

EDDY CURRENT COMPENSATOR FOR A PULSED MAGNET

Kunio Koseki, Hisayoshi Nakayama, Masafumi Tawada, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan

Abstract

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) is under construction with a collaboration between Japan Atomic Energy Agency (JAEA) and High Energy Accelerator Research Organization (KEK). The J-PARC consists of a 180 MeV linac, a 3 GeV rapid-cycle synchrotron (RCS) and a 50 GeV synchrotron (MR). The bunch trains, which extracted from the RCS, is delivered both to the "Materials and Life Science Facility" and to the MR, two beam transport lines, 3-NBT and 3-50BT, are constructed. The switching of bunch trains is performed by a pulsed bending magnet. The field strength of 1.21 Tesla with rise and fall time of less than 40 msec is required. It was found that an effect induced by eddy current, which flows at thick end-plates, disturbs the flatness of the magnetic field. A simple compensation circuit has been adopted for a cure. A result from a field measurement, which shows a sufficient flatness, is presented.

パルス電磁石における渦電流補償回路

概要

J-PARC 加速器[1]では、前段加速器である速い繰り返しシンクロトロン(RCS)から取り出された 3GeV 陽子ビームを、2つのビーム輸送系を用いて、物質・生命科学実験施設及び主リング(MR)へと輸送する。各ビーム輸送系の分岐点にはパルス電磁石が設置され、MR 行きビームを 3.64 秒毎に蹴り出す。パルス電磁石の立ち上がり及び、立下り時間は、バンチ間隔から 40msec 以下と要求されている。

電磁石及び電源

パルス電磁石及び電源の主要パラメータを表 1 に纏める。電磁石は厚さ 0.5mm の珪素鋼板から成る。また電源は GTO スイッチ及び IGBT チョッパを直列に組み合わせる事で構成されている。

表 1 パルス電磁石及び電源の主要パラメータ

| | |
|---------|--|
| 磁場強度 | 1.21 Tesla |
| 巻き数/極 | 32/Pole |
| インダクタンス | 29 mH |
| 最大励磁電流 | 2180 A |
| 最大電圧 | 4000 V |
| 磁極長 | 1500 mm |
| ギャップ高 | 142 mm |
| 平坦度 | $< 5 \cdot 10^{-4} / 650 \text{ msec}$ |
| パルス幅 | 100 – 650 msec |
| 立ち上がり時間 | 20 msec |
| 繰り返し | 0.3 – 1 Hz |

磁場測定

磁場 (BL) 測定はロングサーチコイル (長さ 2.5m、幅 20mm) によるピックアップ法を用いて行った。コイルに誘導された電圧は高精度 ADC (16bit, 1MS/s) によりデジタル信号に変換した後、時間積分を行った (図 1 参照)。

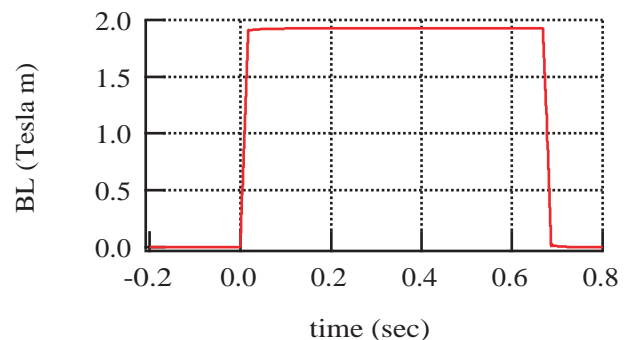


図 1 観測された積分磁場波形。パルス幅は試験的に 650msec としている。

観測された BL 波形は励磁電流が矩形波であるにも拘らず、フラットトップ期間 (図 3 参照) で緩やかに立ち上がっている。この間での時間的な平坦度を $\Delta BL \equiv (BL_{\max} - BL_{\min}) / BL_{\max}$ によって定義すると、観測された平坦度は $5 \cdot 10^{-3}$ 程度であった。この平坦度によってビームを蹴り出した際、予想されるエミッタンス増大は約 100% であり、機器の放射化やビーム強度低下等の観点から深刻な問題となり得る。

#kunio.koseki@j-parc.jp

渦電流回路モデル

外部磁界の時間変化に対して、鉄芯内部の磁場が追従しないという現象として、磁気余効[3, 4]及び渦電流[5]が知られている。本パルス電磁石で観測された時定数は数 10msec 以上であり、過去に報告された磁気余効の持つ時定数よりも長い。そこで、本パルス電磁石では主に渦電流によって磁場生成が妨げられていると推測される。

観測された磁場波形は 2 つの時定数を持つ式(1)によって近似出来る事が分かった。

$$BL(t) = BL_0(1 - \alpha_1 \text{Exp}[-\frac{t}{\tau_1}] - \alpha_2 \text{Exp}[-\frac{t}{\tau_2}]) \dots(1)$$

