

# Excitation current waveform ornamentation of a synchrotron pulse power supply

S.Yamanaka<sup>A)</sup>, Z.Fang<sup>A)</sup>, K.Egawa<sup>B)</sup>, K.Endo<sup>B)</sup>

A) National Institute of Radiological Sciences(NIRS),  
Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi-, Chiba 236-8555,Japan

B) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0801, Japan

## Abstract

A resonant type pulse power supply, for an application to a compact proton and/or heavy ion synchrotron with a several Hz repetition rate, is attractive from the view point of attaining large average beam current that is enough for the radiation therapy. Maximum ampere-turn of the dipole magnet is as large as 200 kA to make the bending radius as small as possible. Pulse current is generated by discharging the stored energy in a capacitor bank through a pulse transformer.

But the flat bottom for the beam-injection period is not securable because a slope of magnetic field is sharp at injection time. In order to add an injection period (10 ~ 20 $\mu$ s), the excitation current waveform ornamentation of a synchrotron pulse power supply. The improvement circuit was designed for the injection period and the simulation (Spice) of this circuit was carried out for any solution.

## 1. はじめに

開発中の小型陽子シンクロトロンはエネルギー2MeVで入射し200MeVで取り出す。リングは4台の偏向電磁石で構成されており、曲率半径は0.72mである。医療用加速器として普及型を目指しているために非常にコンパクトになっている。その偏向電磁石の最大磁場は3Tであり、励磁電流のピーク値は200kAである<sup>[1][2][3]</sup>。その大電流を発生させる電源は、図1に示すように、エネルギー蓄積コンデンサー $C_0$ 、サイリスター（SCR）の放電スイッチ $S_0$ 、ステップダウン用のパルストランス $Tr$ 、充電回路 $E_0$ とで構成される。図2にその写真を示す。偏向電磁石 $L_m$ はインダクタンスを小さくするためにコイルは1ターン

の設計である。充電時間は、電磁石の冷却や電源 $E_1$ の小型化のために約1秒弱とした。充電完了後サイリスターをオンにして、電磁石へ放電電流を流すことで電磁石を半正弦波で励磁させる。磁場波形は半正弦波であるために、通常の速い繰り返し用共振型電源とは異なり $\sin$ の $\theta$ が0付近（共振型は $\pi/2$ 付近）で入射する。磁場傾斜が $\cos\theta$ 付近となり、磁場の必要な精度においてのフラットボトムを十分に確保できない。そこで入射時間（10 ~ 20 $\mu$ s）を十分確保して、マルチターンによる入射でビーム強度を上げる。入射時間確保のために電源の改良を行い電磁石の励磁電流波形の修飾をする。

方法は、 $C_0$ を放電する前に、別の $C_0$ よりも小さい容量のコンデンサー $C_1$ に入射磁場を発生する電圧で充電させて放電させる。その状況においての磁場の

ピーク付近（傾斜が0付近）において時間10 ~ 20 $\mu$ sのフラットボトムを作る。

この回路の問題点は、入射と加速の切り替えのときにおける励磁電流の乱れである。切り替えはそれぞれのコンデンサーに繋いだサイリスターで行う。半導体スイッチにはサージ電流等のノイズが発生しそれが励磁電流の乱れになる。この報告では、改良回路のシミュレーションを行って、回路の動作確認を行ったと共に、切り替え時の乱れの問題を見出し、それに対する方策を考え、精度が保てることを示す。

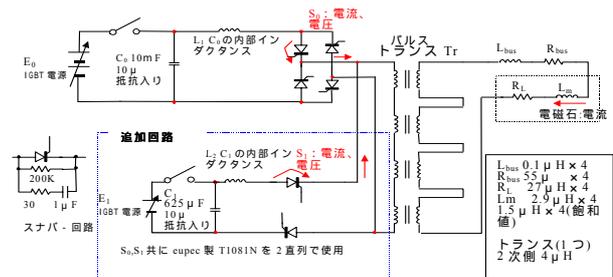


図1 電磁石とパルス電源の回路図

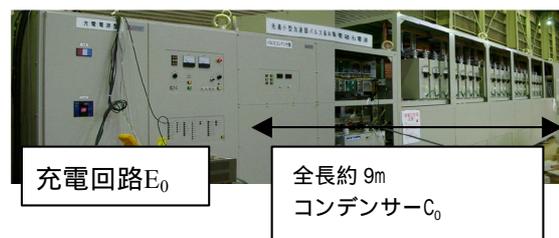
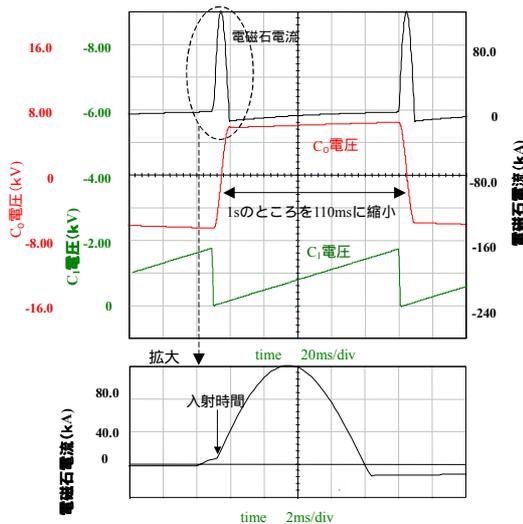


