

J-PARC RCS のためのベクトル rf 電圧制御システムの開発 DEVELOPMENT OF A VECTOR RF VOLTAGE CONTROL SYSTEM FOR THE J-PARC RCS

田村文彦^{*A)}、杉山泰之^{A)}、吉井正人^{A)}、大森千広^{A)}、山本昌亘^{A)}、
島田太平^{A)}、長谷川豪志^{A)}、原圭吾^{A)}、古澤将司^{A)}
Fumihiko Tamura^{*A)}, Yasuyuki Sugiyama^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Masanobu Yamamoto^{A)},
Taihei Shimada^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Masashi Furusawa^{A)}
^{A)}J-PARC Center, JAEA & KEK

Abstract

Beam loading compensation for the magnetic alloy (MA) cavities is indispensable to accelerate high intensity proton beams in the J-PARC 3 GeV rapid cycling synchrotron (RCS). Thanks to the wide-band frequency response of the MA cavity of the RCS, the dual harmonic operation, in which a single cavity is driven by a superposition of the fundamental and second harmonic rf signals, is possible. On the other hand, the wake voltage in the MA cavity contains multiharmonic components due to the wide-band response, and multiharmonic beam loading compensation is necessary. The J-PARC RCS has been using the rf feedforward system for multiharmonic beam loading compensation and the commissioning was successfully performed. The RCS successfully demonstrated 1 MW beam acceleration with feedforward. During the high power beam tests, we have found some weak points of the feedforward due to its open loop configuration and are considering to employ a feedback compensation. We developed a prototype of a vector voltage control system. We describe the detail of the system, the commissioning methodology, and preliminary test results.

1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン (RCS) では、金属磁性体 (MA) 空胴の採用により、必要とされる高い加速電圧を発生させ、その広帯域 ($Q = 2$) 特性を生かして、空胴に基本波および 2 倍高調波を重畳した電圧を発生させるデュアルハーモニック運転を実現している。大強度の陽子ビームによる空間電荷効果を緩和するために、デュアルハーモニック運転による縦方向ペインティングは必須である [1]。

一方、MA 空胴が広帯域であることから空胴に発生するウェーク電圧も高調波を含むため、大強度陽子ビームの加速のためには、基本波成分だけでなく高調波成分を含んだマルチハーモニックビームローディング補償が必要となる。

RCS ではこれまで、rf フィードフォワード法によるマルチハーモニックビームローディング補償を行ってきた [2]。rf フィードフォワード法は、ウォールカレントモニターで検出したビーム電流 (i_{beam}) 信号を処理し、終段増幅器から空胴電圧発生のためのドライブ信号に加え $-i_{\text{beam}}$ なる電流を供給することで、ウェーク電圧をキャンセルしようとする方法である。デジタル LLRF 制御システムの一部として開発されたフィードフォワードシステムは、調整手法の確立後、大強度ビーム加速には不可欠なものとなっており、1 MW 相当のビーム加速試験も成功裏に行われた [3]。

一方で、ビーム強度の増加に伴い、フィードフォワードが開ループであることに起因する弱点もわかってきた。加速空胴は大電力の真空管アンプによりドライブされるために、ビーム強度が大きく異なる場合、真空管ゲインの出力依存性によって全体のシステムゲインが変化する。この変化に開ループであるフィードフォー

ドは追従できないために、最適なフィードフォワードのパラメータはビーム強度毎に異なる。また、真空管に出力が大きくなると歪み成分が増加するが、フィードフォワードはビーム信号を基に補償を行うために歪み成分を補償することができず、800 kW を超える大強度ビーム加速では電圧波形の歪みによる rf バケットの変形も問題となっている。

このため、次世代の RCS LLRF 制御システムにおいては、フィードフォワードに加えベクトル電圧制御によるビームローディング補償の採用を検討しており、2016 年度にベクトル電圧制御機能のみのプロトタイプを製作した。現在は、12 台の空胴のうちの 1 台と組み合わせせて試験を行っている。

