

## PWM 制御用マイコンを応用したビーム振分電磁石電源の制御回路

### CONTROL CIRCUIT OF POWER SUPPLY FOR BEAM DISTRIBUTING MAGNET, AS AN APPLICATION OF PWM CONTROLLER MICROCOMPUTER

森 均<sup>#A)</sup>, 徳地 明<sup>A)</sup>, 古川 和弥<sup>B)</sup>, 譽田 義英<sup>B)</sup>

Hitoshi Mori<sup>#A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>A)</sup>, Kazuya Furukawa<sup>B)</sup>, Yoshihide Honda<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Pulsed Power Japan Laboratory Ltd. (PPJ)

<sup>B)</sup> Osaka University, The Institute of Scientific and Industrial Research

#### Abstract

A chopper control circuit applying a microcomputer, mainly used for PWM (Pulse Width Modulation) control of motor drive inverters, was fabricated in a beam distribution magnet power supply. Advantages to the conventional analog control are as follows. Using digital filter to remove noise on the feedback signal, adjustment of the filter parameters corresponding to the noise waveform and level becomes easier. Although the optimum values of the feedback control constants vary depending on the load magnet, in digital control, it is possible to change these feedback control constants without adjusting the hardware, etc.

#### 1. はじめに

加速器から連続したパルスとして取り出される高エネルギー荷電粒子ビームを数 Hz 以上の高頻度で複数のラインに振り分けるためのビーム振分電磁石電源としては、一般的にパルスビームの時間幅が  $\mu$  秒以下のオーダーと短いことからパルス電磁石にコンデンサ放電によるパルス電流を流して励磁する方法が用いられてきた。このパルス励磁の場合は、短時間に電流を立ち上げることに必然的に数 kV~数十kV といった高電圧のスイッチング素子が必要となり、サイクロンや高電圧サイリスタを使用したコストの高いものとなり、また電磁石コイルも高電圧に耐える絶縁を要していた。[1]

大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設では 40MeV-L バンド電子ライナックの電子ビームをショット毎に第一照射室と第二照射室に 10pps で振り分ける偏向電磁石の設置を計画しており、そのためのビーム振分電磁石電源を今年度先行して試作した。

本電源は 300V の直流電源を入力とし、正負両極性のチョッパ回路により出力電流として High レベルと Low レベルの 2 値を交互切替し、 $\pm 300V_p \pm 100A$  平均電力 10 kW までの範囲で連続した台形波状の電流/磁場を生成することができる。また、大電流を両極性で交互に出力しながら徐々に電流値を下げて行くことにより、電磁石鉄心の残留磁束を除去する消磁操作を可能としている。

台形波状パターン出力電流を制御するチョッパ電源の制御回路の要部は従来の製作例ではアナログ演算回路を使用するのが一般的であったが、本電源においては可変速モーター駆動制御に適用されている PWM (Pulse Width Modulation: パルス幅制御) 用マイクロコンピュータを採用したので、その利点について以下に報告する。

#### 2. 回路構成

##### 2.1 主回路構成

Figure 1 は本電源の主回路構成を示すブロック図である。主回路は 3 個のチョッパ回路アセンブリを入力側および出力側で各々並列接続しているが、その内 1 個のみを

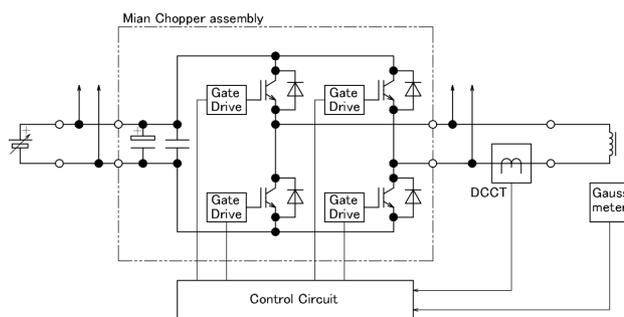


Figure 1: Block Diagram of Main Chopper.

