

マイクロコンピュータによる電流フィードバック制御

鈴木善尋

高エネルギー加速器研究機構 技術部

概要

加速器研究機構の12 GeV加速器から取り出される陽子ビームを実験装置に導くために大きな電磁石が多数使用されています。この電磁石電源はアナログ・フィードバック回路により 1×10^{-4} の出力電流の安定性能を得ています。今回32ビットマイクロコンピュータを使用して電流の制御を行い、 1×10^{-4} 以上の安定性能を得ることができましたので報告します。

1 はじめに

当研究機構の12 GeV陽子加速器からの陽子ビームを使用する物理実験を行うカウンターホール実験室にはビームを操作するためのビームラインとそれを構成する多数の電磁石があります。電磁石の電流の安定性は 10^{-4} を得るためにOPアンプ等を使用したアナログのフィードバック回路が電磁石電源内部で使用されています。特に当方の職場で使用されている電磁石電源は広い範囲に分散配置されています。そのため、その電源装置の維持管理の合理化するために、回路の改良を進めているところです。維持管理の合理化は、広い範囲の多くの電磁石電源をコンピュータにより集中管理、リモート監視を行い、合理的な維持管理作業の計画立案が重要です。そのために、電磁石電源に組み込むための高性能マイクロコンピュータ基板の開発試作・試験を行いました。そのことは、KEK技術交流会(平成15年2月7日)にて、「コンピュータによる電磁石電源の維持管理」として報告しているところです。今回の報告は、その時に開発が完了しました32ビットマイクロコンピュータカードを用いて、電磁石電源の電流の安定化のプログラム開発及び動作試験についてのものです。簡単なプログラムによりアナログ回路同様の電流安定性能を得ることができました。

2 電磁石電源の制御用インターフェースについて

電流の制御を行う場合、電流のモニター部分、電流を操作する部分、さらに電力を調整する電源本体・パワー部分が必要です。図1において、このブロック図は現在一般に行われている電源のリモートコントロール(遠方操作監視)にも似ています。通常、DAC、ADC、及びCPUボードは電源の筐体の外部に或程度の距離が離れた場所に設置されます(インターフェース装置として)。それは多数の電源装置のリモートコントロールやモニターを効率良く行うためで、マルチプレクサ等が内部に配置されます。このようなシステムでは、電磁石電源本体が電流の安定性能(仕様)を決めています。この場合、ADC、DACは単なるモニター・操作としての入出力カードとして動作します。CPUなる部分は中央のコントロール室にある場合もある、あるいは、かなり離れた場所にLAN等で結ばれ配置されます。一般的な制御監視では、装置(電磁石電源)固有の性能(電流制御)を肩代わりすることはしません。それは、単にアナログの入出力や、デジタル接点信号の入出力に、つまり人間の目としてモニターし、人間の手としてツマミを回すことを代行することに徹しているからです。LAN等が制御ループの中に入るため必要な性能(高速なフィードバック制御)が確保出来ないのです。一方、このADC、DAC、CPUが電磁石電源と一体の場合においては、それらのカードはCPUバスで直結されますので、デジタルのフィードバック制御が可能となります。こ

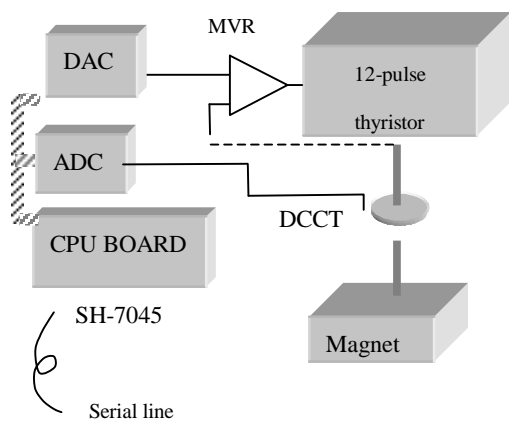


図 1 電流の制御

の電流の制御については、14年ほど前に8ビットマイクロコンピュータ(Z80)にて動作を確認しています(参考文献1)。今回の電流制御にはADCカードは積分型を使用して電流値を直接読みとっています。分解能は18ビット以上ありますので十分に1万分の1の制御が可能です。また、32ビットCPUとそのソフトの開発環境が優れているために、数値演算のソフトの開発には全く神経を使いません。以前の場合8ビット、特にZ80の場合アセンブラでプログラムを書いていたので、数値演算をどのように簡略・高速化するかで悩みました。今回の場合は大変楽です(スピードが十分速いことと数値演算の関数が利用できる)。以前に比べて便利になったことは以下の点で

