

KEK 入射器における EPICS EPID を利用した電磁石電源用フィードバック制御システム

DEVELOPMENT OF A FEEDBACK CONTROL SYSTEM FOR MAGNET POWER SUPPLIES USING EPICS EPID AT KEK INJECTOR LINAC.

草野史郎^{#, A)}, 佐藤政則^{B)}, 諏訪田 剛^{B)}, 佐藤 政則^{B)}, 肥後 寿泰^{B)}, 横山 和枝^{B)}
Shiro Kusano^{#, A)}, Tsuyoshi Suwada^{B)}, Masanori Satoh^{B)}, Toshiyasu Higo^{B)}, Kazue Yokoyama^{B)}

^{A)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

^{B)} KEK, Accelerator Laboratory/SOKENDAI, Department of Accelerator Science

Abstract

The KEK injector linac provides the electron and positron beams of different energies for the PF, PF-AR and KEKB rings. Towards SuperKEKB project, the new quadrupole magnets and power supplies have been installed in the positron capture beam line. We have a plant to control the new power supplies with a constant voltage control mode since they show the current oscillation under a constant current control mode. For this purpose, a new power supply control IOC using EPICS EPID record is developed for the PID feedback control. In this paper, we report the new power supply control IOC and its test result in detail.

1. はじめに

KEK 入射器 (入射器) は、4 つの異なるリング (KEKB HER/LER、PF、PF-AR) へ電子および陽電子ビームを安定に供給してきた。現在、入射器では、SuperKEKB に向けた機器の増強および更新が進められている。SuperKEKB 主リングへの入射ビームは、KEKB と比較して約 5 倍のバンチ電荷量かつ 1 桁以上小さいエミッタンスが要求される。陽電子ビーム増強のため、陽電子生成標的部下流のビームラインにおいて、電磁石および電源の増強をおこなった。しかしながら、今回導入した電源は定電流制御が困難であったため、定電圧制御での運転を検討している。定電圧制御においては、コイルの温度変化に起因する抵抗値変化、ひいては電流変化が生じる。コイルに流れる電流値を一定に保つため、Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) Enhanced version of the EPICS PID record (EPID) を利用したフィードバックシステムの構築をおこなった。本稿では、電磁石電源定電圧制御における電流安定化を目的としたフィードバックシステムについて詳述する。

2. 電磁石制御システム

2.1 概要

Figure 1 に、入射器における電磁石制御システムの構成を示す。電磁石制御システムは、複数の Linux 計算機によるデバイスサーバ部、PLC によるローカル制御機器部、およびオペレーターインターフェイス部の 3 階層から構成されている。クライアントおよびサーバ間の通信には、Remote Procedure Call (RPC) を基盤とした独自開発の制御ソフトウェア

が用いられてきた。近年、入射器では、豊富なライブラリ群が使用可能であり、ソフトウェア開発の容易さから、EPICS を基盤とした制御ソフトウェアへの移行を進めている。

EPICS Input Output Controller (IOC) 上で動作している Asynchronous Driver Support (Asyn) は、C 言語で記述された RPC ライブラリを用いて電磁石デバイスサーバに接続し、電磁石電源を制御している。読み出しに関しては、ネットワークおよびローカル制御機器の負荷を軽減するため、キャッシュサーバ・レシーバの仕組みを利用している。これは、Linux サーバ計算機上の共有メモリにキャッシュ情報を展開し、上位アプリケーションはキャッシュ情報のみを参照する方法である^[1]。

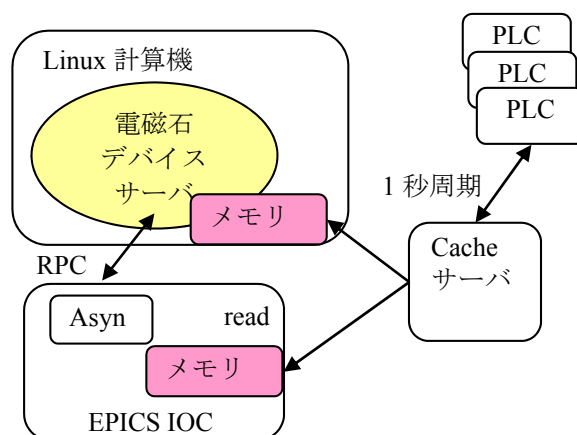


Figure 1: Schematic drawing of the magnet control system.

