

[12P-20]

## Energy stabilization on 1.5 GeV S-band linac

M. Kuriki, H. Hayano, T. Naito, and V. Vogel

High Energy Accelerator Research Organization

Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

a) Branch of Inst. of Nuclear Physics

142284 Protvino, Moscow Region, Russia

(June 8, 2000)

### Abstract

KEK-ATF is doing R&D works establishing high-current and low-emittance electron beam for the future JLC project. ATF is composed from 1.5 GeV S-band linac, a beam transport line, a damping ring, and an extraction line.

The purpose of S-band linac is to provide the high current, stable electron beam to the damping ring. The beam energy is, however, fluctuated about 1% of that, then the injection to the damping ring is unstable. The beam intensity of the damping ring is changing pulse by pulse up to 10% of it. This fluctuation disturbs systematic studies for beam dynamics, instrumentation, etc. In addition, this fluctuation causes the radiation loss in the beam transport line. To keep the radiation level lower than the limit, we operate the linac in the single bunch, low repetition mode. To start the multi-bunch operation we have to solve this problem.

One of the biggest source of this energy instability is fluctuation of klystron voltage. To compensate it, we have introduced a feed-forward controlled deQ module in the modulator.

The energy stability was improved by introducing this new deQ method from 0.6% to 0.2% of itself.

## 1.5 GeV S-band ライナックのエネルギー安定化

### I. INTRODUCTION

KEK-ATFは将来の linear collider 計画のための大電流・低 emittance 電子 beam の生成、および測定・運転技術の開発を目的としている。ATFは 1.5 GeV S-band linac, beam transport line, damping ring、そして extraction line から成り立っている。

熱電子銃で得られた電子ビームは二台の SHB(Sub harmonic buncher) と S-band 進行波型 buncher からなる bunching system により、そのパンチ長を当初の 1 ns から S-band で加速可能な 10 ps 程度まで縮められる。

電子ビームは続く 8 個の S-band 加速 unit で 1.3 GeV まで加速される。一つの unit は二本の加速管からなり、それを一台の klystron、一台の modulator でドライブしている。

klystron は東芝製 E3712 で、出力 80MW、幅 4.5  $\mu$ s という矩形波を発生する。それを SLED と呼ばれるパルス圧縮空洞によりピーク値でおよそ 400MW という RF 波に変換し、30 MeV/m という高い加速勾配を実現している。

ビーム構造は、パンチ間隔 2.8ns、強度  $1.0 \times 10^{10}$  electron/bunch の 20 パンチからなるマルチパンチを予定しているが、現在は放射線の問題からシングルパンチモードで運転されている。

2000 年 4 月にはこのシングルパンチモードで、水平方向 emittance  $1.3 \times 10^{-9}$  rad.m、垂直方向 emittance  $1.7 \times 10^{-11}$  (ともにビーム強度  $2.0 \times 10^9$ ) [1] と、ほぼ目標を達成した。

これからの課題は、高繰り返し、マルチパンチモードでの低 emittance beam の実現である。そのために

は放射線の問題を解決しなければならない。

放射線の発生源のひとつとして、beam transport line があげられている。linac からの beam energy tail、および energy jitter が beam loss を引き起こし、放射線を発生させている。放射線を抑えるためには linac の beam energy の安定化が非常に重要である。

また、beam energy の揺らぎは、beam transport line での beam loss とともに、damping ring への injection 効率を悪化させ、結果としてビーム強度をパルス毎に大きく変化させてしまう。安定したビームによる系統的な研究を行ううえでも、linac のエネルギー安定化が望まれる。

エネルギーの揺らぎのスタディ [2] より、エネルギー変動のもっとも大きな原因は klystron 出力の変動であった。この変動は modulator の出力電圧の揺らぎから生じている。本研究では feed-forward 制御を用いた新しい deQ 回路を modulator に実装し、linac のエネルギー安定化をおこなった。

### II. FEED-FORWARD DEQ

modulator は Pulse Forming Network (PFN) を共振充電し、その電圧をパルストランスによりさらに高め klystron に供給している。PFN の充電電圧はおよそ 43kV、パルストランスの出力は 340 kV、7.5  $\mu$ s である。