そこで、式(1)を式(2)の様に書き換える事で、これを磁場生成に寄与する実効励磁電流と定義した。

$$I_{\text{effective}}(t) = I_0(1 - \frac{L_m}{L_{e1} + L_m} \text{Exp}[-\frac{R_{e1}}{L_{e1} + L_m} t] - \frac{L_m}{L_{e2} + L_m} \text{Exp}[-\frac{R_{e2}}{L_{e2} + L_m} t]) \dots(2)$$

ここで、 L_m は電磁石のインダクタンス、 $L_{e1,2}$ と $R_{e1,2}$ は各々、渦電流回路における等価インダクタンスと抵抗である。式(2)は直ちに図 2 に示される等価回路モデルで表現される。

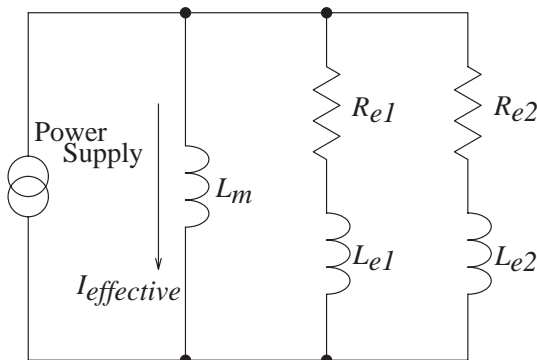


図 2 渦電流等価回路モデル。

式(2)による関数近似によって得られた各パラメータを表 2 に纏める。これらを用いた回路計算の結果を実測値と併せて図 3 に示す。

表 2 渦電流回路モデルにおける各パラメータ

| | |
|----------|-------------|
| L_m | 29 mH |
| R_{e1} | 48.176 ohm |
| R_{e2} | 201.335 ohm |
| L_{e1} | 4.9365 H |
| L_{e2} | 3.777 H |

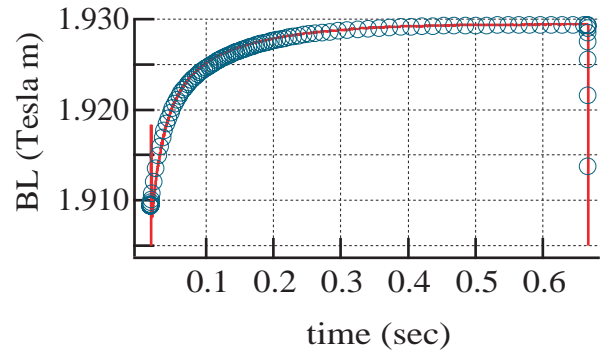


図 3 渦電流等価回路モデルによって再現した、フラットトップ期間での積分磁場波形 (円) 及び、実測波形 (実線)。

図 3 から、等価回路モデルが磁場波形を良く再現している事が分かる。なお、等価回路モデルと実測値との近似精度は約 2×10^{-4} 程度であった。

渦電流補正回路

等価回路モデルでは、渦電流を RL に流れる位相遅れ電流として取り扱った。この効果を補償するため、本研究では位相進みを持つ RC を取り入れた(図 4 参照)。

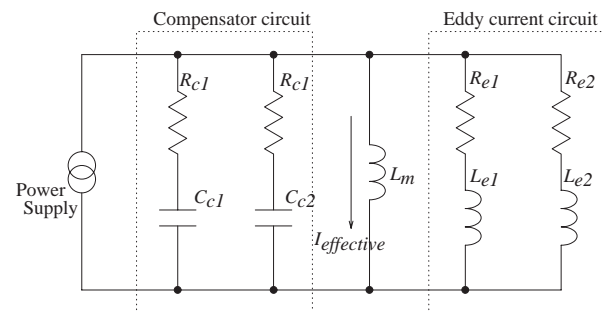


図 4 渦電流等価回路モデル及び、補償回路構成。

採用した RC の各パラメータを表 3 に纏める。また、これらのパラメータを用いた回路計算による各電流及び電圧波形を図 5 に示す。

表3 渦電流補償回路のパラメタ

| | |
|----------|-------------|
| R_{c1} | 50 ohm |
| C_{c1} | 2.1 mF |
| R_{c2} | 200 ohm |
| C_{c2} | 105 μ F |

励磁電流の立ち上がり期間では、図 5-(b)に示す様に約 4000V のパルス状高電圧が電磁石に印加される。この期間に渦電流は、Exp 状にその振幅を増す。この時、RC によって構成された補償回路には図 5-(d)に示す充電電流が流れる。励磁電流が規定値に達すると、電磁石への印加電圧がゼロ付近にまで急峻に降下し、この時渦電流は Exp で減衰を開始する。この減衰波形と、補償回路から電磁石へ流れる放電波形とを一致させる事で、所望平坦度を達成する事が可能となる。