のみを図示しており、他の 2 個は省略している。試験用に定格電流 30A の電磁石を使用したので、1 個のチョッパ回路アセンブリだけを接続して低電流領域での制御性能を評価した。

##### 2.2 制御回路構成

次ページの Fig. 2 は本電源の制御回路構成を示すブロック図である。操作作用のコンピュータとは LAN 接続とし、定電流制御/定磁場制御の切替指令、High レベルと Low レベルの制御目標値(各電流値-100A~100A およびガウスメータ出力電圧値-4V~4V、安定度はフルスケールの  $\pm 0.1\%$ )、運転 ON/OFF の切替指令等の操作を行う。

出力電流のフィードバックは内蔵の DCCT により、また電磁石磁場のフィードバックは外部ガウスメータのモニタ出力をアナログ信号として入力し、制御回路内でレベルシフトを行ってマイクロコンピュータ内蔵 A/D 変換回路に入力している。今回使用したマイクロコンピュータ内蔵の A/D 変換回路は入力電圧範囲が 0V~5.0V の正極性に限定されているため、フィードバック信号のゼロ点を A/D 変換回路入力電圧 2.5V に対応させるレベルシフト回路を設け、レベルシフトや A/D 変換等のアナログ演算の基準となる電圧源としては基準電圧 IC を用いて温度ドリフトを抑制している。

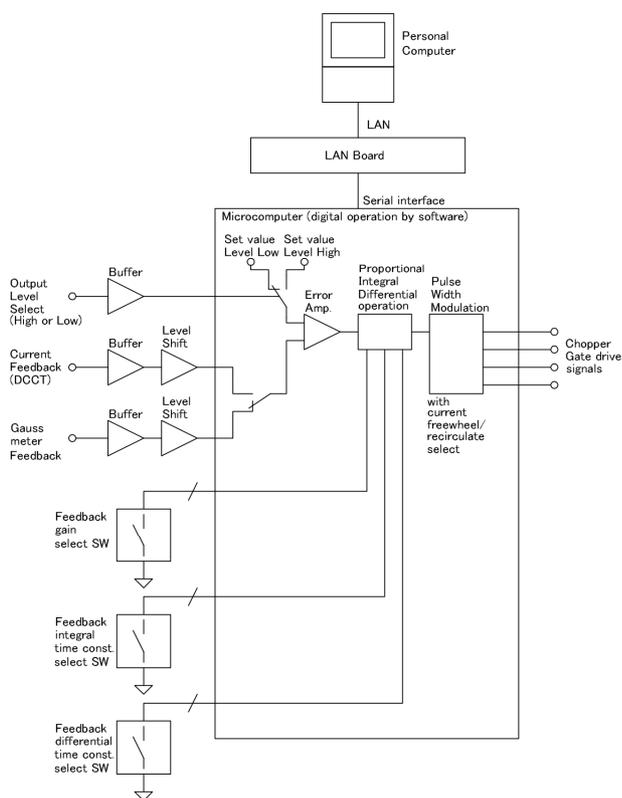


Figure 2: Block Diagram of Control Circuit.

### 3. マイクロコンピュータ制御の利点

#### 3.1 調整可能なフィルタ定数

Figure 2 には表記していないが、マイクロコンピュータのプログラムは、A/D 変換後の出力電流およびガウスメータ出力のフィードバック信号に対し、デジタル処理による一次遅れフィルタを通してノイズ除去を行っている。

この一次遅れフィルタの時定数は、図に示したフィードバック制御ゲインおよび時定数選択スイッチ同様、多接点のデジタルスイッチにより切り替え可能としており、装置の設置環境等により、ノイズの影響による安定度低下と制御の即応性とのバランスを取りながら調整することが可能である。

#### 3.2 最適化が容易なフィードバック定数

本電源ではPIDフィードバック制御を採用しているが、比例/積分/微分の各制御係数・時定数には電磁石のインダクタンスや抵抗の値に応じた最適値が存在し、電磁石を変えた場合には、これらの各制御係数・時定数を再調整する必要がある。制御係数・時定数が不適切な場合には電源の制御目標値の変化に対して過渡応答が振動的となったり、応答遅れ時間が長くなる等の問題が生じると考えられる。