PFN の充電電圧 ( $E_{PFN}$ ) は deQ モジュールによって制御されている。deQ モジュールは基準電圧と  $E_{PFN}$  を比較し、 $E_{PFN}$  が基準電圧に達すると電流をバイパスして過充電をふせぎ、到達電圧をつねに一定にたもつ働きをしている。

FIG. 1 は  $E_{PFN}$  と充電カーブの勾配 ( $dV/dt$ ) の相関を示したものである。この図より  $E_{PFN}$  は  $dV/dt$  と強い相関を持っており、 $dV/dt$  の揺れが  $E_{PFN}$ 、さらに klystron 出力などの変動を生じ、ひいては linac のエネルギーを不安定にしていることがわかる。 $E_{PFN}$  のジッターは peak-to-peak で 0.2% である。

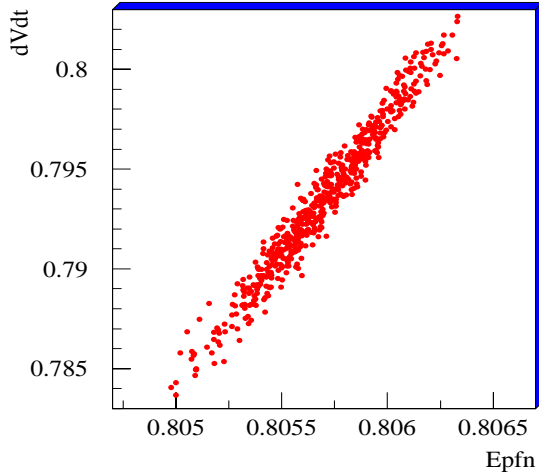


FIG. 1.  $E_{PFN}$  と  $dV/dt$  の相関

この相関は次のように理解することができる。deQ が動作するまでにはある一定の時間が必要であり、その時間に相当する電圧だけ  $E_{PFN}$  が過分に充電される。充電勾配がパルス毎に変動すると、この過充電分が変化し、 $E_{PFN}$  が変動してしまう。

この問題を解決するためには、 $dV/dt$  の変動を抑える必要がある。しかし使用している AC6.6kV ラインと AC200V ラインは他の電源などの影響で振幅にして数%の変動幅をもっており、これを抑え込むことは非常に難しい。

そこで  $dV/dt$  変動は存在するものとして、それを補償する deQ の方法を考える。 $E_{PFN}$  の充電には 10 ms 以上の時間を要する。充電なかばでその勾配が測定できたとして、deQ が実際に動作するまでには 5ms 程度の時間的余裕がある。その間に  $E_{PFN}$  の変動を補償するような deQ タイミングの微調整を行う。

FIG. 2 は feed-forward 制御を組み込んだ deQ モジュールのブロック図である。上半分は従来の deQ 回路を、下半分が今回あらたに組み込んだ feed-forward 回路を表している。Ref と Trig.in は各々基準電圧、充電開始のトリガー信号の入力である。

従来の deQ 回路では、 $E_{PFN}$  と基準電圧を comparator に入力し、その出力を deQ 信号 (充電停止) として外部に出力するが、feed-forward 回路では、deQ 信号の遅延時間を、パルス毎に  $dV/dt$  信号をもとに制御する。 $dV/dt$  信号は  $E_{PFN}$  を微分回路に入力し、増幅後適当な時点でサンプルホールドをかけることによって得られる。 $dV/dt$  信号と基準電圧とを差分増幅し、A/D 変換したのち、その信号の大きさに比例した遅延を設定する。 $dV/dt$  が大きい場合は早めに、また  $dV/dt$  が小さい場合は遅めに deQ 信号を出力し、 $E_{PFN}$  の到達電圧を一定にするように feed-forward がかけるのである。

