

TRACKING-ERROR REDUCTION WITH VARIABLE FEEDBACK GAIN OF MAIN MAGNET POWER SUPPLIES IN J-PARC MR

Shu Nakamura[#], Shuei Yamada, Shigenori Hiramatsu
High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Delivered beam power from J-PARC MR to the neutrino experiments has been steadily increasing up with shortening the MR cycle. When physics run began, time of an acceleration period was 1.9 sec. It has been reduced to 1.4 sec at the last physics run. Tracking-error of output current from power-supply of main magnets has been getting worse on the short acceleration time due to a nonlinearity of converter gain. We have installed a variable feedback gain in a control circuit. Then the nonlinearity of converter gain has been corrected by the variable feedback gain. The tracking-error has been reduced from 1.5×10^{-3} to 5×10^{-4} .

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

1. はじめに

J-PARC MR は RCS から 3GeV の陽子ビームを注入し、30GeV まで加速してハドロン実験施設(HD)、およびニュートリノ施設(NU)へ供給している。速い取り出しによって NU へ供給するビームは、2010 年の利用運転開始^[1]から、8 バンチ運転の開始、バンチ当たりの粒子数増加、そして MR 運転周期の短縮によって、そのビームパワーが徐々に増強されている。

MR 運転周期を短縮するために、これまで主に加速時間の短縮を行ってきた。2010 年の利用運転開始時の加速時間は 1.9 秒であるのに対し、2012 年現在の加速時間は 1.4 秒と 0.5 秒の短縮を実現している。その過程で主電磁石電源の出力電流において、加速時の追従性が悪化する問題が発生した。これは変換器ゲインの非線形性^[2]に因るもので、加速初期の段階に顕著に発生した。この問題に対処するために制御回路中に変換器ゲインの非線形性を補償する部分を追加した。これは制御ゲインを段階的に切り替える回路で、ここでは可変制御ゲインと呼ぶ。

MR 運転周期の短縮に伴って加速時間を 1.4 秒とした際に、最大で 1.5×10^{-3} まで悪化した追従性が、可変制御ゲインによって 5×10^{-4} まで改善された。また、可変制御ゲインによって立ち下がり時間も若干短縮することが出来、運転周期として 2.56 秒での利用運転が可能となった。

2. MR 運転周期とビームパワー

MR のビームパワー P_{MR} は MR の取り出しエネルギーを E_{MR} 、運転周期を MR_{cycle} とし、RCS から MR に入射されるビームパワーを P_{RCS} としたとき、ビームロスを考えない場合は次の式で表される^[3]。

$$P_{MR} = 0.16 \left(\frac{E_{MR}}{3\text{GeV}} \right) \cdot \frac{P_{RCS}}{MR_{cycle}} \quad (1)$$

ここで、MR のビーム加速におけるエネルギー増加率 dE/dt を一定とすると、 E_{MR}/MR_{cycle} は第一近似では一定となる。そのため、MR ビームパワーを増強するために、取り出しエネルギーを上げることと、運転周期を短縮することは同じ意味を持つ。しかし、現実問題として取り出しエネルギーを現行の 30GeV から当初の設計値である 50GeV に上げるには多大な設備投資が必要となる。また、電磁石の飽和の影響により、50GeV 運転時の必要電力は 30GeV 時の約 4 倍と見積もっている。

そのため、主電磁石電源においては、現時点では MR 運転周期の短縮によるビームパワー増強を主目的として、種々の改修をおこなっている。2010 年の利用運転開始時点では、加速時間 1.9 秒で運転周期 3.52 秒であったものが、2012 年現在では加速時間 1.4 秒、運転周期 2.56 秒で利用運転を行った。この運転周囲の短縮によって、ビームパワーを 37.5 % 増加させた。

3. 変換器ゲインの非線形性

図 1 に主電磁石電源の制御ブロック図を示す。図中で変換器ゲインは K_{CNV} で示している。一般的な変換器ゲインは理想的な線形応答ではなく、非線形性を有している。しかし、MR 主電磁石電源のそれは非常に顕著である。

