

誘導加速シンクロトロンにおける任意パルス制御

ARBITRARY PULSE CONTROL FOR INDUCTION SYNCHROTRONS

由元崇[#], 高山健, 岡村勝也, 門倉英一

Takashi Yoshimoto[#], Ken Takayama, Katsuya Okamura, Eiichi Kadokura

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Different from conventional RF synchrotrons, induction synchrotrons employ induction cells, which are one-to-one pulse transformers, for beam acceleration. The KEK digital accelerator, a small-scale induction synchrotron, can accelerate 50 keV/nucleon heavy ion beams injected directly from an electron-cyclotron-resonance (ECR) ion source and control the longitudinal beam bunch distribution with the pulse acceleration control. Digital signals from an Field-Programmable Gate Array (FPGA) control the switching timings of the switching power supplies (SPSs) energizing induction cells, and their signals are 50 msec long with a precision of ~ 3 ns. Recently, the development of more sophisticated beam control beyond the capability of the present FPGA control system has been critical to meet the demands of various beam acceleration schemes. This paper reports a new arbitrary digital pulse control system for induction synchrotrons with arbitrary pulse generators in detail.

1. はじめに

誘導加速シンクロトロンとは既存のRFシンクロトロンで使用されるRF加速空洞のかわりに誘導加速セルを用いた円形加速器である。2000年にこの加速器が提案された後[1, 2], KEK-12GeV陽子シンクロトロンにおいて原理実証がなされた[3, 4]。さらに2011年からKEK-500MeV bootherシンクロトロンを改造した速い繰り返し誘導加速シンクロトロン(デジタル加速器 KEK-DA)においてビームの周回周波数が一桁程度変化するような広帯域加速の実証がなされている[5-8]。この広帯域加速により、ECR(electron-cyclotron-resonance)イオン源からのイオンビーム(50 keV/u)を直接リングに入射し加速できるようになった。誘導加速シンクロトロンの利点としては 1) スーパーバンチ加速(未実証)[2, 9], 2) 広帯域加速[5], 3) 柔軟なバンチ形状制御[10]などがある。

このような様々な加速方式とビームハンドリングを柔軟に採用できる理由は誘導加速セルが半導体スイッチング電源により駆動されるからである。10 Hz 運転時においてビーム加速の正・負電圧を発生させるタイミング信号は ns の時間精度で 50 msec にわたり発生させる必要がある。従来の加速制御システムでは、Field-Programmable Gate Array (FPGA)からのデジタル信号により制御しているが、ビーム加速制御方式あるいはビーム形状制御方式が異なると VHDL など(ハードウェア言語のひとつ)を使用したプログラムコードを直接書きなおす必要があった。

また既存システムではスーパーバンチ加速のような高度な加速を実現することは困難であったため、近年の様々なビーム要求に対応するためにも、近年登場した大容量メモリ型任意波形発生器を用いた新しい誘導加速制御方式が提案されたので本稿にて報告する。

2. 誘導加速制御システム

誘導加速制御システムを Fig. 1 に示す。1対1パルストランス構造である誘導加速セルはスイッチング電源によって駆動されるが、そのゲート信号はプログラム可能な任意波形パルス発生器もしくは FPGA によって生成される。ただし、誘導加速セルの磁性体の飽和を回避するために誘導電圧は正・負電圧を対に発生させる必要がある。

さらに図示されているシステムでは正・負電圧の振幅を独立に時間変化させることができるランピング電源を想定している。

従来のデジタル加速器で使用されているような誘導加速システムではランピング電源ではなく正・負電圧共用の定電圧電源であった。それゆえ必要な加速電圧をビームに印加するために、毎ターンではなく間欠的に加速するパルス密度変調制御が行われていた[6]。本システムではパルス密度制御のかわりに加速電圧の振幅を必要な加速電圧に追従させることにより、毎ターン加速することができる。これによりスーパーバンチの安定加速が実現できると考えられている。

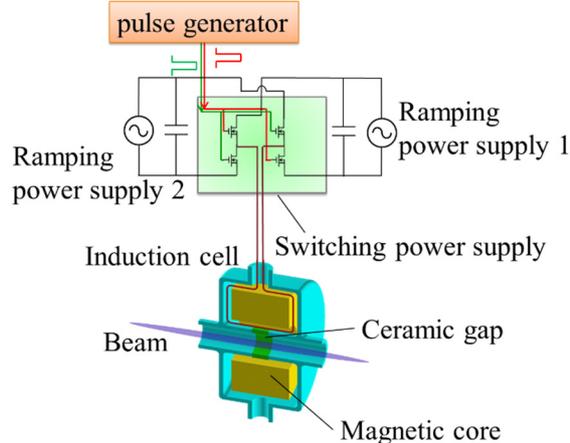


Figure 1: New acceleration control system for induction synchrotrons.