す。

1. ソフトの開発環境が大変良くなった(PC-98からWindows)
2. アセンブラからC言語になった
3. ROMベースからフラッシュROMになり短時間でプログラムの変更が可能
4. ノートパソコンを使用して現場でプログラムの編集、動作試験が短時間で行える
5. 課題としては、多数の装置に組み込まれたマイクロコンピュータとの通信方法をどうするか?安価で製作、敷設保守が容易なものが好ましい。どのような規格、通信プロトコルを用いるか?このことは次回のテーマとします。

3 電流の制御

電流制御試験のセットアップの状態を図2に示します。大きな電磁石の背後に電磁石電源があります。電磁石電源の高さは1.8メートルです。電流の制御回路のブロック図は図1そのものです。図3にマイ

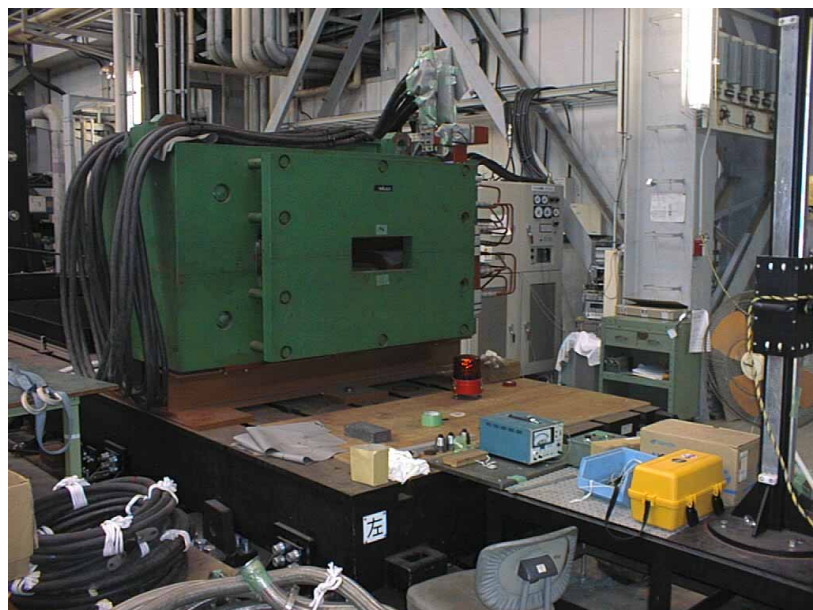


図 2 電源の安定度試験

クロコンピュータ関係、ADC、DAC、安定性の測定器類を示します。電磁石の抵抗値は抵抗計により測定し求めます。電磁石の時定数は電流の減衰をオシロスコープで記録し、減衰時間、抵抗の値から計算で求めます。この電磁石(8D320)の場合は約1.7秒でした。74ミリオーム、126ミリヘンリーです。使用した電源は12相のサイリスタ電源で、出力は166ボルト、3000アンペアの定格です。DCCT(直流変流器:電流測定器)はHitec社製1000アンペア10ボルト出力のものです。電流

の制御に使用した回路はCPUボードとして日立の32ビットマイクロコンピュータSH2-7045、ADCボードは積分型22ビットTMS-9914、DACは16ビット0~10ボルトの絶縁型ボード、カードの共通事項はSTD-BUS

仕様です。このようなカード類はすでに電磁石電源の制御用として開発済みであり 10 年ほど前からビームラインのコントロールに使用しているものです (CPU ボードを除き)。図 3 ではそのカード類が STD - BUS のラックに装着されています。安定性の確認、測定用の機材としては、フルーク社の 335A: 電圧標準 (図 4) を用いて電流の安定性を 1 万分の 1 以上の精度で測定します。



図 3 試験回路と測定器

335A からの測定結果はマルチメータでデジタル化し Windows - PC で記録します。

その他の測定器は横河のパワーメータです。これにより、電源装置のパワー、力率を測定します。



図 4 標準電圧発生器 335A

電流の制御プログラムは 2 つの要素について簡単な計算を行い、サイリスタをドライブする電圧を発生します。2 つの要素とは、1 番目は、電磁石の抵抗分による電圧、2 番目はインダクタンスに発生する見かけの電圧です。以下に電流制御の概略の式を示します。

Set : 目標値 (設定したい電流値)

Adc : モニタ値 (磁石に流れている電流値、Adc からの読み)

Cv : インダクタンスにより発生する逆起電力に対抗して加える電圧分

Dac_base : 電磁石の抵抗部分にかかる電圧を出力する時の電磁石電源の参照電圧 (Reference)

