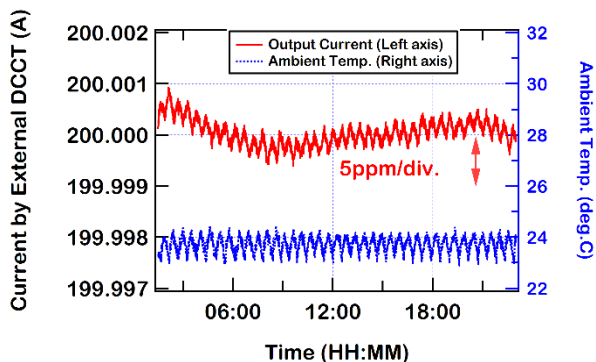


Figure 6: Long term stability of output current (red), and measured ambient temperature (blue) with 20 hours operation.

5. まとめと今後

我々は、次世代放射光の高精度電磁石電源に活用できる、デジタル制御システムの開発を行った。本システムは、高精度 AD 回路と、FPGA による PI 制御および PWM 出力を行う。AD 回路は、9ppm 以下の高い測定精度を達成し、これを組み込んだ 200A の電磁石電源では、電流リップルは 2 ppm(pk-pk, DC-10kHz)以下を達成した。また、電流安定度は、約 20 時間で 10 ppm 以下であった。

今後、この制御システムを多くの電源メーカーに提供し、様々な電磁石電源を開発することで、その有用性の実証と、次世代放射光に向けた電源開発体制を確立していく。

謝辞

本システムの開発にあたり、J-Parc の栗本氏には開発例やアドバイスなどの有用な情報を多く頂き、大変感謝いたします。また、AD 回路の開発では大倉電気株式会社の、またソースコードや電源開発では工藤電機株式会社の、各技術陣に大変尽力して頂き、感謝致します。最

後に、電源の試験では、スプリングエイトサービスの運転員のサポートをして頂き、感謝致します。

参考文献

- [1] L. Tanner *et al.*, “DIGITAL CONTROL FOR HIGHEST PRECISION ACCELERATOR POWER SUPPLIES”, PAC2001, (2001).
- [2] <http://www.softenergy-controls.co.jp/product/sensor.html>
- [3] <http://www.danisense.com/images/pdf/0-600A/DS200ID.pdf>
- [4] <http://www.analog.com/jp/products/ltc2380-24.html>
- [5] <https://japan.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/zynq-7000.html>