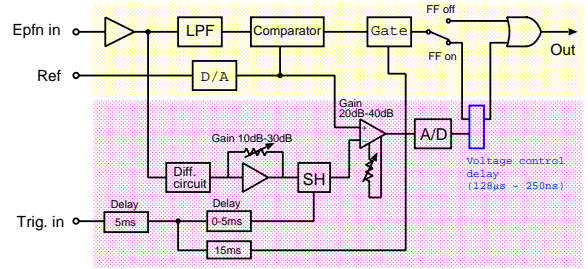


FIG. 2. feed-forward deQ のブロック図

### III. OPERATION

1999 年暮れから 2000 年初頭にかけて、feed-forward 回路を加えた deQ モジュールを linac の 9 台の modulator に組み込み、動作テストを行った。当初は thyatron の放電ノイズによる誤動作が問題となったが、タイミングによる inhibit 回路を組み込むことで問題を解決した。

feed-forward 回路の最適化を次の手順で行った。

- 1) サンプルホールドのタイミングを、 $dV/dt$  信号の出力が最大となる場所に設定する。
- 2)  $dV/dt$  に対する増幅率を調整し、基準信号とほぼ等しくなるようにする。
- 3)  $dV/dt - E_{PFN}$  の相関を見ながら、 $E_{PFN}$  が一定となるように差分増幅のゲインを調整する。FIG. 3 は  $dV/dt - E_{PFN}$  相関を模式的に示したものである。a) は feedforward のゲインが小さい状態、b) はゲインが大きすぎる状態、c) が最適化された状態である。

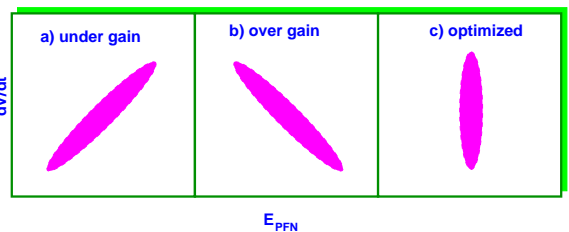


FIG. 3.  $dV/dt$  と  $E_{PFN}$  の相関。a) は under gain, b) は over gain, c) が最適化された状態を表している。

TABLE II は 9 台の modulator について、各設定を最適化したのちに、feedforward 制御を有効・無効にした場合の  $E_{PFN}$  の到達電圧の安定度がどれくらい変化したかをしらべた結果である。表示は  $\sigma$  の相対値で、単位は%である。

誤差は測定値の 10%以下であるので、この結果から、feed-forward 制御の deQ への導入によって、#4 を除く 8 台の modulator で  $E_{PFN}$  の到達電圧が有意に安定化されたことがわかる。

modulator	#0	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
disable	.031	.089	.107	.106	.015	.064	.071	.097	.033
enable	.011	.036	.070	.070	.014	.029	.045	.036	.009

TABLE I. 最適化後に feed-forward を有効、あるいは無効にした場合のモジュレーターの到達電圧の安定度。表示は  $\sigma$  の相対値で単位は%。

feed-forward deQ によるビームエネルギーへの効果を調べるために、実際にビームを加速し、その安定性を調べた。測定は linac で 1.3 GeV まで加速した電子ビームを beam transport line に通し、dispersion の大きな場所でその中心位置を strip line 型の Beam Position Monitor (BPM) で測定し、相対的なビームの運動量の変化を測定した。

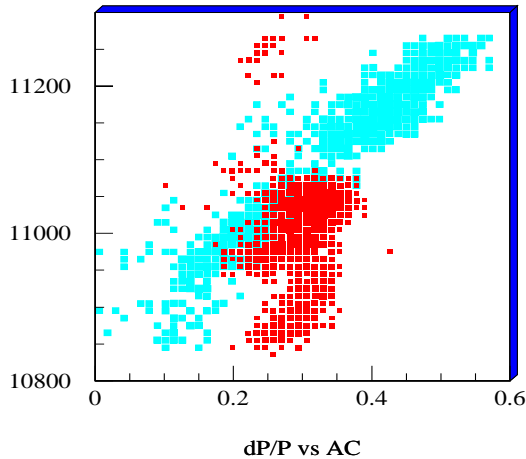


FIG. 4. 縦軸は AC200V の振幅変動、横軸はビームの相対運動量、 $\Delta P/P$  を表す。濃い部分 (赤) と薄い部分 (青) のデータはそれぞれ feed-forward 制御を有効・無効にした場合のデータである。

Dispersion の導出には KEK で開発されたビームの軌道解析ソフト SAD (Strategic Accelerator Design) を用いた。BPM の位置での dispersion は 0.687 m, 典型的な BPM のビーム中心の相対位置精度は  $10\mu\text{m}$  なので、運動量に対する BPM の感度は  $\Delta P / P \sim 0.001\%$  である。