ループの処理 :

$$\text{error} = \text{Set} - \text{Adc}$$

$$\text{Cv} = \text{error} * \text{K1} \quad ; (\text{K1 の値としては } 4, 5, 6, 7, 8 \text{ 等})$$

$$\text{Dac_base} = \text{dac_base} + \text{error} * \text{K2} \quad ; (\text{K2 の値としては } 1/2, 1, 2 \text{ 等})$$

$$\text{Dac_set} = \text{dac_base} + \text{Cv}$$

Dac_set の値を D A C に出力し電源の出力を変化させる

ループの end

4 動作試験・結果

電流のデジタルフィードバックの試験は上記のセットアップで行いました。電流の安定性の最適値を求めるために、上記のプログラムに示すように、変数 K 1、K 2 を変化させながら電流の安定性を確認しました。また、A D C の変換速度を 20 ミリ秒と 100 ミリ秒に変えて、電流制御ループのスピードを変えた場合の電流安定性を調べました。それは A D C の変換速度が 20 ミリ秒の場合は電流の制御ループが 1 秒間に約 50 回動作することを意味します。同様に A D C 変換速度 100 ミリ秒の場合は電流制御を 1 秒間に 10 回行います。動作試験以下の 2 つの条件で行いました。

- 1) A D C 20 ミリ秒の変換により毎秒 50 回の電流制御、この場合には電源のアナログ電圧フィー

ドバック制御無しの条件（サイリスタの位相制御回路に直接制御電圧を加える）

- 2) A D C 100 ミリ秒の変換、毎秒 10 回の電流制御を行う。この場合外乱（ライン変動）の除去が苦しいのでマイナーな電圧安定化回路（簡単なアナログのフィードバック回路を補助的に付加する）

電流制御のブロックダイアグラムは図 1 であり、その中のアナログのフィードバック回路がある場合と無い場合です。

運転電流はどちらの場合も 1000 アンペアで行いました。その他の条件としては、加速器 12GeV-PS が運転中であり、ライン変動は 2 秒の周期で発生しています。

電流の安定度は 3 D C C T の出力を 335 A により測定しました。その結果はアナログ出力されますので、マルチメータで読み Windows-PC により記録します。条件 1) の結果を図 5 に条件 2) の結果を図 6 に示します。

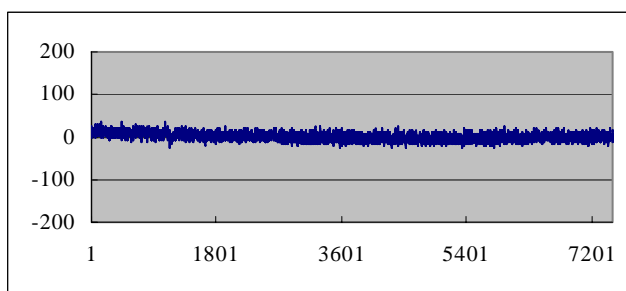


図 5 50Hz 動作 MVR 無し

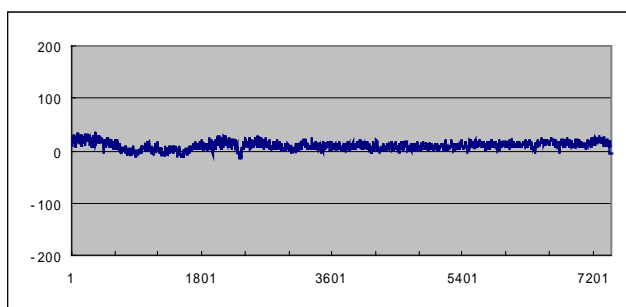


図 6 10Hz 動作 MVR 付

図 5、図 6 の縦軸は ppm であり、100ppm で 1 万分の 1 の変化を表します。横軸は秒であり、グラフは 7200 秒分であり 2 時間の記録です。どちらの場合も十分に 10^{-4} の電流安定の性能を持っています。

5 今後やるべきこと

電磁石電源の維持管理の合理化のために既存の制御回路基盤が再利用できるマイクロコンピュータの開発が完了し、その CPU ボードにより電磁石電源の基本仕様である電流の安定化もソフトで処理できることが確認できた。このことにより電磁石電源は特殊な装置の製造物ではなく、一般的な整流電源として製作し、その後に高性能 DCCT と電源のコントローラを付加することにより、容易に電流安定度の高性が実

現できる。今後の開発確認部分は、このマイクロコンピュータが多数の電磁石電源内部に分散配置された

場合に使用する安価な通信ライン（電源装置の集中管理とコントロールのための）のプロトコルの開発である。

参考文献

- [1] Development of a computer-controlled magnet power supply for KEK PS beam lines, Yoshihiro Suzuki and Minoru Takasaki, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A293 (1990) 253-257, ICALEPCS Vancouver, BC, Canada, October 30 – November 3, 1989.