図2 電源装置

## 2. 回路構成と動作原理

### 2.1 動作原理

図1に改良される電源の回路図を示す。シミュレーション結果における電磁石電流と加速用コンデンサー $C_0$ 電圧と入射用コンデンサー $C_1$ 電圧のそれぞれの波形を図3に示す。回路の動作は既に述べたように、 $C_0, C_1$ をそれぞれの充電回路 $E_0, E_1$ によって充電させ、入射用サイリスターユニット $S_1$ をオンにして $C_1$ を放電させ磁場を立ち上げる。そしてピーク付近を入射時間とする。次に加速のためにサイリスターユニット $S_0$ をオンにして $C_0$ を放電させ加速磁場を立ち上げる。ここで $S_0$ オン時には、 $S_1$ にとって $C_0$ の電圧が転流電圧となり自動的に $S_1$ はオフになる。取り出しが終わり、励磁電流が0付近になれば保持電流以下となり、 $S_0$ はオフになる。次の $C_0$ の充電は負の電圧で充電する。そのことにより、充電電流が小さくなり充電回路 $E_0$ の容量を小さくすることができる。そのために次の $S_0$ の動作は転流方向でオンさせる<sup>[4]</sup>。これを交互に繰り返す。



電磁石の磁場飽和は無いとして計算した。

図3 シミュレーションによる動作確認

### 2.2 コンデンサーとの共振

コンデンサー $C_0, C_1$ とパルストランス $Tr$ を含めた電磁石 $L_m$ との共振周波数 $\omega_0$ は

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_0 \cdot n^2 L \{L_m / (L + L_m)\}}} \quad (\text{結合係数を1とした})$$

となる。ここで $Tr$ の2次側のインダクタンスを $L$ とし、1次2次の巻き数比を $n$ とした。

加速時間を約5msとしたために、共振周波数は約50Hzである。それと蓄積エネルギーとの関係によって $C_0$ を10mFとした。図4に今回用いる電磁石 $L_m$ の1台を励磁した実験結果を示す。 $C_1$ については、容量が大きいほど、入射時間が長くできかつ温度による容量変化にも対応できる。しかし、 $C_0$ と同じにすると

コストが上がるために、温度特性による容量変化を保証できかつ必要な入射時間を確保できる限度まで容量を小さく( $C_1$ と $L_m$ との共振周波数を大きく)する必要がある。図5にコンデンサーの容量変化とそれに対応できかつ入射時間10 $\mu$ sで精度を保てるときの最大の共振周波数との相関を示す。本機を設置するのは病院の中であり温度変化は少ないと考えると、変化を2%以下程度と想定した場合、共振周波数が200Hzとなる。そのときの $C_1$ は625 $\mu$ Fとなる。以後 $C_1$ はこの値で計算した。

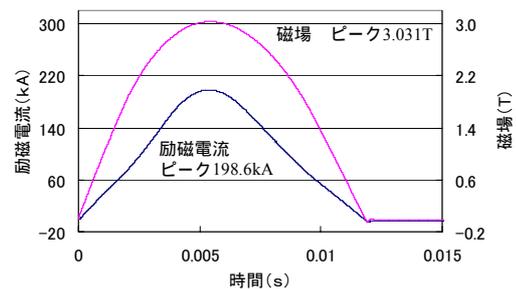


図4 電磁石励磁試験

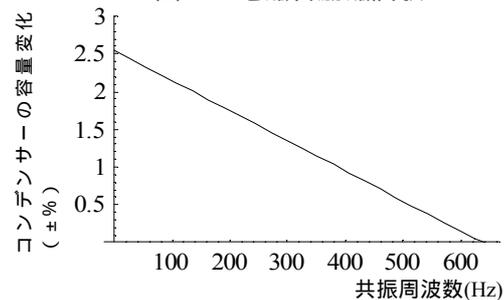


図5 コンデンサーの容量変化とそれに対応し10 $\mu$ sを確保できるときの最大の共振周波数との相関

## 3. シミュレーション結果

### 3.1 半導体スイッチ

$S_0, S_1$ はサイリスターを用いる。切り替え時における $S_0, S_1$ のそれぞれの電流、電圧のモード図を図6に示す。図7に $S_1$ オフ時、 $S_0$ オン時における乱れ電流の流れ方を示す。図7に示すように $S_1$ はオフ時に逆電流が流れる。その際にフリーホイールダイオードとしての役割を持つオン時の $S_0$ に $S_1$ の逆電流と同じ電流値で位相が逆のサージ電流が生じる。その電流は図7に示すように、ほとんどは $S_0$ に流れるが、僅かに電磁石に流れる。電流波形精度を高めるためにその量を計算する必要がある。