本稿では、ベクトル電圧制御システムの構成、調整手法、ビーム試験結果について報告する。

2. ベクトル電圧制御の構成

Figure 1 にベクトル電圧制御のブロック図を示す。マルチハーモニックベクトル電圧制御は、対象とするハーモニックの FB ブロックを並列に備えることで実現される。

既存の LLRF 制御システムのクロックは 36 MHz であるが、今回のプロトタイプでは 4 倍の 144 MHz とした。

32 ビットの周回周波数 f_1 はパターンクロック (1 MHz) 毎にパターンメモリ読み出され、34 ビット位相加算器により周回周波数の位相信号 XR1 ($-\pi$ から π の範囲) を生成し、AD 変換された空胴電圧信号とともに各ハーモニックの FB ブロックに入力される。今回の製作では 6 つの FB ブロックを構成した。

FB ブロック内では、 f_1 および XR1 がハーモニック選択レジスタ ($hn = 1 \dots 6$) と掛け合わされ、ブロックが対象とするハーモニックの位相信号 XRn と周波数 fn を得

*fumihiko.tamura@j-parc.jp

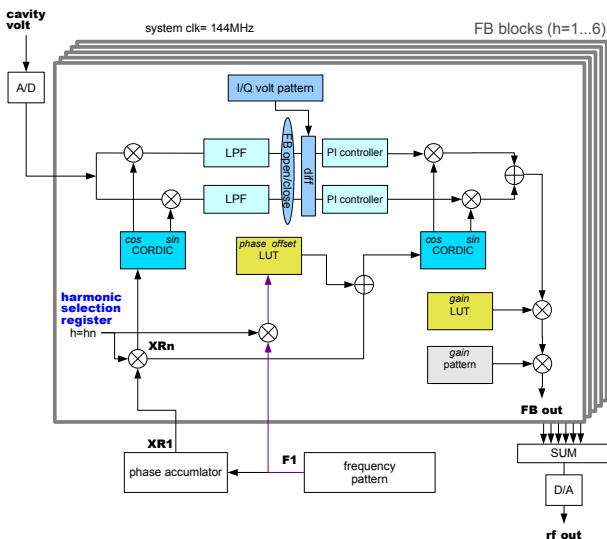


Figure 1: Simplified block diagram of the multiharmonic vector voltage control system.

る。周波数 f_n は後述するルックアップテーブル (LUT) のアドレスとして使用される。

XRn から CORDIC によりコサイン、サインの信号を生成し、対象とするハーモニクの空胴電圧複素振幅 (I/Q) を I/Q デモジュレーションにより検出する。I/Q デモジュレーション部のローパスフィルタは、隣接するハーモニクスの周波数を除去しなければならない。RCS の最低周回周波数は約 600 kHz である。今回の製作では、最低周回周波数 186 kHz である MR への適用を考慮し、狭帯域の CIC フィルタ ($N=5, M=2, R=256$) を採用している。CIC フィルタの最初のローパスは 190 kHz 程であるが、ここで 40 dB 以上の遮断を実現しており、MR への適用も可能である。

フィードバック ON/OFF のスイッチは、システムの調整のために備えている。

検出された複素電圧 I/Q 電圧パターンと比較される。通常のビーム運転では、基本波 ($h = 2$) および 2 倍高調波 ($h = 4$) に振幅が設定され他のハーモニクスについては 0 が設定されるが、全てのハーモニクスについて任意の電圧パターンを設定することが可能となっている。比較の後、PI 制御を経て、I/Q モジュレーションにより rf 信号を生成する。各 FB ブロックの出力を合成し、D/A 変換してマルチハーモニクの rf 信号が出力される。

RCS では、 $h = 1$ の最低周波数約 600 kHz から $h = 6$ の最高周波数約 5.1 MHz までの広い周波数で電圧制御を行う必要がある。LLRF 制御システムからトンネルの加速空胴までのケーブル長は 300 m を超え、周波数変化に伴うケーブル遅延による位相変化は大きい。また、空胴共振点付近での周波数応答も無視できない。このため、システムの伝達関数の位相を変化させることがフィードバックを閉じるためには必要となる。また、この周波数範囲では RCS の MA 空胴のインピーダンスは 10 倍程度変化するため、フィードバックゲインを最適化するためには、伝達関数の振幅を変化させることが望ましい。これらを実現するために、周波数をアド