[#]yoshimo@post.kek.jp

3. ビーム加速方式

Figure 2 に現行の KEK デジタル加速器で用いられているパルス密度変調型の加速方式を示す。閉じ込め電圧は毎ターン発生させるが、加速電圧は毎ターンではなく偏向磁場の時間変動に合わせて必要な加速電圧を間欠的に発生させる。詳しくは参考文献[5, 6]を参照されたい。

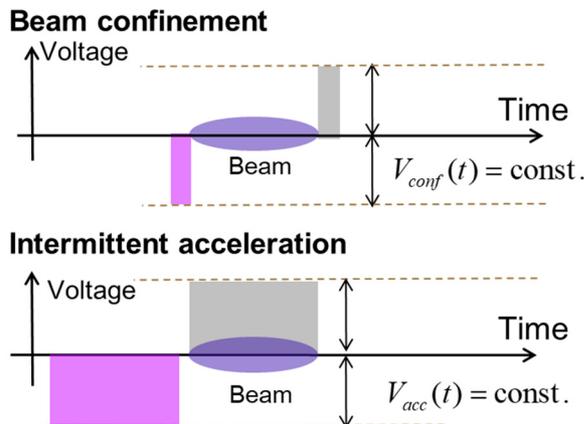


Figure 2: Pulse-density-control acceleration scheme in the present KEK-DA operation.

次に電圧変調型の加速方式[9]を、Fig. 3 に示す。閉じ込め電圧は従来どおり一定電圧で毎ターン発生させビームを閉じ込める。加速電圧も毎ターン発生させるがその必要な加速電圧 $V_{acc_req}(t)$ はリング曲率半径 ρ 、リング周長 C_0 、偏向磁場 $B(t)$ をもちいて $V_{acc_req}(t) = \rho \cdot C_0 \cdot (dB(t)/dt)$ とあらわされ、それに対応するランピング電源電圧 $V_{acc}(t)$ も $V_{acc_req}(t)$ に一致させなければならない。

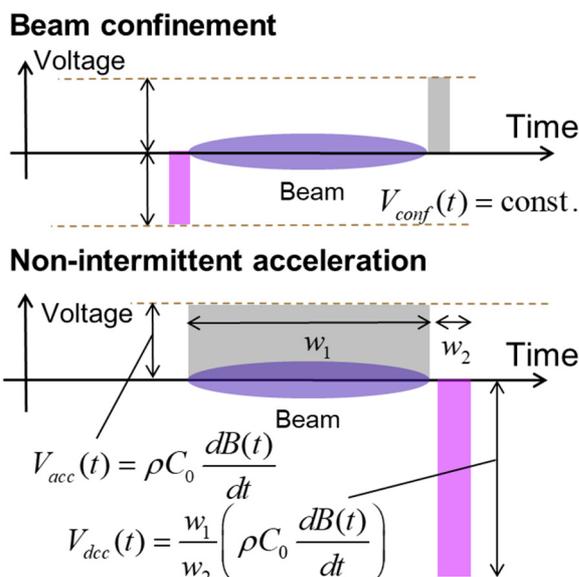


Figure 3: Amplitude modulation (AM) acceleration scheme.

一方、磁性体の飽和を避けるために必要な負電圧パルス幅は正電圧のパルス幅よりも短くすることができるが

負電圧の振幅はその分増やす必要がある。これにより非対称加速電圧によるスーパーバンチ加速が可能であると考えられる。スーパーバンチ加速方式の利点は入射時における空間電荷効果の緩和するためにより長いバンチビーム、即ちより多くのイオンを一度に加速できることである。この加速には高度な加速制御技術が不可欠であるが、それには近年の FPGA を搭載した大容量メモリ型任意波形発生器の登場を待たなければならなかった。

