

J-PARC MR 主電磁石電源の学習制御による追従性向上

TRACKING-ERROR REDUCTION WITH A LEARNING CONTROL OF MAIN MAGNET POWER SUPPLIES IN J-PARC MR

中村衆#, 山田秀衛, 栗本佳典, 下川哲司, 森田裕一

Shu Nakamura #, Shuei Yamada, Yoshinori Kurimoto, Tetsushi Shimogawa, Yuichi Morita

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) Main Ring (MR) is a proton synchrotron which provides high intensity proton beams to Neutrino Experimental Facility and Hadron Experimental Facility. Beam power of the proton beams was achieved up to 240 kW with beam commissioning, improvements and adjustments of devices in this spring.

Power supply system for main magnets has been improved by reconstructing filters, control system, and so on. The improvement of the control circuit with a variable feedback gain has reduced an acceleration period from 1.9 sec to 1.4 sec. The tracking error has been reduced by the variable feedback gain. However, the transitions of the feedback gain make some tracking errors. The variable feedback gain also does not control the tracking error in the last part of the acceleration period. Therefore we have installed a voltage feed-forward unit in the power supplies for increasing the beam power and providing a 8 GeV proton beam to COMET (Coherent Muon to Electron Transition) experiment. In this article, the detail of the learning control system and the tracking error correction using the voltage feed-forward unit are described.

1. はじめに

J-PARC Main Ring(MR)は茨城県那珂郡東海村にある大強度陽子ビーム加速器で、上流の LINAC, RCS を経由して 3 GeV まで加速された陽子ビームを入射し、30 GeV まで加速した後ハドロン実験施設とニュートリノ施設へ供給している。そのビームパワーは MR のビーム調整試験や各機器の改修、調整によって年々上昇しており、今春のビーム運転では最大 240 kW のビーム強度を達成している。

主電磁石電源においては、負荷配線の変更や電源主回路の抜本的な改修^[1]の他、制御回路の改修による電流追従性の改善^[2,3]にも取り組んできた。特に可変制御ゲインの導入により、加速時間を短縮した場合の電流追従性を向上させた効果は大きかったが、ゲインの切り替わり時に追従性が悪化することや、加速終盤での追従性悪化を抑制できない、などの課題も残った。これらの追従性の悪化がビームロスの一因となっていると考えている。今後、さらにビーム強度を上げるためにはビームロスを減らす事が不可欠である。また、ハドロン実験施設で計画されているミュオン電子転換過程探索(COMET)実験への 8 GeV 陽子ビーム供給のためには、現行の電磁石電源制御では取り出しエネルギーが下がった分に見合う、繰り返し周期の短縮が不可能である。それらを改善するためには、フィードフォワード制御のための電圧パターンを導入し、学習制御を行う事が必要だと判断した。今回、この電圧パターンを利用して繰り返し学習制御を行い、電源出力電流の追従性の改善を行ったので報告する。

2. J-PARC MR 主電磁石電源での学習制御

今回導入したフィードフォワード制御のための電圧パターンと繰り返し学習制御の概略図を Figure 1 に示す。出力電流指令値(Iref)は上位制御系から EPICS のフロントエンド計算機である I/O Controller (IOC)を通じて、電源制御盤内の専用メモリ(Current Pattern Memory)へ記録する。Iref は適宜読み出され、高精度 DCCT で測定した出力電流値(Iout)と差分を取って P-I 制御によるフィードバック制御を行う。これまでは、制御回路内で Iref を基に模擬的に作成した電圧パターンを用いてフィードフォワード制御を行っていた。今回、新たに電圧パターン用の専用メモリ(Voltage Pattern Memory)を導入し、Iref と同様に IOC を通じて出力電圧指令値(Vref)をメモリに記録できるようにした。この電圧パターンは任意の波形を設定する事ができる。