FIG. 4 は AC200V ラインの振幅と、ビームの相対運動量、 $\Delta P/P$  をプロットしたものである。濃い部分と薄い部分のデータはそれぞれ feed-forward 制御を全ての modulator について有効にした場合と、無効にした場合である。feed-forward 制御を無効にした場合は AC ラインの振幅の変化によって、ビームエネルギーも変動してしまっているのがよくわかる。それに対して feed-forward 制御を有効にした場合は、運動量の変動が抑制されている。運動量の相対値の変動は feed-forward が無効の場合で 0.6%、feed-forward を有効にした場合で 0.2% (いずれも Peak-to-peak) であった。

#### IV. NON-LINEAR EFFECT

FIG. 5 は feed-forward を有効にした場合の  $dV/dt$  と  $E_{\text{PFN}}$  をプロットしたものである。この  $dV/dt$  と  $E_{\text{PFN}}$  が線形からずれるという現象は全ての modulator にみられるものである。この現象は modulator が共振充電をもちいているために  $E_{\text{PFN}}$  が直線ではなく曲線的に昇圧していくことによっている。

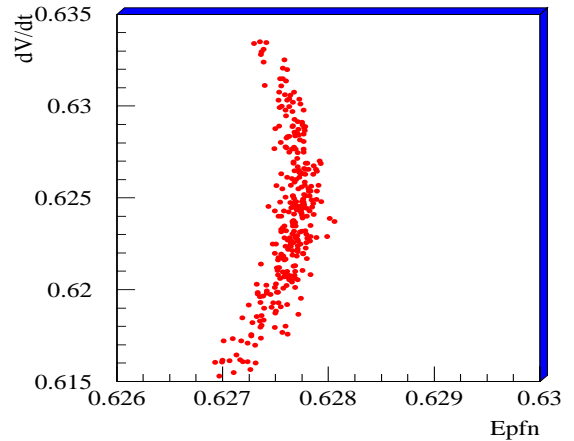


FIG. 5. feed-forward 制御を有効にした場合の  $dV/dt$  と  $E_{\text{PFN}}$  をプロットしたものである。

本来 feed-forward 制御は充電曲線の終盤の  $dV/dt$  信号の傾き、 $\theta$  をもとに行われるべきだが、実際には回路の動作速度等の問題もあり充電曲線半ばの傾き、 $\theta'$  を用いて行っている。この  $\theta$  と  $\theta'$  は、その傾き ( $dV/dt$  の絶対値) が大きくなればその差は小さく、傾きが小さくなれば差が大きくなる。

実際の回路においては、ある  $dV/dt$  の傾き  $\theta_1$  について、 $\cot \theta_1 = G \cot \theta'_1$  となるようにゲイン調整をしている。したがって傾きが  $\theta_1$  より大きい領域では  $\cot \theta < G \cot \theta'$  となり、feed-forward がオーバーゲインとなる。また傾きが  $\theta_1$  より小さい領域では  $\cot \theta > G \cot \theta'$  となり、アンダーゲインとなる。つまり、ある最適化された点を境として、上側が FIG. 3 b) の状態、下側が a) のような状態となる。

現在、この特性を改善するために、 $dV/dt$  信号の大きさにしたがってゲインを変化させる回路を製作中である。この改造によりさらに二倍程度の安定度が得られると期待される。

#### V. まとめ

KEK-ATF の 1.5 GeV S-band linac 安定化のために、feed-forward 制御を用いた deQ モジュールを製作し、9 台の klystron-modulator に実装した。それにより、modulator の電圧の安定度が最高で三倍程度向上した。また linac のエネルギーのパルス毎の変動幅も peak-to-peak で 0.6% から 0.2% へと向上した。

Damping ring 内での beam 電流を目標の 1% 以内で安定させるためには、linac の beam energy の変動幅を 0.1% 以内に抑える必要がある。今後は feed-forward 回路により発生する  $dV/dt$ - $E_{\text{PFN}}$  曲線の歪みを補正する回路を作成し、さらに二倍の安定度の実現を目指す。

[1] <http://lcdev.kek.jp/ATF/> を参照。

[2] 早野仁司他, 'Klystron RF stabilization using feed-forward circuit', 19th International linac conference at Chicago, 1998