

A New Method for Rejecting Tracking Error in Magnet Power Supplies

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

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

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

Abstract

In synchrotron accelerators such as J-PARC main ring, a tracking error of magnet current (B-field) to the reference can cause serious beam loss. To reduce the tracking error, the voltage feed-forward has been used in control system of magnet power supplies. A learning control is known as one of possibility to obtain the precise voltage used as the feed-forward voltage. We propose several new methods using the learning control and show the possibility of the tracking error-less operation using the test power supply. In this article, we present the detail of our new method and the result of the test experiment.

電磁石電源における追従誤差除去の新方式

1. はじめに

大強度陽子加速器 J-PARC 主リングでは、1 MW 級の出力ビームを達成するため、現状 2.5 秒の繰り返し周期を 1 秒程度に縮めることを目標とし、新電磁石電源の開発を精力的に進めている [1,2,3]。

繰り返し周期が短くなる、即ち電流値の時間変化が大きくなるにつれ、電流指令値に対する出力電流の追従誤差の問題が顕著になると予想される。実際、現行の 2.5 秒周期の運転でも加速器開始時の追従誤差と同期したビームロスが観測されている。

追従誤差は系の閉ループ伝達関数で決まる過渡応答現象であるため、フィードバックゲインを上げて帯域を広げれば小さくすることができる。しかし、通常フィードバックゲインを大きくしていくと閉ループ伝達関数は負荷定数やフィルタ構成できまる共振構造を持つようになり、今度はその共振周波数での振動が増大してしまう。そのため、フィードバックゲインはある程度以上は大きくできず、我々の場合では電流フィードバックの帯域として 100 Hz 以下で使用する必要がある。

フィードバックゲインを上げずに追従誤差を減らす方法として、電源の出力電圧を直接フィードフォワードする方法が従来から用いられてきた。この方式では、正確な出力電圧値（フィードフォワード値）を得る必要があるが、その方法としてあらかじめ測定した負荷定数から計算する方法[4]、または一度通電しその電流偏差から出力電圧を逆算する方法（学習制御）[5]がある。前者の方式は負荷定数をそれほど正確に知る事が出来ないため高精度（～ppm）が要求される我々の電源には適しない。

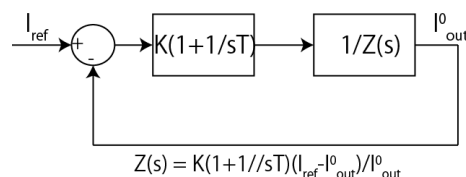
以上の理由から、我々は学習制御を用いた電圧フィードフォワードにより追従誤差を減少させる手法を選択した。本論文では、従来の学習制御法およびその問題点を提起し、それを解決する手法に関して測定結果も交えて報告する。

2. 従来方式とその問題点

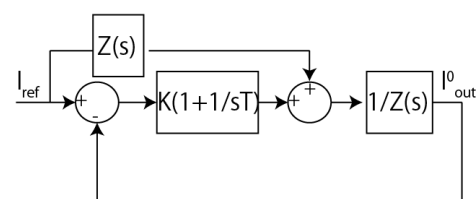
学習制御では、1 サイクル通電し電流偏差を得る事で、正確な負荷定数を知ることができる。たとえば、PI 制御（比例ゲイン K 、積分時定数 T ）で電流フィードバックループを組んだと仮定する（図 1a）。この時、負荷インピーダンス $Z(s)$ は電流指令値 I_{ref} 及び出力電流 $I_{ref} - I_{out}^0$ を使って

$$Z(s) = K \left(1 + \frac{1}{Ts} \right) \left(\frac{I_{ref} - I_{out}^0}{I_{out}^0} \right) \quad (1)$$

と表される。 K 、 T および I_{ref} は指定する値であるから、通電により I_{out}^0 を測定することで $Z(s)$ を得る。これを次のサイクルで図 1b のようにフィードフォワードしてやればよい。



(a) 通電によりインピーダンスを計算



(b) 求めたインピーダンスを使って電圧フィードフォワード

図 1：学習制御の手法

また、追従誤差を減らす別の対策として、電流指令値の変化を滑らかにする事も行われている。

図 2 は、電流指令値の変化を滑らかにするために正弦波（上図）を用い、かつ先に述べた学習制御を行った後の電流偏差（下図）を示している。この図から二つの問題点を読み取る事ができる。一つ目は、速い振動成分（ $\geq 50\text{Hz}$ 、以後リップル）が、重畳されることである。これは、図 2 のある時刻から電流偏差（下図）の線幅が増大している事から読み取れる。実際、線幅の増大部分がフィードフォワード電圧を加算している箇所に対応している。二つ目は、電流指令値の変化開始および終了時にそれぞれスパイク状の電流偏差が表れている事である。