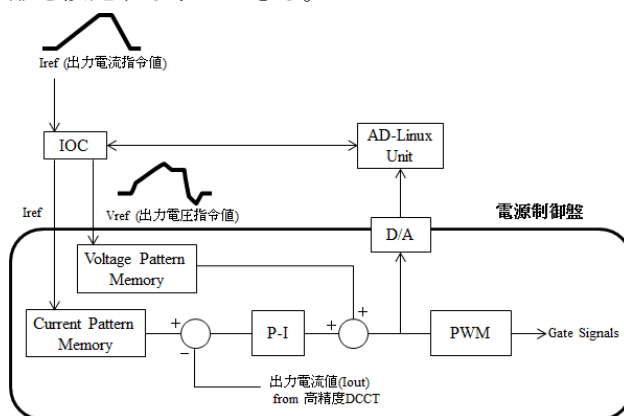


Figure 1: Schematic view of the control system with a voltage feed forward unit.

shu.nakamura@j-parc.jp

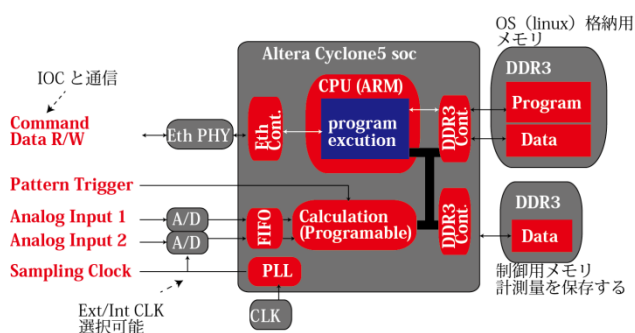
繰り返し学習制御を行うために、フィードバック制御の制御量を用いた。制御はデジタル回路で行われるため、制御量をデジタル値のまま電源制御盤から IOC へ転送することが望ましいが、現行電源の制御盤はデジタルアウトプットができない仕様のため、モニタ用のアナログ出力のうちの一つをそれに割り当てた。アナログ出力された制御量は AD-Linear Unit によってデジタル値に変換した。AD-Linear Unit は IOC との間で LAN を介してデータの取得や平均化処理を行う。こうして取得した制御量を V_{ref} として使用した。

3. AD-Linear Unit

今回の学習制御に使用した A/D ユニットは、元々是新電源開発のために自前の電源制御ユニットを必要とした事から開発した物である^[4]。回路構成などは同一であるが、FPGA のプログラムを適当な物に書き換える事で、今回の目的に沿った物にアレンジしている。写真と機能ブロック図を Figure 2(a)と(b)にそれぞれ示す。



(a) A picture of a front panel of the AD unit.



(b) A block diagram of the AD unit.

Figure 2: A picture and a block diagram of the AD unit.

この A/D ユニットは入力したアナログ信号の AD 変換の他、FPGA によるリアルタイム演算、CPU(Linux)を使った上位通信、1GB の計測値ストア用メモリを備えており、外部トリガー (Pattern Trigger) に同期して信号の測定を行う事ができる。上位の IOC との通信は Ethernet を用いて EPICS によ

て行われる。データ取得の開始や終了、平均化処理回数などの動作や、計測データも EPICS レコードとして定義した。FPGA は Altera 社の Cyclone5 soc を使用した。

4. 速い取り出しパターン

J-PARC MR はニュートリノ実験施設へのビーム供給時には速い取り出しパターンで運転している。この取り出しパターンでは、ビームを 4 バンチ入射した後、10 ミリ秒おいて加速を開始する。加速時間は 1.4 秒で、加速後すぐにパルス磁場を発生するキッカー電磁石とセプタム電磁石によって陽子ビームはニュートリノビームラインへ移送される。Figure 3 に偏向電磁石電源の典型的な電流パターンと電流偏差を示す。