2.2 新電磁石用制御システム

入射器では、SuperKEKB に向けた新陽電子ビームラインのために、約 100 台の電磁石および電源の設

[#] skusa@post.kek.jp

置をおこなった。同時に、それらの電源制御用 EPICS IOC を新たに開発した。新電磁石電源は、リモート制御用のネットワークインターフェースを有しており、計測機器制御用のインターフェース規格である LAN eXtensions for Instrumentation (LXI)を用いた制御が可能である。新制御システムでは、LXI を介し直接ネットワークで制御する方式を採用した。計画当初は、定電流制御で電磁石電源を制御することを検討していたが、今回導入した電源の特性では、低い電流設定値においては電流が発振することがわかり、定電流制御によるビーム制御が困難であることがわかった。Figure 2 に、発振が発生したときの測定電圧および電流値を示す。CH1(黄線)が電流波形、CH2(青線)が電圧波形を示している。そのため、本電源の制御には定電圧制御を用いることにした。

しかしながら、定電圧制御においては、コイルの温度変化に起因する電流変化が懸念されるため、電流値を一定に保つためのフィードバック制御が必要となる。そのため、PID 制御を用いた電磁石電源制御用 EPICS IOC を開発した。本 IOC は、Asyn、StreamDevice、および EPID の各ドライバサポートを用いて構築した。Asyn ドライバは、ANL で開発されており、多くの計測機器に利用されている VXI-11 プロトコルもサポートしている。StreamDevice ドライバは、PSI で開発され、主に GPIB およびシリアル機器の制御に利用されている。EPID ドライバは、ANL で開発されており、EPICS PID レコードを拡張したものである。フィードバックの高速化およびレコードフィールドの簡素化などの点において改善が見られる。

PID レコードでは、モニタするレコード (INP フィールド) を電源の電流値、制御対象機器 (OUTL フィールド) を電源の電圧設定値として使用する。PID の制御間隔は、電源ネットワークインターフェース部および電源内部 CPU 間の通信が 0.1 秒間隔であるため、PID 制御コマンドとの衝突を回避するため 0.2 秒を設定している。

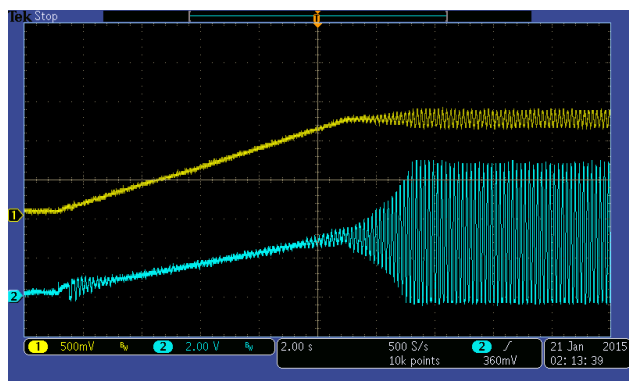


Figure 2: Current oscillation of magnet power supply.

2.2.1 PID パラメタの最適化

電磁石電源の電圧設定を PID 制御でおこなうためには、磁場のヒステリシスを考慮し、電流のオーバーシュートを避けるようなパラメタ最適化が必要である。PID レコードの PID 制御パラメタには、比

例定数(K_p)と積分定数(K_I)と微分定数(K_D)が用意されている。本システムにおいては、PID レコードのマニュアルに従って以下のような手順で PID パラメタを決定した。

1. フィードバックを OFF にする。
2. K_p の最適値を決めるために、 K_I と K_D をゼロに設定する。
3. 制御機器の変化量の 10%~20%を K_p に設定する。
4. フィードバックを ON にし、設定値と K_p 値を変えながらシステムの振動がなくなるまで K_p を調整する。
5. システムのオーバーシュートや振動が無く、フィードバック値まで速く応答するように K_I を調整する。

上記の手順にしたがって調整した時の、電流の読み返し値と PID 制御をおこなわなかった時の、電流の読み返し値を Figure 3 に示す。PID 制御をおこなわないと次第に電流値が変化していることがわかる。

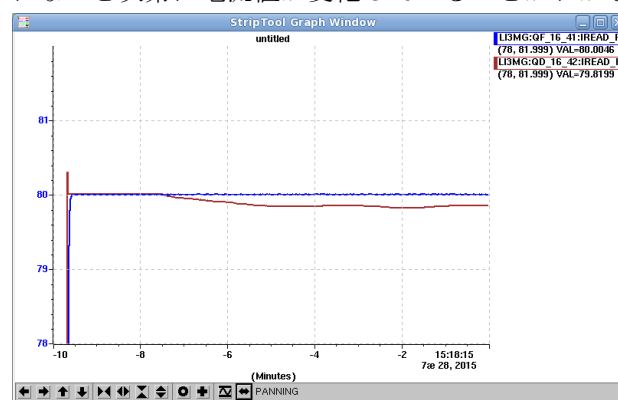


Figure 3: Trend graph data example of the current (red) readback value without PID and current (blue) readback value during PID parameter optimization.