4. 加速制御信号

最近の任意波形発生器の性能向上は著しく、大容量メモリ(1Gpoint/ch)の波形を 1 Gbps で出力が可能モデルが販売されるようになってきた。3 章で説明された加速方式を実現するためにはスイッチング電源(Switching Power Supply, SPS)の MOS-FET 用ゲート信号を生成することが不可欠である。今回、Lecroy 社製 16 bit 任意波形発生器 T3AWG3352(sample rate: 1.2 GS/s, memory: 1 Gpoint/ch)を使用して、加速制御信号の生成を試みた。このモデルはオプションとしてさらに 8channel の 1-bit 信号も同時に発生させることができる。デジタル加速器の場合、要求される時間分解能は数 ns 以下で 50 msec のバーストパルスを 10 Hz 外部トリガで駆動させる必要がある。

またビーム閉じ込め・加速用の制御信号のために 2-bit (1 V: 正誘導電圧 on, -2 V: 負誘導電圧 on, 2 V: off) の 50 msec バースト波形を発生させた。SPS のゲート制御信号用にはコンパレータを用いて生成した 1 bit 信号を使用することを想定している。

まず従来のパルス密度変調型の加速のために発生させた制御信号を Fig. 4(a)に示す。閉じ込め用制御信号(赤色)は連続で発生しているのに対して、加速用制御信号は間欠的に発生していることがわかる。特に加速開始・終了時点において加速電圧発生密度が低くなって

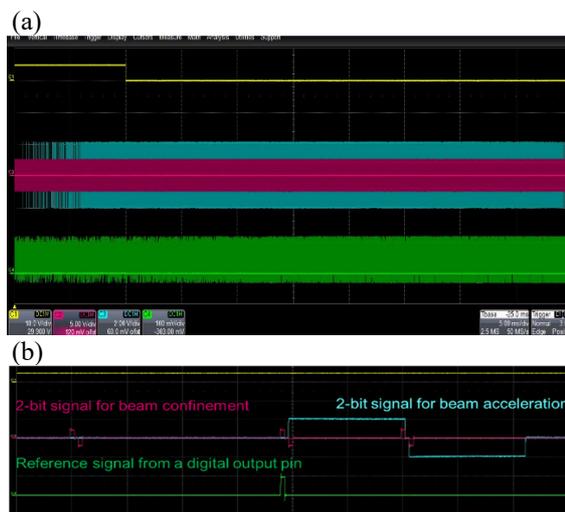


Figure 4: Overview (a) and its enlarged figure (b) of control signals for beam acceleration (cyan) and confinement (red) in a pulse-density-control acceleration scheme.

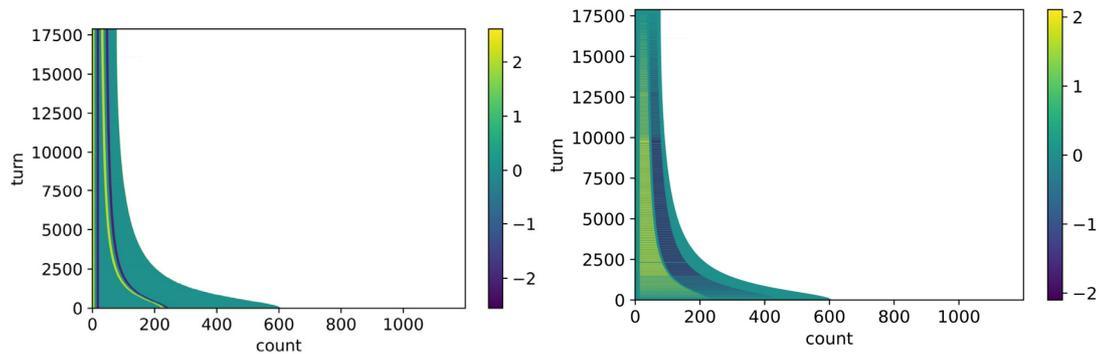


Figure 5: Time-turn plot of the control signals for beam confinement (left) and acceleration (right) as shown in Fig. 4. The horizontal and vertical axes indicate the time count corresponding to the beam revolution period and the turn number after the injection.