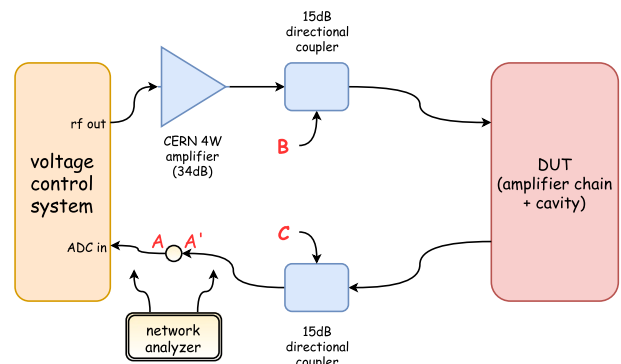


Figure 2: Measurement setup for commissioning of the vector voltage control system.

レスとした、位相オフセットおよびゲイン LUT を備えることとした。位相オフセット LUT は、I/Q デモジュレーションとモジュレーション間に位相オフセットを与えることで、FB ブロックの伝達関数の位相を制御するものである。調整範囲は $-\pi$ から π である。ゲイン LUT は、数十倍までの広い範囲で設定できるように設計した。それぞれの LUT は 14 ビットのアドレス幅を持ち、32 ビットの周波数から適切なビットを切り出して使用することができる。空胴帯域を勘案し、9 MHz までの周波数に対応できるように設定して調整を行った。これら LUT の設定がシステムの調整の鍵となる。

3. オフビームでの調整

フィードフォワードの調整と異なり、フィードバックの調整はビームを用いない調整が主となる。調整のための信号の流れを、Fig. 2 に示した。

まず、位相オフセット LUT の設定を行うために、LUT に 0 を設定し、周回ハーモニク ($h = 1$) の I/Q 振幅をデジタル値で $(I, Q) = (5000, 0)$ と設定し、フィードバック OFF の状態で、周波数 400 kHz から 8.99 MHz までの 200 点で I/Q 値を取得した。測定した I/Q 値を補完して LUT の設定のための周波数特性を得た。測定した I/Q 値および位相角を Fig. 3 の上図に示す。図中、丸で示した点が測定した I/Q 値、線が補完した結果を表わしている。位相角は補完した I/Q 値より求めている。I/Q 値は周期的に振動しており、これはシステムの伝達関数の位相が変化していることに対応する。ほぼ直線的に変化していることから、ケーブル長による遅延が主たる要因であることが見てとれる。また、振幅は 1.7 MHz 付近を最大として周波数応答を持っており、これは空胴インピーダンスの周波数応答に対応する。

Fig. 3 の上図の位相応答を補正するように、位相オフセット LUT を設定したものが Fig. 3 の下図となる。伝達関数の位相角はほぼ全域にわたり 0 度に補正できている。この時、I/Q 値は I 成分だけが振幅を持ち、Q 成分はほぼ 0 となる。これが、I/Q のフィードバック系を独立させ、フィードバックを閉じる条件となっている。高い周波数では位相角が 0 から若干ずれてきているが、これはシステムの振幅応答が非常に小さくなることによるエラーであると考えられる。