主電磁石電源がパターン運転を行ったときの変換器への変換器への指示値 ($CNV_EC \approx IEGT$ ゲート幅) と出力電圧 (V_{out}) の時間波形、およびそれぞれを x 軸と y 軸にとったグラフを図 2 に示す。ビーム入射時の Flat Bottom (A 点) から加速に応じて出力電流を上げるにつれて出力電圧は上昇し、加速終了時の電流スムージング区間開始のときに出力電圧は最大となる (B 点)。ビームを射出する Flat Top (C 点) では、出力電圧は最大電圧よりも低くなる。

[#] shu.nakamura@j-parc.jp

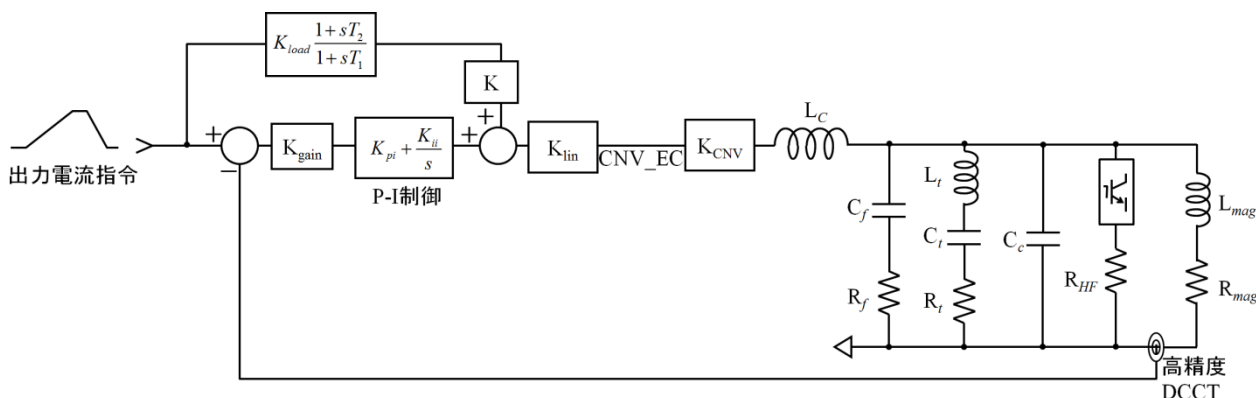


図 1：主電磁石電源のブロック図。今回導入した可変制御ゲインは K_{lin} として図中に示す。

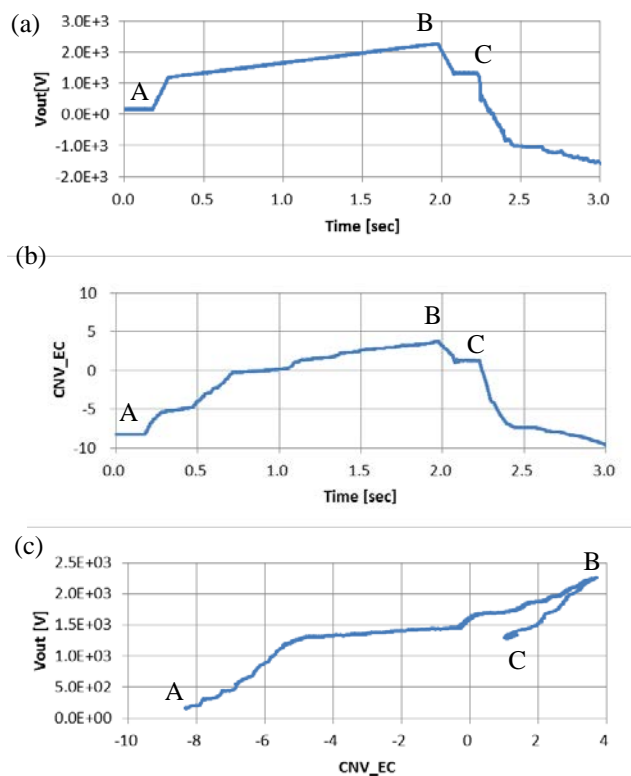


図 2：(a) 出力電圧の時間波形。(b) 変換器指示値の時間波形。(c) 横軸に変換器指示値、縦軸に出力電圧を取った変換器のゲイン。(QFN 電源)