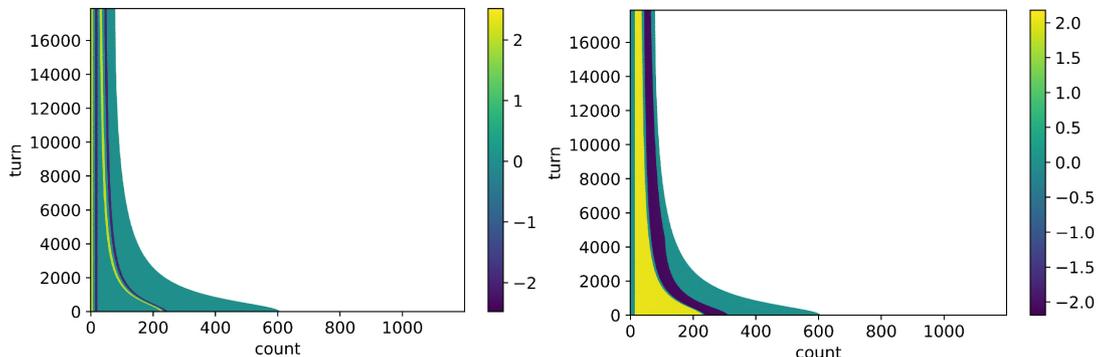


Figure 6: Timeturn plot of the control signals for beam confinement (left) and acceleration (right) in the amplitude modulation (AM) acceleration scheme with the same axes as those in Fig. 5.

いることがパルス密度制御の特徴である。次に拡大した制御信号の波形を Fig. 4(b)に示す。閉じ込め制御信号が加速制御信号と同期して発生していることがわかる。ジッターは 2 nsec であったが、これは任意波形発生器の内部クロックを使用したためであり、外部クロックを使用することにより低減可能である。これらの発生させた閉じ込め・加速制御信号を解析するために横軸を周回周期、縦軸をビーム入射からのターン数として表示しなおしたマウンテンプロットを Fig. 5 に示す。また電圧変調型加速方式におけるスーパーバンチ加速用制御信号のマウンテンプロット表示を Fig. 6 に示す。パルス密度変調型加速方式とは異なり加速用制御信号が全ターンにわたって発生しており、また入射直後において正誘導電圧パルス幅が負誘導電圧パルス幅に比べて 4 倍長く発生するように発生していることがわかる。最後に Fig. 5 と Fig. 6 の解析結果からパルス密度変調加速および電圧変調型加速方式で使用可能な汎用制御信号発生システムを実現できることがわかった。

5. まとめ

従来 FPGA ボードを使用した加速制御では加速方式の変更ごとにハードウェア言語で書き直す必要があり、様々なビーム加速要求に対応することが困難であった。そこで近年登場した大容量任意メモリ発生器を使用することにより、従来のパルス密度変調加速および新たに提案されているスーパーバンチ加速のための電圧変調型加速の両方で使用できる汎用制御信号発生システムを実証した。この制御方式は誘導加速に限らず様々な加

速器分野で応用可能であると考えられる。

参考文献

- [1] K. Takayama and J. Kishiro, "Induction Synchrotron," Nucl. Inst. Meth. A 451, pp. 304-317 (2000).
- [2] K. Takayama and J. Kishiro, M. Sakuda, Y. Simosaki, and M. Wake, "Superbunch Hadron Colliders," Phys. Rev. Lett. 88, 144801 (2002).
- [3] K. Takayama *et al.*, "Observation of the Acceleration of a Single Bunch by Using the Induction Device in the KEK Proton Synchrotron," Phys. Rev. Lett. 94, 144801 (2005).
- [4] K. Takayama *et al.*, "Experimental Demonstration of the Induction Synchrotron," Phys. Rev. Lett. 98, 054801 (2007).
- [5] T. Iwashita *et al.*, "KEK digital accelerator," Phys. Rev. ST-AB 14, 071301 (2011).
- [6] K. Takayama *et al.*, "Induction acceleration of heavy ions in the KEK digital accelerator: Demonstration of a fast-cycling induction synchrotron," Phys. Rev. ST-AB 17, 010101 (2014).
- [7] T. Yoshimoto *et al.*, "KEK デジタル加速器におけるイオン源からの直接入射ビームの加速", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, pp. 58-62.
- [8] T. Yoshimoto *et al.*, "Wideband induction acceleration and its intrinsic nature in the KEK digital accelerator," Nucl. Inst. Meth. A 797 pp. 191-195 (2015).
- [9] T. Yoshimoto *et al.*, "Super-bunch induction acceleration scheme in the KEK Digital Accelerator," MOPA17, Proceedings of the 13th Heavy Ion Accelerator Technology Conference (HIAT2015), Yokohama, Japan (2015).
- [10] T. Yoshimoto *et al.*, "Fast Ion Bunch Compression by Barrier Pulse Control," Physics of Plasmas 28, 083101 (2021).