次に、ゲイン LUT の設定を行った。I/Q ベクトルの

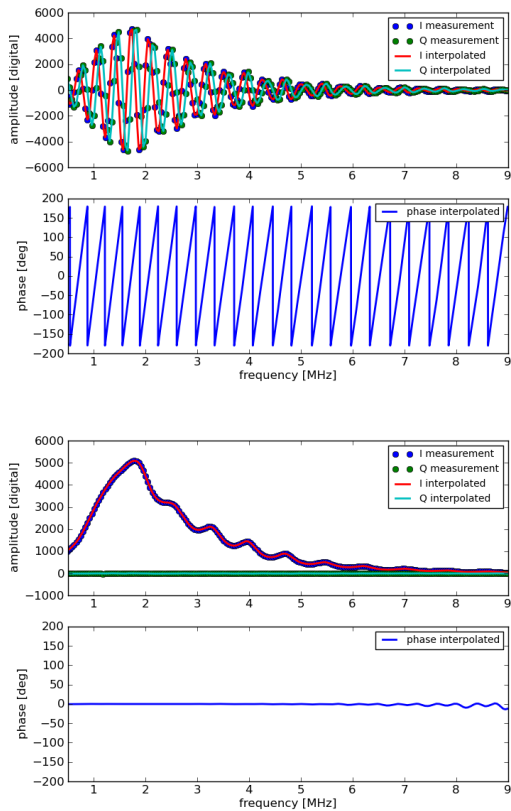


Figure 3: Measured frequency responses of the I/Q signals and phase. (Top) before and (bottom after) setting of the phase offset LUT.

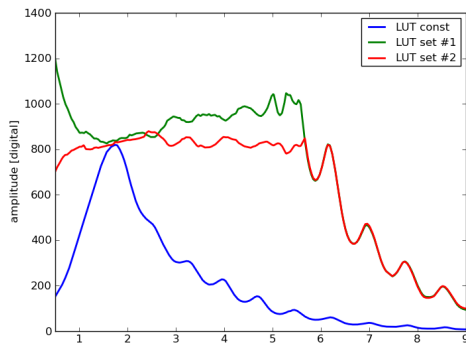


Figure 4: Comparison of the frequency responses of the amplitude. (Blue) gain LUT set to constant, (green) after the first setting, and (red) after the second setting.

振幅 ($\sqrt{I^2 + Q^2}$) から、1.7 MHz の値を基準として、システムの応答が一定となるようにゲイン LUT を設定する。ゲインの最大値は 10 倍に制限して調整を行った。また、この調整においては、システムの振幅上限値を勘案し、I/Q 振幅をデジタル値で $(I, Q) = (1000, 0)$ と設定した。設定における振幅応答をプロットしたものを Fig. 4 に示す。1 回のゲイン LUT 設定では特に低い周波数領域において応答を一定にすることができてい

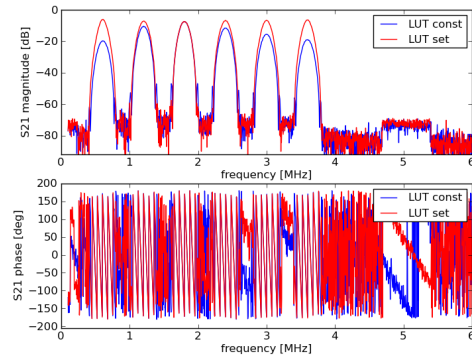


Figure 5: Comparison of open loop transfer functions from A to A' in Fig. 2. $f=1.2$ MHz. (Blue) with constant gain LUT and (red) with the gain LUT set.

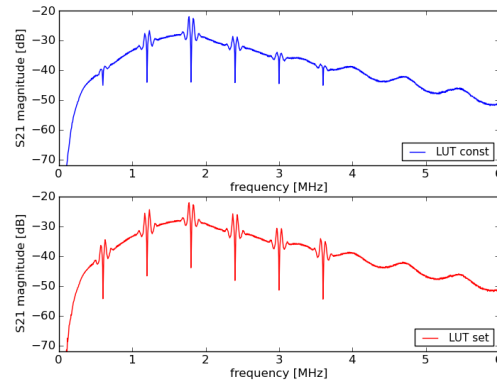


Figure 6: The close loop transfer functions from B to C in Fig. 2. $f=1.2$ MHz. (Top) with constant gain LUT and (bottom) with the gain LUT set.

