

HIGH PRECISION MEASUREMENT OF TRANSIENT MAGNETIC FIELD AND COMPENSATION OF EDDY CURRENT EFFECT FOR MAGNETS

Yuichi Morita ^{#,A)}, Kunio Koseki^{A)}, Yoshinori Kurimoto^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) is a joint project between Japan Atomic Energy Agency (JAEA) and High Energy Accelerator Research Organization (KEK) which aims to achieve a MW-class proton accelerator facility. One of the promising solutions for increasing the beam power is to fasten the repetition rate of synchrotron from current rating of 2.6 sec to 1 sec in the future. For this purpose, a new magnet power supply with higher repetition rate is now under development. But one of the serious concerns for faster repetition rate of magnets is the effects of eddy-current. Longitudinally leaked magnetic field generates an eddy-current at the end-plates of magnet. The amplitude, or the seriousness, of the eddy-current is a linear function of ramp-up speed for excitation current. As a compensation method for the eddy-current, we have proposed to introduce a transfer function from excitation current to magnetic field. This transfer function is implemented in the feedback system of magnet power supply. The deviation of the magnetic field due to the eddy-current is drastically reduced with this method. In this article, operational results from POP experiment with the new feedback system for eddy-current compensation is reviewed.

電磁石パターン磁場の高精度計測と渦電流の補正方法

1. はじめに

現在 J-PARC 主リング^[1]では将来の大強度化を目指し精力的に新たな電磁石電源の開発を進めている。シンクロトロンにおいてビーム強度を上げるための一つの手段として加速サイクルを速める事がある。しかしこのためには電磁石における励磁電流を急峻に変化させる必要があり、磁石端板や金属ダクトにおいて渦電流^[2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]が発生し、これによる磁場の位相遅れが予測される。そこでパターン変動する電磁石磁場を高精度で計測しこれをフィードバック基板上のメモリに保存し、励磁電流と磁場の伝達特性を計算する事で、指令値に対して高精度で追従する磁場を発生させる手法を考案した。

本稿では、偏向電磁石を用いたパターン磁場の計測及び、磁場補正方法の実証試験結果について報告する。

2. 磁場測定

2.1 電流フィードバックループ

電磁石電源では図 1 に示すフィードバックループによって出力電流を高精度に制御している。ここで I_{ref} は電流指令、 I_{out} は DCCT によって計測した出力電流、 Z は負荷及びフィルタ回路のインピーダンスである。一般的に比例積分制御 (PI) だけでフィードバックする場合、閉ループゲインのカットオフ周波数が有限の低い値を取り追従誤差が残ることから、図に示すようなフィードフォワードを追加する。出

力電流の時間変化が非常に緩やかな場合は電流に対する磁場は良く追従するが、J-PARC 主リングで目指す 1Hz やそれ以上の高繰り返しパターンでは、磁石端部や金属ダクトに流れる渦電流の影響で磁場が追従しない事が知られている。

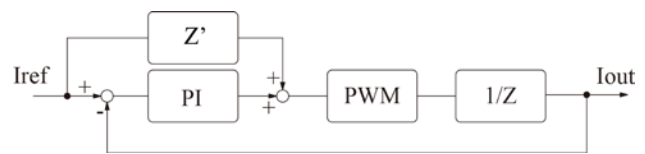


図 1 : 電流フィードバックの図

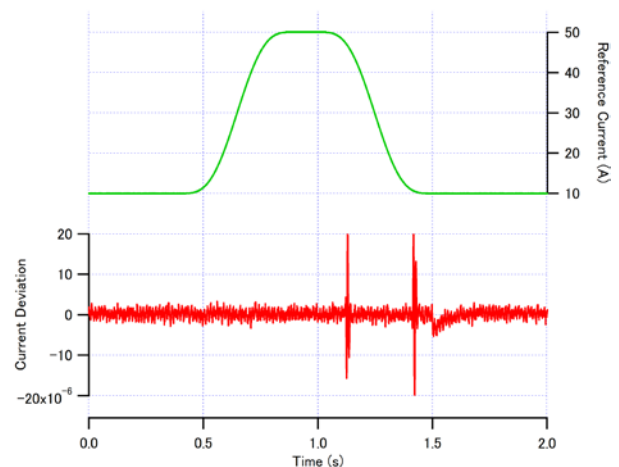


図 2 : 磁場計測に使用した高精度電源の出力特性。上段は電流指令であり、下段はこの時観測された電流追従誤差である。追従誤差は数 ppm 以下に抑えられている^[9]。