B→C への変移時たどる経路は、A→B への変移時とは異なる。主電磁石電源は電流の立ち下がり精密制御していないため、点 C から点 A への変移はここでは無視する。

この顕著な非線形性は主電磁石電源の変換器方式に因ると考えられる。主電磁石電源の変換器方式は、スナバ回生方式の電流型自励式コンバータ^[4]と呼ばれるものである。これは交流電流を自励式スイッチング素子によって、交流から直接、出力パターン電流に変換するものである。自励式スイッチング素子

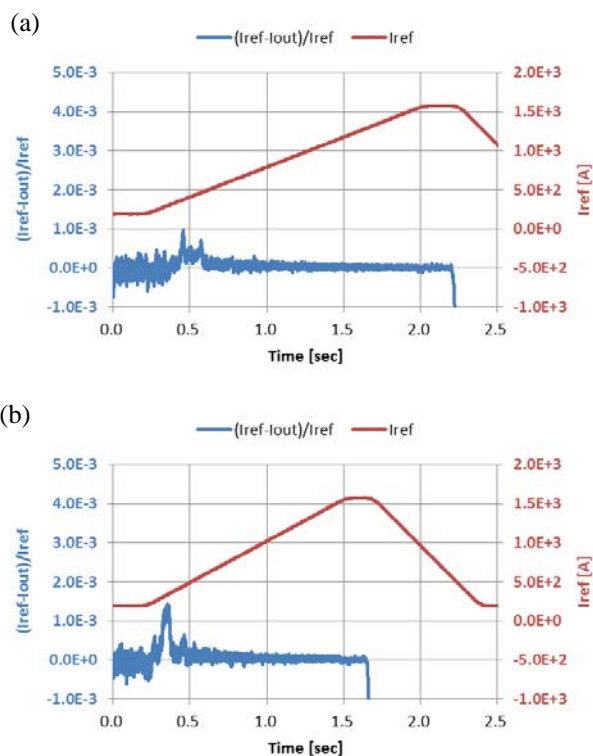


図 3：(a) 加速時間が 1.9 秒のときの電流指令値と電流偏差。(b) 加速時間が 1.4 秒のときの電流指令値と電流偏差。(BM5 電源)

のゲート ON 時間と、そのときの交流位相によって出力電流を制御している。

このような変換器ゲインの変化は、制御ループにおいてはフィードバックゲインが変化しているように見える。そのため、DC 出力において最適なフィードバックゲインを選択した場合でも、パターン出力するときには、電流値によってフィードバックゲインが大きすぎて発振する、または逆に小さすぎて追従性が悪化するという現象が発生する。

図 3 に偏向電磁石電源の出力電流と電流偏差を示

す。上図は加速時間が 1.9 秒の出力パターンで、下図は加速時間が 1.4 秒の出力パターンの場合である。加速時間 1.9 秒のときに、加速初期みられる追従性の悪い部分が、加速時間 1.4 秒のときはより大きく指令値からずれている。変換器ゲインの非線形性による出力電流の追従性悪化はビーム軌道にも影響を与えている。RF の調整ではこの影響を取り除くことが出来ず、ビーム軌道の COD などにその影響が見られた。

4. 可変制御ゲインによる補正

変換器ゲインの非線形性は、制御ループにおいてフィードバックゲインの変化と同等である。そこで、この変換器ゲインの非線形性を補正するため、制御ループの中に可変ゲイン K_{lin} を導入した。この可変ゲインは理想的には変換器の非線形性を多項式フィットした関数であるべきだが、デジタル制御回路のメモリ容量の制限から、CNV_EC の値に三カ所

の閾値をもうけ、四つの区間でゲインを変更できる簡便なものとした。実際には二カ所の閾値と三つの区間での変換ゲインを用いている。

可変制御ゲイン導入後の出力電流、電圧、変換器指令値、電流偏差を図 4 に示す。このときの加速時間は 1.4 秒である。可変制御ゲイン導入前後の電流偏差（図 3 (b)と図 4 (d)）を比較すると、加速初期に 1.5×10^{-3} まで悪化した追従性が、可変制御ゲインの導入によって 5×10^{-4} 程度まで補正されたことがわかる。図 4 (c)において、K1 の領域ではフィードバックゲインは図 3 の場合と同じ値であるが、K2 ではその 10 倍、K3 では 1.1 倍のフィードバックゲインとしている。