ないことがわかる。これは、真空管を用いた終段増幅器は、ゲインの出力依存性があることによるものと考えられる。1 回目の測定を基にした 2 回目の設定により、約 5.5 MHz までの範囲でフラットな周波数応答を得ることができている。それ以上の周波数では、ゲイン LUT が上限値 10 倍に達して空胴の周波数応答の補正が十分でないために、減衰する周波数応答となっている。

Figure 2 における A 点から A' 点までの開ループゲインをネットワークアナライザで測定し、ゲイン LUT 一定の場合と前述の設定を行った場合と比較したものを Fig. 5 に示す。加速基本波 ($h = 2$) の周波数は 1.2 MHz に設定し、全て ($h = 1 \dots 6$) のハーモニックの FB ブロックを出力している。ゲイン LUT 一定の場合は、ハーモニック毎の振幅応答が変化しているのに対し、ゲイン LUT を設定することで、これらを揃えることができている。また、位相はいずれの場合にも各ハーモニックの中心 (0.6, 1.2, ..., 3.6 MHz) でほぼ 180 度となっており、この測定からも位相オフセット LUT の設定によりフィードバックを閉じる条件を整えることができていることがわかる。

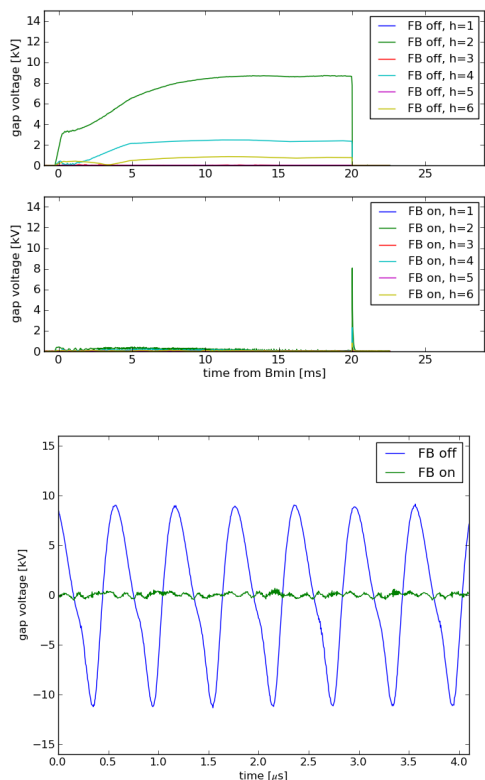


Figure 7: Comparisons of (top) the harmonic components of the gap voltages and (bottom) the gap voltage waveform just before extraction, without and with feedback.

フィードバックを閉じ、比例 (P) ゲインおよび積分 (I) ゲインを設定し、Fig. 2 の B 点から C 点までの伝達関数をネットワークアナライザで測定したものを Fig. 6 に示す。上図にはゲイン LUT 一定の場合、下図にはゲイン LUT を設定した場合をプロットした。この時、ネットワークアナライザからの rf 信号はフィードバックにとって外乱となるので、この伝達関数が閉ループゲインを表わしている。ゲイン LUT 一定の場合は、開ループゲインが強い周波数依存性を持つために、各ハーモニックの FB ブロックと同じ PI ゲインを設定してもフィードバックの効果が異なることがわかる。1.8 MHz ($h = 3$) では強い抑制が見てとれるが、0.6 MHz ($h = 1$) および ($h = 6$) ではフィードバックの効果が小さい。一方、ゲイン LUT を設定した場合には、各ハーモニックにおいて、フィードバック応答が同様なものになっていることがわかる。ビーム加速に伴う加速 rf 周波数スイープに追従し、入射から取り出しまで同様のフィードバックゲインを得ることが期待される。積分ゲインの効果が強く、この設定ではフィードバックゲインは各ハーモニックとも 30 dB 程度になっている。

4. ビーム試験結果

4.1 ウェーク電圧抑制試験

フィードバックによるウェーク電圧の抑制の効果を端的に確認するために、1 台の空洞に電圧を発生させ

ずにビームを加速し、フィードバック OFF、ON の場合について空洞ギャップ電圧波形を測定した。フィードバックは、ゲイン LUT を設定して試験を行った。合成電圧の低下およびウェーク電圧の効果により、フィードバック OFF の場合ではビーム強度は 4.3×10^{13} ppp、約 510 kW 相当に制限される。フィードバック OFF、ON の場合のギャップ電圧のハーモニック成分を Fig. 7 上図に、ビーム取り出し直前 (B_{\min} から 19.9 ms) のギャップ電圧波形を下図に示す。フィードバック OFF の場合は、基本波成分 ($h = 2$) は最大 8 kV 程度、2 倍、3 倍高調波 ($h = 4, 6$) 成分はそれぞれ最大 2.5 kV、0.9 kV 程度と、高いウェーク電圧が発生している。ビーム取り出し直前には、これらの合成は 9 kV に及ぶ。2 バンチを加速しているために、奇数次のハーモニック成分 ($h = 1, 3, 5$) は発生していない。