[#] yuichi.morita@kek.jp

2.2 磁場測定のセットアップ

渦電流の影響を検証するため、ガウスメータ（Lake Shore 社、460 3-Channel Gaussmeter）を用いて磁場測定を行った。偏向電磁石のビーム軌道近辺にプローブをセットし、高精度 ADC (24bit, 20MS/s) により磁場データを取得した。

2.3 磁場測定

図 2 に示す電流波形によって電磁石を励磁し、その時の磁場波形を観測したのが図 4 である。ここで磁場波形は磁場指令値(B_{ref} , 図 3 参照)により規格化している。 B_{ref} は電流指令値(I_{ref})と相似な波形であると仮定した。このとき、式 1 で表される磁場偏差は図 5 のようになる。

$$\Delta B \equiv \frac{B_{ref} - B_{out}}{B_{ref}} \quad (式 1)$$

この結果より、実際の磁場波形は指令値に対して位相が遅れており、渦電流の影響を受けていると考えられる。なお本測定では電磁石ギャップ間に金属ダクトは挿入しておらず、渦電流の大半は磁石本体に流れるものであると考えられる。

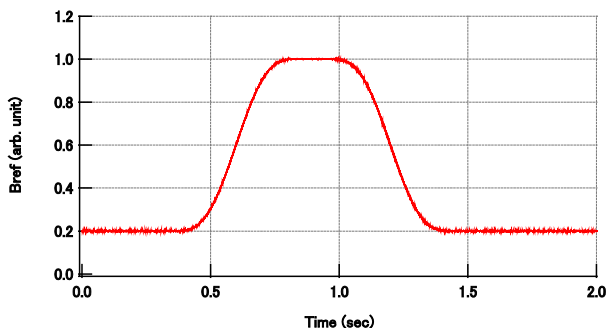


図 3：磁場指令値の波形 (B_{ref})

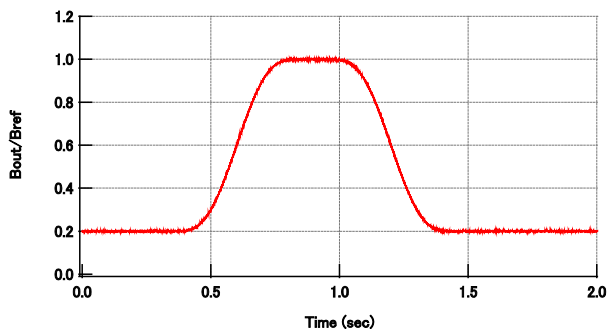


図 4：観測された磁場波形 (B_{out})

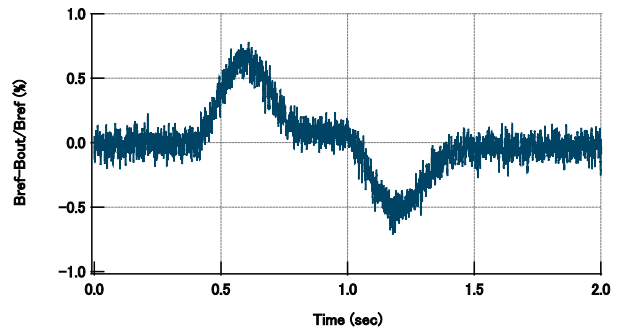


図 5：観測された磁場偏差 ($(B_{ref} - B_{out}) / B_{ref}$)。偏差は式 1 に従って規格化されたものを表示している。

なお、この計測中に観測された電流偏差は図 2 に示す通り、一部の期間を除いて数 ppm 以下で制御されている。つまり、電磁石電源の出力電流を高精度で制御するだけでは渦電流の影響によってビームが感じる磁場は大きく乱されていると言える。

3. 渦電流磁場の補正

渦電流の影響によって励磁電流に対して磁場が追従しないという問題が明らかになった。そこで我々は、磁場を高精度で測定し、磁場偏差がゼロになるようフィードバックする手法を考案した。今回考案した手法によるフィードバックループを図 6 に示す。

