

MULTI-HARMONIC RF ACCELERATION SYSTEM FOR ION SYNCHROTRON

H. Nishiuchi^{A1}, K. Saito^{A)}, K. Masui^{B)} and K. Moriyama^{B)}

^{A)}Power & Industrial Systems R&D Laboratory, Hitachi, Ltd.

7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 319-1221

^{B)}Information & Control System Division, Hitachi, Ltd.

5-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 319-1293

Abstract

We have developed an RF acceleration system for ion synchrotron. In order to reduce the beam loss by space-charge effect in a low energy domain, the multi-harmonic RF acceleration method is effective, in which the second and the third harmonic signals are superposed on the fundamental signal. It is necessary for the RF acceleration system to suppress the synchrotron oscillations by high-speed feedback control as well as to control these higher harmonic signals. The digital control system to perform this processing is realized by hardware. The digital control system is divided into three units based on the contents of processing, it carries out parallel processing of the function, and it can realize flexible accelerator control and high-speed signal processing. We have succeeded in the frequency feedback control and the acceleration control by the multi-harmonic RF acceleration method.

多重高調波印加法によるイオンシンクロトロン用高周波加速制御システム

1. 緒言

当社では陽子線治療システムを中心とした小型イオンシンクロトロンシステムを開発し、福井県若狭湾エネルギー研究センターおよび筑波大学陽子線医学利用研究センターへ納入してきた。これらのシステムでは、システムの小型化を実現するため、シンクロトロンへの入射エネルギーが10MeV以下と低い。一般に低エネルギー領域のビームでは空間電荷効果による発散力によるビーム損失が生じることが知られている。そこで当社では、加速空洞に印加する高周波信号として、基本波信号に高調波信号を重畳した合成波信号による加速制御法（高調波印加法）を適用してきた¹⁾。

高調波印加法とは、加速空洞に印加する基本波信号に二倍、三倍高調波信号を重畳した合成波信号を印加することで高周波パケット面積を広げ、パンチビームのピーク電荷密度を低下する制御手法である。加速終了時のビーム強度を理論値と比較すると、基本波信号のみの印加法に対して、二倍高調波印加法により1.4倍、多重高調波印加法により1.6倍が見込まれる。ビーム加速試験の結果、二倍高調波印加法により理論値通りの1.4倍の増加に成功したが、多重高調波印加法では、理論値までのビーム強度の増加は得られなかった。この試験の結果、多重高調波印加法で所望の合成波信号を得るためには、基本波信号の周波数変化に対する高調波信号の位相・振幅制御を精密に制御する必要があることが分かった。

そこで、基本波信号の周波数の変化に合わせて高調波信号の位相と振幅を精密に制御可能でかつ、周

波数フィードバック制御を実現可能な高周波加速制御システムを開発し、この開発したシステムを用いたビーム加速試験を筑波大学陽子線医学利用研究センターの加速器システムを用いて実施し、多重高調波印加法によるビーム加速制御の有用性を確認した。

2. システム構成

図1に高周波加速制御システムの構成を示す。高周波加速制御システムは、Bクロック発生システム、デジタル信号処理装置、アナログ信号処理装置、電力増幅器および、加速空洞から構成される²⁾。

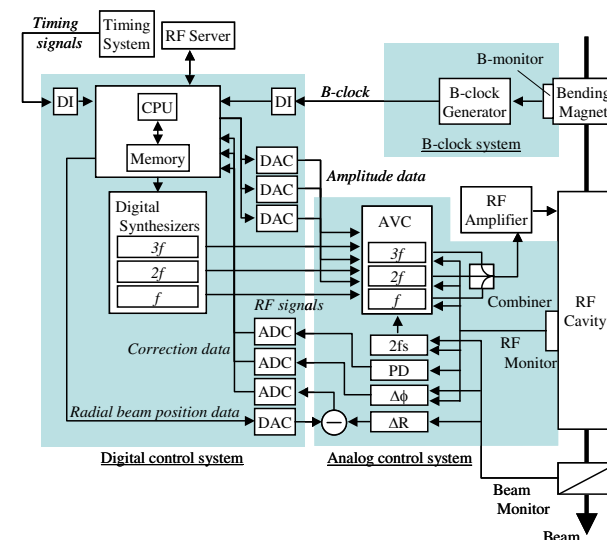


Fig.1: Block diagram of RF acceleration system

¹⁾ E-mail: hideaki_nishiuchi@pis.hitachi.co.jp

高周波加速制御システムは、上位制御システムから伝送されるタイミング信号により、運転制御を実施する。Bクロック発生システムは、偏向磁場強度の変化を検出し、偏向磁場強度の単位変化毎にパルス信号（以下、Bクロック信号）を出力する。デジタル信号処理装置は、このBクロック信号に基づき、デジタル発振器に設定する基本波周波数を更新する。