フィードバックにより、このウェーク電圧は劇的に抑制される。基本波、2 倍、3 倍高調波の成分はそれぞれ最大で 0.4、0.2、0.1 kV 程度である。ギャップ電圧波形からも、抑制の効果は明らかであり、合成電圧は 1 kV に満たない。波形からは、より高次の成分が残っていることが見てとれるが、問題となる振幅ではない。

フィードバック ON の場合、取り出し直後 (20 ms) に高い電圧が発生している。これは、キッカーによりビームが急に全て取り出され、ウェーク電圧が急に消失するが、フィードバックシステムは有意な時間遅れを持つために、ウェーク電圧抑制のための信号が空洞に供給されることが原因である。この電圧の跳ね上がりは、ビームの取り出しに際してゲインパターンを 0 にすることで回避できると考えている。

4.2 電圧発生の下でのビームローディング補償

電圧を発生させながらの場合にはウェーク電圧を直接測定することはできないため、ビームローディング補償の効果を見るためには以下の点に着目して測定を行えばよい。

- 電圧を出しているハーモニック成分 ($h = 2, 4$) については、ビームなしの場合と振幅および位相が合っているか。
- 電圧を出していないハーモニック成分 ($h = 1, 3, 5, 6$ および、5 ms 以降の $h = 4$) は振幅が抑制されているか。

ベクトル電圧制御により通常運転と同様の電圧を発生させながら、 7.7×10^{13} ppp、約 920 kW 相当のビームを加速した時の、基本波および 2 倍高調波 ($h = 2, 4$) のハーモニック成分の振幅と位相をビームなしの時と比較したものを、Fig. 8 に示す。ここでは、フィードバックは、ゲイン LUT を設定して試験を行った。基本波成分 ($h = 2$) については、ほぼプログラム通りの振幅が発生できているが、最大値付近 (5–10 ms) では、最大で約 3% 程度の偏差が生じてしまっている。位相については全域にわたり 1 度以内の偏差を達成している。振幅の偏差については今のところ原因は不明であるが、位相が高い精度で追従していること、またビーム強度を下げると偏差は小さくなることから、増幅器系のゲインの出力依存性、また出力の飽和などが原因の候補として考えられる。

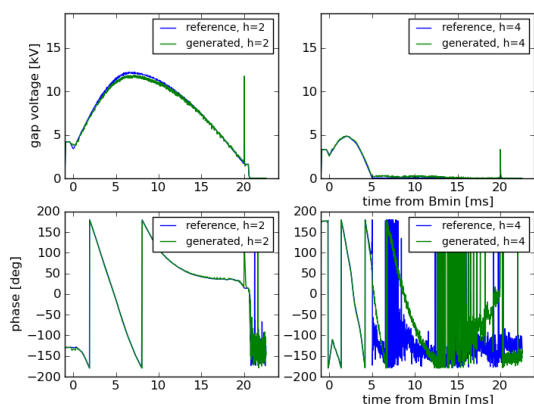


Figure 8: Comparisons of the amplitudes and phases of the harmonic components for $h = 2, 4$.