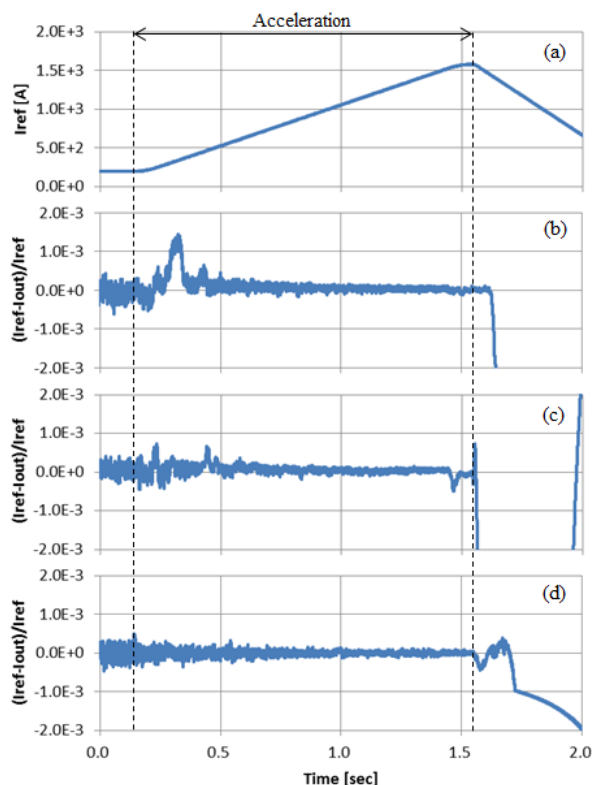


Figure 3: Current pattern and current deviations with or without the learning control. (a) Reference current pattern. (b) Current deviation without the variable feedback gain and learning control. (c) Current deviation with the variable feedback gain and without the learning control. (d) Current deviation with the variable feedback gain and the learning control

何の対策も行わない場合、加速時間を 1.4 秒に短縮すると加速途中で追従性が著しく悪化する (Fig. 3 (b))。これは変換器の応答が非線形であることに起因するため、この非線形性を補正する可変ゲインを制御回路に組み込んだ^[3]。その結果、Figure 3(c)に示すように加速序盤での追従性は大きく改善された。しかし、ゲインが変化する部分と加速終盤とで追従性がそのまま、又は悪化する結果となった。一方、

繰り返し学習制御を導入した V_{ref} を使用すると、2 回の学習で Figure 3(d)のようにすべての加速領域で追従性が改善した。

学習制御においては、制御量を 100 回取得して平均値を取るとともに、ビーム入射時の DC 区間はその区間の平均値をとって V_{ref} とした。複数回の取得データを平均化する事で電流リップルによる制御量のふらつきを平準化しつつ、DC 区間では V_{ref} のふらつきが電流リップルの元となる事がないようにした。

5. 遅い取り出しパターン

ハドロン実験施設へのビーム供給時の運転は、遅い取り出しパターンによって行っている。このパターンではビーム入射後すぐに加速開始し、1.9 秒かけて 30 GeV まで加速する。加速後のビーム取り出しは、約 2 秒程度かけて行う。このとき電磁石電源は DC 通電している。これまで、ハドロン実験施設へは 30 GeV の陽子ビームを供給していたが、今秋以降、COMET 実験に対応した 8 GeV の陽子ビームを供給する場合がある。このときの MR の各機器は、8 GeV 加速と取り出しに応じた運転が求められる。

電磁石電源においてはビーム取り出し時の電流値を下げる事が求められる。加速時間などの電流パターンが 30 GeV までのそれと同じであれば、微調整で対応できたが、最大電流値の減少に比例して加速時間を短縮することが望まれる。3→30 GeV が 3→8 GeV となるので、加速時間は $1.9 \times 5 / 27 = 0.35$ 秒が望ましい加速時間である。Figure 4 に加速時間が 0.6 秒の場合の偏向電磁石電源の電流指令値と電流偏差を示す。このとき学習制御は行っていない。学習制御を行わないと、30 GeV 加速時と同程度の di/dt であったとしても上手く電流指令値に追従できない事がわかる。また、電源によっては加速終了時に発振するものもあった。電源毎の特性を考慮し、繰り返し学習制御を行った上で、すべての電源で安定に動作できる電流パターンは、加速時間が 0.7 秒の場合であった。このときの偏向電磁石電源の電流指令値と電流偏差を Figure 5 に示す。