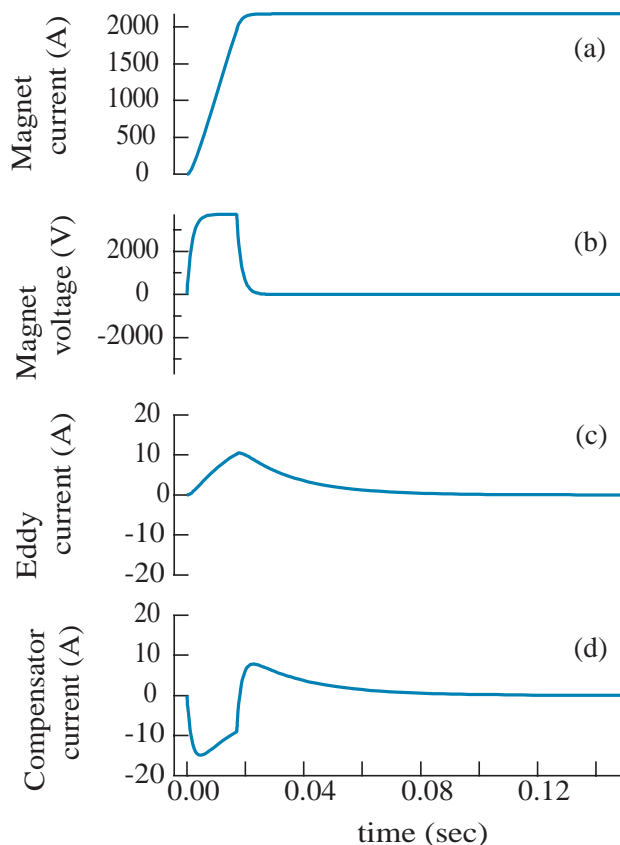


図5 回路計算による各電流・電圧波形；励磁電流(a)、電磁石電圧(b)、渦電流(c)、補償回路電流(d)。

補正回路を付加した際の、観測された磁場波形を図 6 に示す。ここでは試験的に電流を 1800A に下げて励磁した。また、パルス幅は J-PARC MR の初期運転で想定されている 120msec とした。磁場平坦度は 2×10^{-4} であり、所望平坦度を達成した。

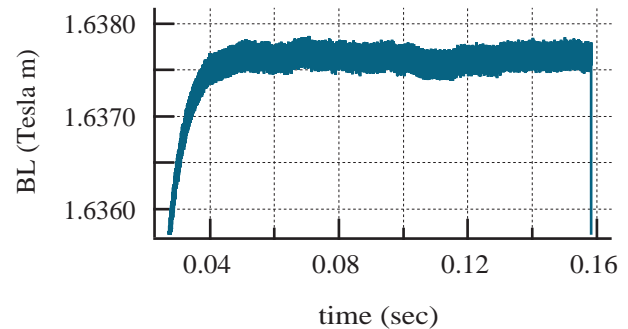


図6 補償回路を付加することによって観測された磁場波形フラットトップ部。

結論

J-PARC ビーム振分け用パルス電磁石及び電源が開発された。

ロングコイルによる磁場(BL)測定の結果、電磁石端部に流れる渦電流によって、磁場の時間的平坦度が著しく乱される事が分かった。

観測された磁場波形は、RL による等価回路で近似出来る事が分かった。渦電流による位相遅れ磁場を補償するため、RC による位相進み回路を付加する事によって、所望平坦度を達成した。

今後、J-PARC における共用運転を目指し、磁場安定度の確認や、連続通電試験等を行う予定である。

参考文献

- [1] "Accelerator Technical Design Report for J-PARC", KEK Report 2002-13, (2003).
- [2] K. Koseki, et. al., "Pulsed dipole magnet for the J-PARC MR", Proc. of EPAC2006, (2006).
- [3] Y. Tomono, "Magnetic after effect of cold rolled iron (I)", Journal of the physical society of Japan, Vol. 7, No. 2, pp174-179, (1952).
- [4] Y. Tomono, "Magnetic after effect of cold rolled iron (II)", Journal of the physical society of Japan, Vol. 7, No. 2, pp180-182, (1952).
- [5] M. Negrazus, et. al., "Eddy current reduction in fast ramped bending magnets", IEEE Trans. on Applied superconductivity, Vol. 16, No. 2, (2006).

謝辞

本研究を行うにあたり、KEKB、KEK-AR 及び J-PARC の方々には多大な支援を頂いた。三菱電機・藤井氏には電源調整等で多くの協力をして頂いた。