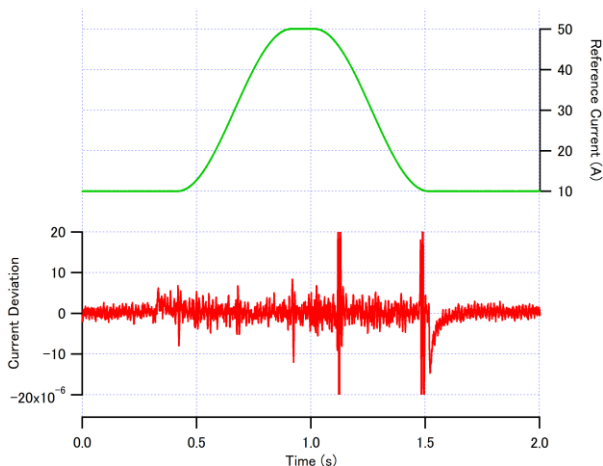


図 2：従来の学習制御を用いた時の電流指令値（正弦波補間）および、電流偏差。電流立下り時の二か所の大きな電流偏差は、電源出力電圧が 0 を通過する時に対応するが、ビーム取出し後なので偏差は大きくてよい。

3 追従誤差の原因と対策

本章では、次章で述べた二つの問題点である、リップルの増大および電流指令値の変化開始（終了）時に伴うスパイク状の電流偏差についての原因および解決法をそれぞれ述べる。

3.1 アベレーシングの手法

式(1)をみればわかるように、電流偏差($I_{ref} - I_{out}^0$)にリップルがある場合、学習制御によって得られた計測インピーダンス $Z(s)$ にはそのリップル成分も含まれる。そのため、その $Z(s)$ を使って電圧フィードバックを行うとリップルを増大させてしまう。

そこで、我々は $Z(s)$ に重畳されるリップルを除去するために、式(1)の $Z(s)$ を複数回測定し平均化する事を考案した。具体的には、

$$\overline{Z(s)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K \left(1 + \frac{1}{Ts}\right) \left(\frac{I_{ref} - I_{out}^i}{I_{out}^i}\right) \quad (2)$$

としてインピーダンスパターンを得る。ここで、 N は平均化に使うサイクル数で i は各サイクルのインデックスである。この様に、インピーダンスを平均化してやればサイクルと非同期であるリップルはキャンセルさせる。実際にアベレーシングを行った時の測定結果を図 3 に示す。早い振動に対応する電流偏差（下図）の線幅が変化しておらず、アベレーシングの効果を見てとれる。ただし、本手法のみでは二つ目の問題点である電流指令値変化開始（終了）時の電流偏差のスパイクは改善されない。

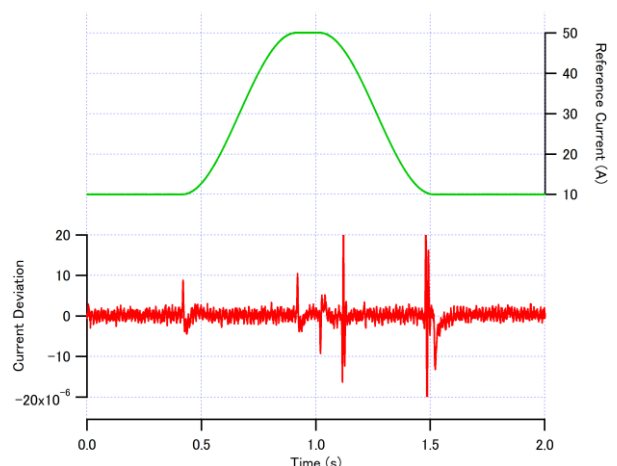


図 3：アベレーシング法を用いた時の電流指令値（正弦波補間）および、電流偏差。

3.2 電流指令値の最適化

我々の試験電源および J-PARC 主リングの新電磁石電源として提唱している方式（図 4）[1,2,3]では、電圧型のインバータを用いている。そこでは、インバータのスイッチング素子 IGBT の On 期間（duty）を指令して、出力電圧 $duty \times V_{DC}$ を出力させている（ V_{DC} はインバータへの直流入力電圧）。また、インバータと負荷の間にスイッチングリップル除去用の RLC フィルタがあり、図 5 にその構成を示す。