区間を区切って可変制御ゲインを変更しているため、切り替わるタイミングでは電流偏差にスパイク状のリプルが発生している。このリプルを除去することは現行の方法では難しい。多項式フィットによるスムーズな制御ゲインの変更や、外部からの電圧パターン入力による追従性補正の導入が必要であると考えている。

5. まとめ

加速時間の短縮に伴い、変換器の非線形動作に起因する追従性の悪さが顕著となった。これを改善するため、制御回路中に可変制御ゲインを導入し、変換器指令値をいくつかの区間に分割してそれぞれの区間でフィードバックゲインを調整できるように改修を行った。その結果、導入前は 1.5×10^{-3} まで悪化した追従性が、可変制御ゲインの導入と調整によって 5×10^{-4} 程度まで回復させることに成功した。

参考文献

- [1] T. Koseki, et al., "Challenge and Solution for J-PARC Commissioning and Early Operation", Proc. IPAC10, Kyoto, Japan, 2010, p.1304
- [2] S. Nakamura, et al., "Stabilization of the Control System on Magnet Power Supplies in J-PARC Main Ring", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010
- [3] H. Kobayashi, et al., "Challenge to Achieving High-Power Operation of the J-PARC MR", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010
- [4] E. Ikawa and K. Noda, "Development on Advanced Current-source-type Self-commutated Converter for Accelerator Electromagnets", The 13th S.A.S.T, Suita, Osaka, Japan, pp.60-62, 2001

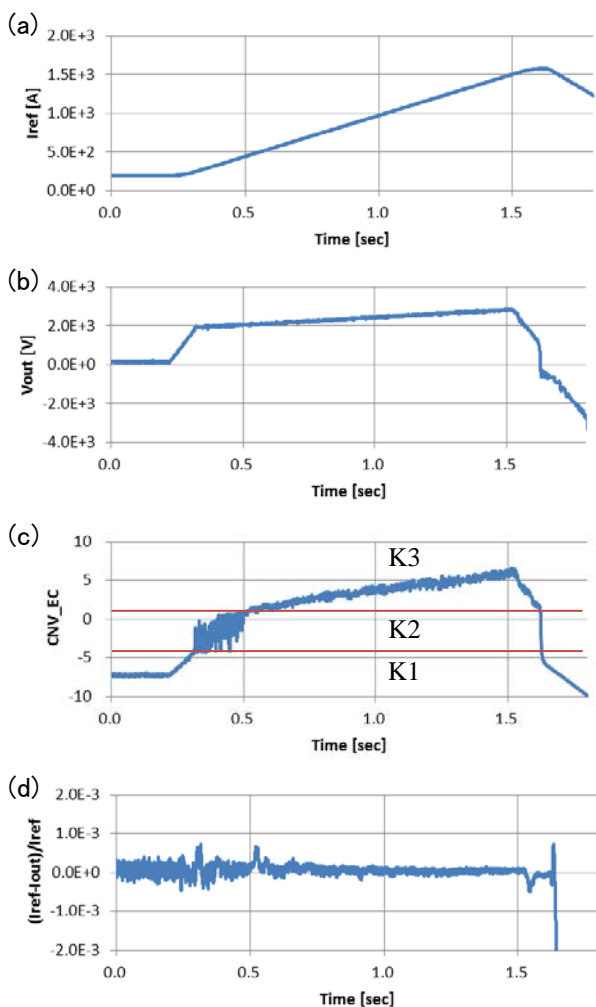


図 4 : 加速時間が 1.4 秒で可変制御ゲインによる補正後の (a) 電流指令値 (Iref)。 (b) 出力電圧 (Vout)。 (c) 変換器指令値 (CNV_EC)。三つに区切られた K1、K2、K3 でそれぞれフィードバックゲインを変えている。 (d) 電流偏差。