#### 3.3 コンピュータ制御との親和性

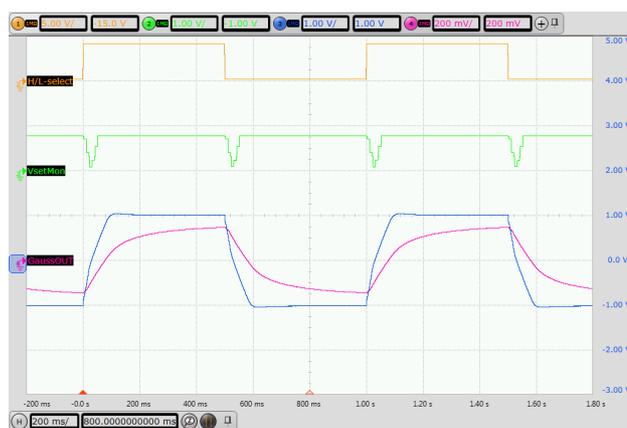
今回採用した PWM 用マイクロコンピュータはシリアル

通信ポートを有しており、小規模なインタフェース回路を追加することで標準的なTCP/IPプロトコルによるLAN接続を介してコンピュータからの制御を行うことが容易である。本電源では電源スイッチと非常停止押釦以外の操作はコンピュータ制御としており、Windows パーソナルコンピュータ上のコンソールプログラムにより運転試験を行っている。

## 4. 直流用偏向電磁石のパルス励磁運転例

### 4.1 定電流制御での運転例

Figure 3 に定電流制御で直流用偏向電磁石のパルス励磁を行った時の電流およびガウスメータ出力波形の例を示す。直流用偏向電磁石はブロック状の鉄心を有しており、渦電流により磁場の立ち上がりは電流よりも遅くなるので電流が設定値に達した後も磁場は徐々に増加する。

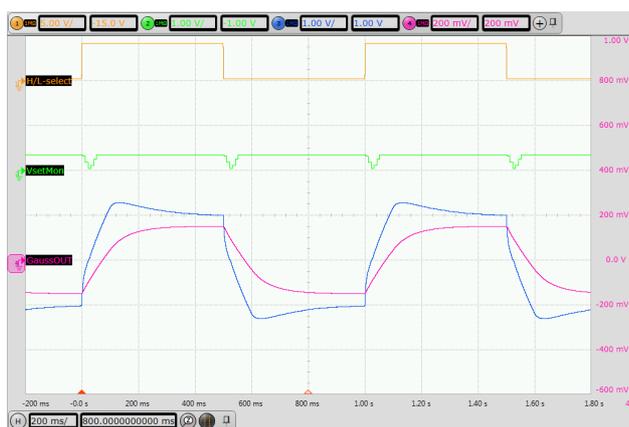


CH1(Yellow): Output Level Select Signal[5V/div.]  
CH2(Green): Set Value Monitor (Absolute Value)  
[1V/div.]  
CH3(Blue): Current Monitor [10A/div.]  
CH4(Red): Gauss Meter Output [200mT/div.]  
Sweep: [200ms/div.]

Figure 3: Constant Current Control.

### 4.2 定磁場制御での運転例

次ページ Fig. 4 に定磁場制御で前項と同じ直流用偏向電磁石のパルス励磁を行った時の電流およびガウスメータ出力波形の例を示す。直流用偏向電磁石はブロック状の鉄心を有しており、渦電流により磁場の立ち上がりは電流よりも遅くなるので磁場を立ち上げるために PWM 制御の duty は 100%の全開となって電流波形はオーバーシュートする。磁場が一定値となった後も電流は徐々に低下する。この運転例ではガウスメータの磁場検出部を磁極の中心に配置したが、鉄心に流れる渦電流は鉄心側面近傍で最大値となり、磁極中心に向かって徐々に減衰すると考えられ、磁極中の磁場分布は渦電流が消失した後の直流励磁の場合よりも一様性が低いと予想される。直流用偏向電磁石をパルス励磁する場合



CH1(Yellow): Output Level Select Signal[5V/div.]  
CH2(Green): Set Value Monitor (Absolute Value)  
[1V/div.]  
CH3(Blue): Current Monitor [10A/div.]  
CH4(Red): Gauss Meter Output [200mT/div.]  
Sweep: [200ms/div.]

Figure 4: Constant Magnetic Field Control.

には積分磁場を測定してビームの受ける平均的磁場を  
励磁タイミングの時間関数として把握しておく必要がある。

## 5. まとめ

10Hz の高頻度で複数のラインに振り分けるための  
ビーム振分電磁石電源の制御に PWM 用マイクロコン  
ピュータを採用したチョップ電源を製作した。調整可能な  
フィルタ定数、最適化が容易なフィードバック定数、コン  
ピュータ制御との親和性等の利点があり、今後更なる大  
電力、高精度電源への展開が期待される。

## 参考文献

- [1] THE PULSED MAGNET SYSTEM FOR THE  
SIMULTANEOUS INJECTION OF KEK-PF AND KEKB  
RING;  
<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac2009/papers/mo6pfp018.pdf>