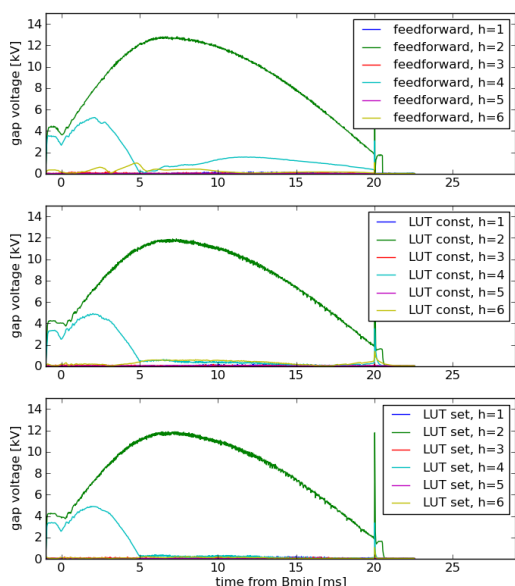


Figure 9: Comparison of the harmonic components of the cavity gap voltage. (Top) with feedforward, (middle) with feedback and the constant gain LUT, and (bottom) with feedback and the gain LUT set.

2倍高調波成分については、電圧プログラムがある5msまでの間、振幅の偏差および位相の偏差ともに非常に小さい。

どちらのハーモニクスについても、空胴に電圧を発生させない時同様に、ビームの取り出し直後に電圧の跳ね上がりが発生している。跳ね上がりの電圧はほぼプログラムの最高電圧に匹敵しており、今後のビーム増強の際にはゲインパターンによる対処が必須であると言える。

既存のLLRF制御システムで電圧を発生させ、ビームローディング補償をフィードフォワードで行った場合、ゲ

インLUT一定でベクトル電圧制御による電圧発生を行った場合、ゲインLUTを設定した場合で、 7.7×10^{13} pppの大強度ビームを加速した時のハーモニック成分をプロットしたものを、Fig. 9に示す。フィードフォワードの場合は、2倍高調波が電圧プログラムが0になる5ms以降で最大1.5kV、3倍高調波が1kV程度発生している。これらの高調波成分は、ウェーク電圧ではなく、終段増幅器出力が増大した時の歪み成分も含まれ、これをフィードフォワードで抑制することは困難である。ベクトル電圧制御は歪み成分の抑制にも働くが、ゲインLUTが一定の場合では、4msから15msおよび18msから取り出しにかけて、2倍、3倍高調波が最大0.6kV程度発生している。特に取り出し付近では、基本波の電圧が低いために、数百Vの高調波成分であっても、電圧波形に大きな歪みを与える。

ゲインLUTを設定した場合には、2倍、3倍高調波の振幅は最大0.3kV程度とさらに良い抑制が得られている。特に、取り出し付近でゲインLUT一定の場合に比べてより良い抑制が得られており、これは、周波数が高い領域でフィードバックゲインが保たれていることの効果と言える。

5. まとめと今後

J-PARC RCSでは、これまで金属磁性体空胴に生じる高調波を含むビームローディング補償のためにマルチハーモニックフィードフォワードシステムを開発するとともに、調整手法を確立し、大強度陽子ビーム加速を行ってきた。フィードフォワードが開ループであることに起因するいくつかの課題に対応するために、次世代LLRF制御システムでは、ベクトル電圧制御によるビームローディング補償の採用を検討している。2016年度に製作したプロトタイプは12台の空胴のうちの1台と組み合わせて試験を行っており、最も重要なパラメータである位相オフセットLUTおよびゲインLUTの調整手法を確立した。

920kWまでの大強度ビームを用いたビーム試験では、ベクトル電圧制御によりウェーク電圧を抑制し、マルチハーモニックなビームローディング補償が可能であることを示した。フィードバックは閉ループであるために、さまざまなビーム条件の下でその性能を発揮することが可能である。一方、空胴ギャップ電圧の制御には有意な偏差が見られており、これがフィードバックに起因するものか増幅器系によるものかを検討する必要がある。

今後は、次世代LLRF制御システムの構築に向け、フィルタの構成の見直しなどでフィードバックとしての性能向上をはかるとともに、本格的なシャースを備え複数台の制御が可能なシステムを製作していく予定である。また、既存システムの置き換えに必要なさまざまな機能の実装も進める。

参考文献

- [1] F. Tamura *et al.*, PRST-AB, 12, 041001(2009).
- [2] F. Tamura *et al.*, PRST-AB, 14, 051004 (2011).
- [3] H. Hotchi *et al.*, PRAB, 20, 060402 (2017).