3. 問題点

3.1 mDNS パケットの輻輳

導入当初、1 台での受け入れ試験をおこなっていたが、通信不良などの不具合は発生しなかった。しかしながら、約 100 台をクライストロンギャラリーに設置し、同時に通信試験をおこなったところ、ネットワーク通信が不安定になる障害が多発した。入射器制御ネットワーク上の通信パケットを解析したところ、LXI プロトコルを送信する機器が同一ネットワーク上に接続されている場合、multicast DNS (mDNS)クエリーパケットを送信する機器に対して電源が応答し、さらに電源自身が送信した応答パケットに対しても再び応答することにより、大量のパケットが雪崩的に送信されていることが判明した。Figure 4 に、障害発生時の入射器制御ネットワークにおけるパケット数の変化を示す。本図の中で、青線は入射器制御ネットワークにおける mDNS パケットの総数を表し、赤線は特定の PC から送信された mDNS クエリーパケットの数を表している。

特定の PC から数個の mDNS パケットが送出された直後、約 100 台の電磁石電源より応答パケットが合計 200 個程度送信されている。

これらの対処として、入射器制御ネットワーク上に mDNS パケットが多く流れないようにコアスイッチの設定変更をおこなった。コアスイッチの設定変更により、エッジスイッチ間では mDNS パケットが流れないため、入射器ネットワーク全体としては mDNS パケット量の低減が図られた。その後、電源のファームウェア更新により mDNS パケットの輻輳問題は解消された。

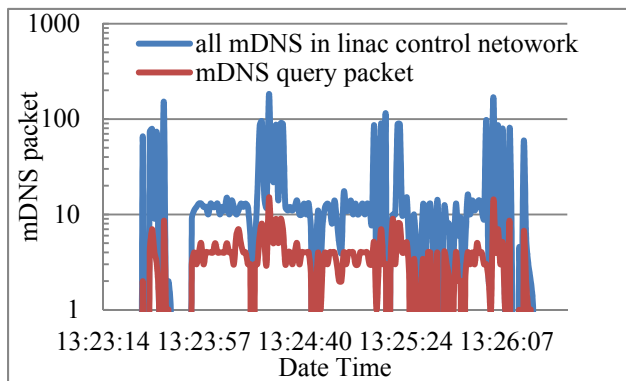


Figure 4: Number of packet in the linac control network.

3.2 ネットワーク通信不良

PID 制御の試験中、電流および電圧の読み返し値が突然乱れる現象が観測された。Figure 5 に、障害発生時の電源電流および電圧の読み返し値を示す。本図において、左縦軸は読み返し電流値（青実線）、右縦軸は設定電圧値（赤実線）を示している。また、横軸は時間を示している。

本図より、約 1 分 30 秒間で 2 回電流値が乱れていることが見て取れる。それにともない、設定電圧値が変化していることがわかる。何らかの原因で電流値が乱れていると思われたが、測定データを詳しく解析したところ、ファームウェアの不具合により、電圧設定値に意図しない値が設定されていたことが判明した。その対策として、電源のネットワークインターフェースが外部コマンドを受信した後、内部 CPU との通信を開始する前に短い待ち時間を設けるようなファームウェア改良をおこなった。これにより、本障害は解消された。

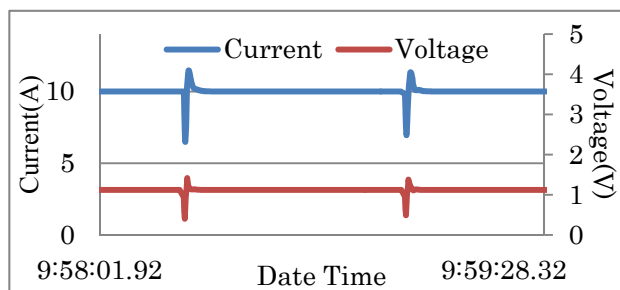


Figure 5: Trend graph data example of the current and voltage readback values.

4. まとめと今後の課題

入射器の電磁石電源制御システムにおいて、EPICS EPID を利用したフィードバックシステムを構築した。PID 制御による電流値のフィードバック精度は 10^{-4} を達成し、満足する結果が得られた。

入射器では、入射エネルギーの異なるビームを各リングに供給している。そのため、ビームエネルギーの安定化、ひいては入射効率の安定化が重要な課題となっている。今後は、EPICS EPID を用いたエネルギーフィードバック用 IOC を開発し、既存システム^[2]からの更新を目指している。これにより、さらに安定なエネルギー安定化の実現を目指す。

参考文献

- [1] S. Kusano, et al., “KEK 入射器における EPICS tool を用いた加速器情報蓄積システム”, Proceedings of the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006.
- [2] T. Kudou, et al., “KEK 入射器における運転監視ソフトウェア”, Proceedings of the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006.