本制御システムには、5種類のフィードバック制御機能を実装している。基本波周波数のフィードバック制御機能として、ビーム位置フィードバック制御(ΔR)とビーム位相フィードバック制御($\Delta\Phi$)が挙げられる。また振幅フィードバック制御機能として、基本波信号、二倍・三倍高調波信号にそれぞれ独立したAVC回路を設けた。更に高調波位相の目標値に対するずれを検出し補正する高調波位相フィードバック制御(PD)とパンチ形状フィードバック制御(2fs)を設けた。これらのフィードバック信号処理は、アナログ信号処理装置で補正量を演算し、デジタル信号処理装置でフィードバック演算処理を実施する。デジタル信号処理装置は、Bクロック信号による周波数更新制御と上記のフィードバック制御を並列に処理する必要がある。特にビーム位相フィードバック制御では、制御システムでの処理遅延時間として5 μ s以下が求められ、うちデジタル信号処理装置での遅延時間は2 μ s以下が要求される。そのため、デジタル信号処理装置には高速なフィードバック演算処理と並列して、基本波・二倍・三倍高調波信号の周波数・振幅・位相制御をリアルタイムで処理しなければならない。そこで、当社のコントローラ技術を適用したデジタル信号処理装置を開発した。

3. デジタル信号処理装置

高周波加速制御システムは、先に示した高周波信号の制御の他に、タイミング信号に基づく運転制御機能や、上位計算機システムからの制御データ伝送機能が求められる。デジタル信号処理装置では、これらの制御レベルに合わせて3つのコントローラに機能を分散・並列化し、高速信号処理を実現した。図2にデジタル信号処理装置のシステム構成を示す。

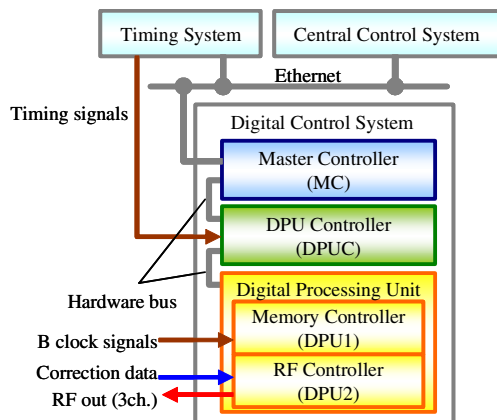


Fig.2: Outline of digital control system

デジタル信号処理装置は、上位計算機システムとの通信制御機能を担当する通信制御コントローラ

(Master Controller, MC)、タイミング信号に基づく運転制御を担当する運転制御コントローラ(DPU Controller, DPUC)、高周波信号処理を担当するRF制御コントローラ(Digital Processing Unit, DPU)から構成される。

MCは上位計算機システムから伝送される加速制御パラメータ（プリセットデータ、パターンデータ）を受信し、DPUおよびアナログ信号処理装置に設定するとともに、高周波加速制御システムの状態信号を上位計算機システムに伝送する処理といった、リアルタイム性能が要求されないソフトウェア処理を担当する。MCにはCPUにSH-4 (240MHz)を採用した当社のコントローラHISEC 04/R600CHを採用した。

タイミング信号に基づく加速制御を管理するDPUCは、MCと同様にCPUにSH-4 (240MHz)を採用した加速制御コントローラである。DPUCはタイミング信号に対して10 μ sの応答を実現するため、MCとは独立して用意した。またDPUCは、DPUの運転状態を監視する機能を有し、MCからDPUメモリへのデータ設定は、DPUの運転状態を確認しながらDPUC経由で実施する。そのため、DPUとDPUCの間はFPGA (Field Programmable Gate Array)を介した専用バスで接続する。

高周波加速制御の主要機能である高周波信号処理を担当するDPUは、2 μ s以下のフィードバック演算処理の遅延時間を実現するため、パターンメモリアクセス処理および高調波位相フィードバック制御の補正量演算を実施するDPU1と、周波数フィードバック演算処理および高周波信号出力を実施するDPU2に分けて実装した。これら二つのユニットでの信号処理は全てFPGAにて実装した。

図3にデジタル信号処理装置の外観、表1にデジタル信号処理装置の主な仕様を示す。

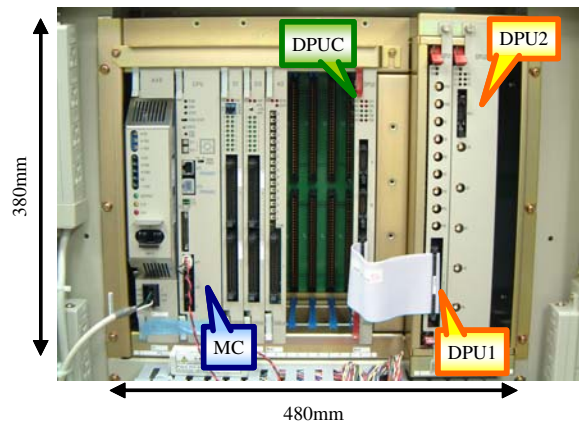


Fig.3: Photo of digital control system

Table 1: Specification of the RF digital control system

Frequency Range	1-10 MHz
Frequency Resolution	24 bits (4.2Hz/LSB)
Phase Resolution	12 bits (0.08deg/LSB)
Amplitude Resolution	16 bits (0.02V/LSB)
Pattern Memory Capacity	16 Mbytes (SRAM, ECC)
Synthesizer Clock Frequency	80 MHz