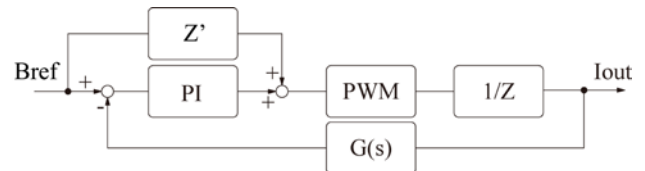


図 6：磁場フィードバックループ

この手法では、予め測定した磁場波形(B_{out})をパターンメモリ（フラッシュメモリ）に保存し、高精度 DCCT によって観測された電流波形(I_{out})で規格化した電流－磁場伝達関数を利用し磁場偏差をフィードバックするというものである。この電流－磁場伝達関数 $G(s)$ は下記で定義される。

$$G(s) \equiv \frac{B_{out}}{I_{out}} \quad (式 2)$$

本手法によって磁場補正を行った際の磁場偏差波形を図 7 に示す。

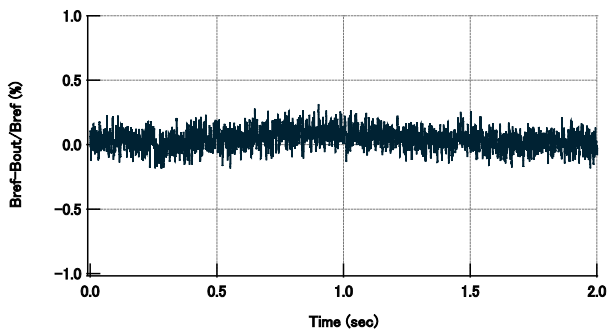


図 7：磁場補正後の磁場偏差波形 $((B_{ref}-B_{out}) / B_{ref})$

図 5 に示す補正前の波形と比較すると 0.7% 程度あった磁場偏差が 0.2% 程度にまで小さくなっているのが分かり、本手法の有効性が示せたと言える。

4. 今後の課題

今後さらに磁場補正の精度を向上させるためには、図 6 に Z' で表現されたフィードフォワードパターンの最適化が必須であると考えられる。また今回計測した磁場波形には不要なリップル成分が含まれている事から、これらを除去し、更なる高精度磁場の補正方法を確立する必要がある。

磁石ギャップ内に金属ダクトが存在する事によって更に渦電流の影響が大きくなる事が予測される事から、これらの計測を行ってゆく予定である。

謝辞

本研究を遂行するに当たり予算等様々な面で支援頂いた加速器研究施設主幹・内藤富士雄氏及び小関忠氏に感謝申し上げます。

また、磁場測定にご協力頂いた加速器研究施設教授・江川一美氏に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] "Accelerator Technical Design Report for J-PARC," KEK Report 2002-13, (2003).
- [2] K. Koseki, et al., "EDDY CURRENT COMPENSATOR FOR A PULSED MAGNET," 第 3 回日本加速器学会年会・第 3 1 回リニアック技術研究会
- [3] N. Tani, et al., "Design of RCS Magnet for J-PARC 3-GeV Synchrotron," IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 14, NO. 2, JUNE 2004.
- [4] M. Kinsho, et al., "Development of alumina ceramics vacuum duct for the 3 GeV-RCS of the J-PARC project," NIM VOL 73, ISSUE 2, March 2004
- [5] N. Tani, et al., "Eddy current effect of magnets for J-PARC 3-GeV synchrotron"
- [6] K. Koseki, et al., "PULSED BENDING MAGNET OF THE J-PARC MR," PROCEEDINGS OF EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, 2006.
- [7] S. Igarashi, et al., "Eddy Current Effects of the J-PARC RCS Sextupole Magnets," IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, JUNE 2008.
- [8] M. Negrazus, et al., "Eddy current reduction in fast ramped bending magnets," IEEE Trans. on Applied superconductivity, Vol. 16, No. 2, (2006).
- [9] Y. Kurimoto, et al., "A NEW METHOD FOR REJECTING TRACKING ERROR IN MAGNET POWER SUPPLIES," 第 9 回日本加速器学会年会