### 3.2 スナバーの効果

図3のシミュレーション結果により毎周期ごとに入射用の波形と加速用波形がこの改良された回路で出力されることがほぼ確かめられた。

$S_0, S_1$ と $C_0, C_1$ の内部とそれを繋ぐ配線にはインダクタンスがある。この量の如何によっては3.1で述べたサージ電流による乱れが大きくなる可能性がある。この量を出るだけ少なくする様に組み立てる他に、回路を組む上で両サイリスターに図1に示すようにスナバー回路を付けて乱れを抑える対策をする。図8に電流乱れに対するスナバー効果が顕著に現れる $S_1$ のオフ時の電圧波形を示す。図8に示すようにスナバー回路によって $S_1$ のオフ時における電圧の乱れは小さくなったことがわかる。また、内部イ

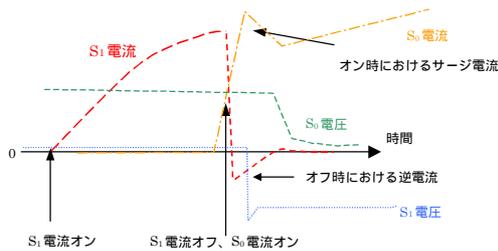


図6 切り替え時における $S_0, S_1$ のそれぞれの電流、電圧の模式図

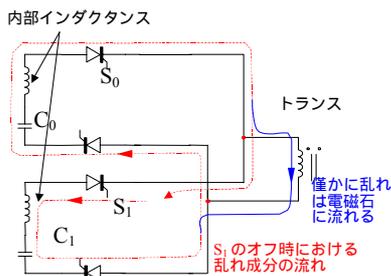


図7  $S_1$ オフ時、 $S_0$ オン時の乱れ電流の流れ

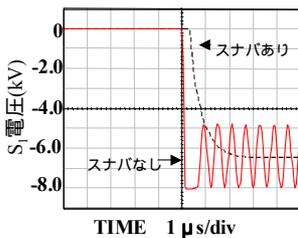


図8  $S_1$ オフ時における電流の乱れに対するスナバー効果

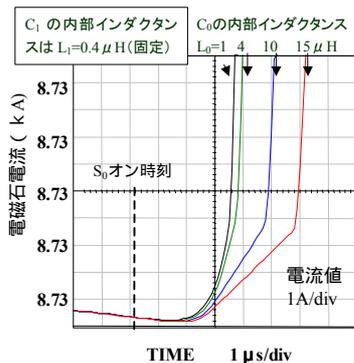


図9 内部インダクタンス ( $L_0$ ) を変えたときにおける電磁石電流の乱れ

ンダクタンスを変えてシミュレーションをしたところ、スナバーが無い場合にはインダクタンスが大きいかほど乱れは大きくなるが、スナバーがある場合にはそれによる乱れの吸収が大きくなり、内部インダクタンスの予想内の値に対してビームの加速に影響する乱れはないことが分かった。図9にスナバーがある場合で内部インダクタンスを変えたときの電磁石電流の切り替え時刻付近におけるシミュレーション結果を示す。図9より $S_0$ オン時における電流立ち上がりの遅れは、内部インダクタンスが大きいかほど大きくなるが、ビームの加速に影響する電流の乱れはないことが分かった。

### 3.3 充電回路の精度の影響

充電回路 $E_0, E_1$ には何らかのリプル等のノイズが発生する。これについても電源の応答を調べるためにシミュレーションを行った。設定は $E_0, E_1$ において、ホワイトノイズと50HzのフィルターノイズとIGBTのスイッチングのノイズにそれぞれ充電電圧のピークに対して、常時 $10^{-3}$ の振幅を持たせる。その結果は図9と同様にビームの加速に影響する電流の乱れはなかった。これは、切り替え時において $E_0, E_1$ と $C_0, C_1$ との間はIGBTによって接続が切れているのと電源は共振回路なので影響が少なくて済むと考えられる。

その他の乱れは、 $S_0, S_1$ にコモンノイズが乗ることが考えられる。しかしこれについては実機で実験を行う予定である。

## 4. まとめ

- ・ シミュレーションにより毎周期ごとの入射用と加速用の電流波形がこの回路で出力されることが確認はできた。
- ・ 入射 加速切り替えにおける電流乱れの内容が確認できた。逆電流によるサージ電流の電磁石電流への影響は配線、内部インダクタンスの値が予想内で有ればスナバー回路によって対策できると分かった。また充電電源のリプル等の影響は少ないことが分かった。

## 参考文献

- [1] K.Endo et al, "Compact Proton and Carbon Ion, Synchrotron for Radiation Therapy," Proc, EPAC2002, Paris, pp.2733-5.
- [2] K. Endo et al, "Development of High Field Dipole and High Current Pulse Power Supply for Compact Proton Synchrotron," PAC'03, Portland, to be published.
- [3] K. Endo et al, "Development of Compact Proton Synchrotron for Radiation Therapy," ARTA2003, Tokyo, to be published.
- [4] K. Endo et al, "Resonant Pulse Power Supply for Compact Proton and/or Heavy Ion Synchrotron," Proc. APAC2001, Beijing, pp.636-8.