4. ビーム加速試験

開発した高周波加速制御システムを筑波大学陽子線医学利用研究センターの加速器システムに実装し、ビーム加速試験を実施した。以下に結果を示す。

4.1 ビーム位相フィードバック制御試験

高周波加速制御システムにおいて、最も高速な信号処理が要求されるビーム位相フィードバック制御試験の結果を以下に示す。図4に $\Delta\Phi$ フィードバック制御による加速制御中のシンクロトン振動の変化を示す。

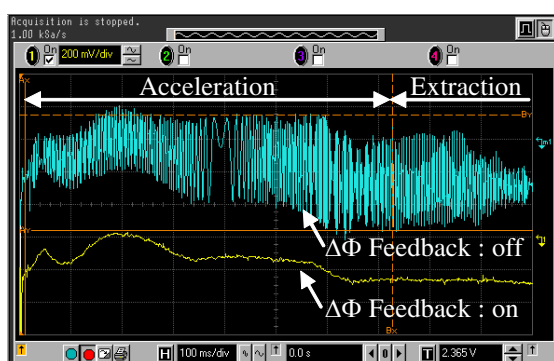


Fig.4: Suppression of instability by $\Delta\Phi$ feedback control

$\Delta\Phi$ フィードバック制御を有効とすることで、加速制御区間で生じていた2.4-3.4kHzのシンクロトン振動の抑制に成功した。

4.2 多重高調波印加法による加速試験

本システムを用いて多重高調波印加法によるビーム加速試験を実施した。試験を実施するに当たり、予め基本波信号に対する高調波信号の周波数特性を補正する位相データをサンプルし、パターンデータを生成した後にビーム加速を実施した。図5に多重高調波印加法による高周波信号とバンチ波形を示す。

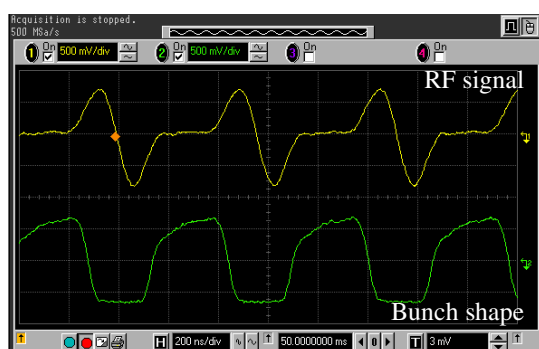


Fig.5: Multi harmonic RF signal and bunch shape
(At 100 ms after the start of acceleration)

多重高調波印加法による合成波信号が周波数更新処理に基づいて変化することを確認し、バンチ波形も形状を保ちながら加速していることを確認した。図5におけるバンチ波形の傾きは、高調波信号の周波数特性を補正する位相データが微妙にずれている

ために生じていると推測される。今後、より精度の高い高調波信号の位相データの生成方法を検討していく必要がある。

図6に多重高調波印加法による加速制御中のビーム強度の変化を示す。ビーム強度の変化を比較すると、基本波信号のみの印加法に対して、二倍高調波印加法で40%の増加、多重高調波印加法で65%の増加を確認した。

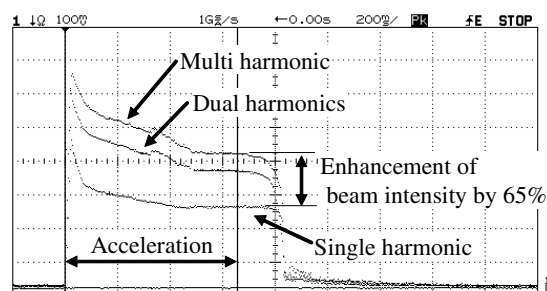


Fig.6: Beam intensity under acceleration

5. 結言

小型イオンシンクロトンにおける低エネルギー領域での空間電荷効果によるビーム損失を抑制する、多重高調波印加法を適用した高周波加速制御システムを開発した。ビーム加速試験により、ビーム位相フィードバックによる2.4-3.4kHzのシンクロトン振動の抑制と、加速終了時のビーム強度を多重高調波印加法により基本波信号のみに比べ65%増加を観測した。以上の結果から、小型シンクロトンにおける多重高調波印加法によるビーム加速制御は、空間電荷効果によるビーム損失の抑制に有効であることが確認できた。

6. 謝辞

ビーム加速試験の実施においてご協力戴いた、筑波大学陽子線医学利用研究センターの関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] K. Saito et al., "RF Accelerating System for a Compact Ion Synchrotron" Proc. of PAC 2001, Chicago, pp.966-968.
- [2] H. Nishiuchi et al., "Multi-harmonic RF acceleration system for medical proton synchrotron" Proc. of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, 2001, Osaka, pp.238-240.