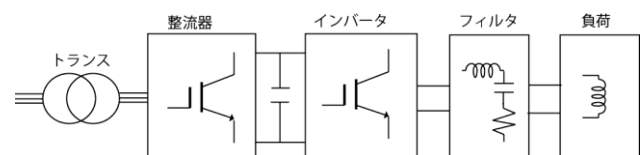


図 4：J-PARC 主リングの新電磁石電源の概念図。今回の試験電源も同様の方式である。

図 5 のフィルタ構成から負荷に流れる I_{out} とインバータの出力電圧 V_{out} との関係は

$$V(t) = \dots + C_2 L_{fil} L_{mag} \frac{d^3}{dt^3} I_{out}(t) \quad (3)$$

と表され、 I_{out} の三次導関数まで含む。そのため、 I_{out} として立上がり（下がり）部が正弦波であった場合、電流最大（最小）値とのつなぎ目部分のインバータ出力電圧 V_{out} がデルタ関数になってしまい、実際のインバータではその様な電圧は出力できない。これが原因で、電流指令値の変化開始（終了）時にスパイク状の電流偏差が表れていると考えられる。

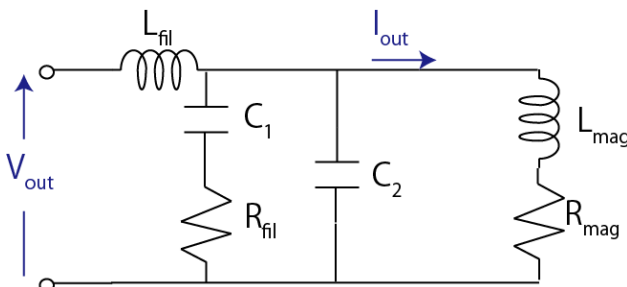


図 5：スイッチングリップル除去用 RLC フィルタ。

そこで、我々はインバータ出力電圧 V_{out} が滑らかに変化するような電流指令値を用いる事を考案した。多項式関数で補間する場合は最低 7 次の関数になる。実際に、7 次関数を使った電流指令値での測定データを図 6 に示す。問題であったスパイク状の電流偏差がなくなり、追従誤差を限りなくゼロ（ \approx ppm）に近づける事ができた。

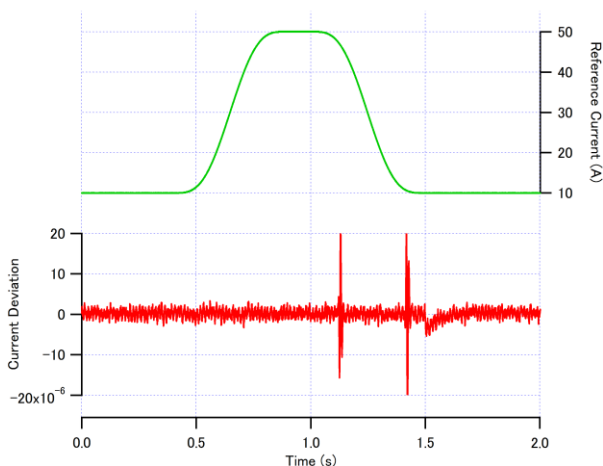


図 6：アベレージング法を用いた時の電流指令値（7 次関数補間）および、電流偏差。

5. まとめ

J-PARC 主リングのようなシンクロトロン加速器の電磁石電源において、出力電流の追従誤差がビームロスを引き起こす現象が以前から知られており、その対策としていくつかの手法が用いられてきた。

我々は従来の学習制御による追従誤差の除去方法を発展させ、追従誤差を限りなくゼロに近づける事を考案し、原理実証を行った。従来の学習制御方法では、それにより求めた負荷インピーダンスにリップルが重畳されてしまう問題があったが、これに対しては、複数回の学習制御で測定したインピーダンスを平均化しリップル成分をキャンセルする手法で解決した。また、電流指令値の変化開始（終了）時のスパイク状の電流偏差に関しては、インバータ出力電圧が連続になるように、インバータ出力フィルタの効果を考慮に入れて電流指令値を最適化することで消去することに成功した。

以上の新手法により、電磁石電源の追従誤差を限りなくゼロ（ \approx ppm）に近づける事ができた。

謝辞

本研究を進行するに当たり予算等様々な面で支援頂いた高エネルギー加速器研究機構、加速器研究施設主幹、内藤富士雄氏および小関忠氏に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] K. Koseki, et al., “Development of a High Power NPC Inverter” 第 9 会日本加速器学会年会, Osaka, Aug.8-11,2012
- [2] Y. Kurimoto, et al., “A Common Mode-less Power Supply Operation with NPC inverters” 第 9 会日本加速器学会年会, Osaka, Aug.8-11,2012
- [3] K. Koseki, et al., “A Capacitive Energy Storage and the Energy Recovery System for Synchrotron Magnet” 第 9 会日本加速器学会年会, Osaka, Aug.8-11,2012
- [4] 山崎、他、“群馬大重粒子線照射施設用変更電磁石電源の開発” 第七回日本加速器学会年会、プロシーディングス 2010
- [5] 中野・松本、“学習制御による加速器の制御” 日本機械学会誌 93(856), 187-191, 1990-03-05