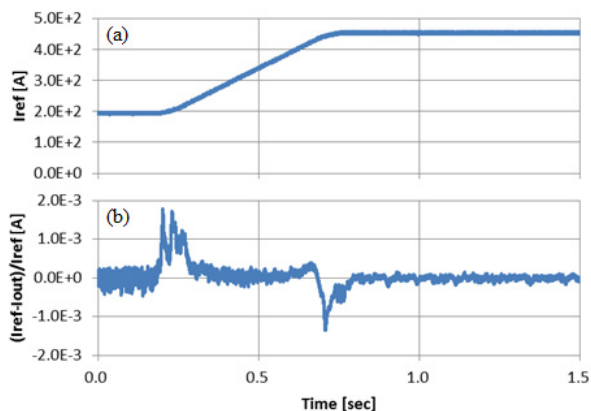


Figure 4: Current pattern for the COMET experiment and current deviation. (a) Reference current pattern. (b) Current deviation without the learning control.

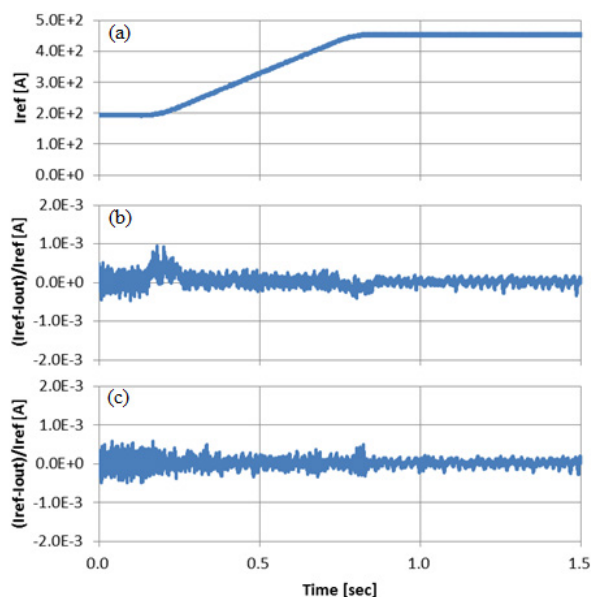


Figure 5: Current pattern for the COMET experiment and current deviation with or without the learning control. (a) Reference current pattern. (b) Current deviation without the learning control. (c) Current deviation with the learning control.

6. まとめ

J-PARC MR の主電磁石電源は、今後のビーム強度の増強と COMET 実験に対応した電流パターンでの動作に対応するため、繰り返し学習制御を導入した。学習制御に用いる値は電源制御の制御量であり、デジタル値を一度アナログ出力で取り出してから、再度 AD 変換を行って用いた。AD 変換には独自に開発した汎用の AD ユニットを使用し、問題なく動作している。繰り返し学習制御によって、速い取り出しパターンにおいては、可変ゲインの導入によって改善できなかった加速初期や、より悪化した加速終盤の追従性の改善に成功した。COMET 実験に対応した遅い取り出しパターンは、電流パターンの調整だけでは改善できない追従性を、学習制御によって改善した。

参考文献

- [1] S. Nakamura, et al., “J-PARC MR における電磁石電源の問題点と対策”, 「加速器」 vol. 6, No. 4, 2009.
- [2] S. Nakamura, et al., “J-PARC MR の主電磁石電源の制御安定性向上について”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [3] S. Nakamura, et al., “J-PARC MR 主電磁石電源の可変制御ゲインによる追従性向上”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2012.
- [4] Y. Kurimoto, et al., “A High Power Test Method for Pattern Magnet Power Supplies with Capacitor Banks”, Proceedings of the 2nd International Symposium on Science at J-PARC Japan, Tsukuba, Jul. 12-15, 2014 (will be published).