

[F17p05]

## Stabilization of Klystron RF by Feedforward Circuit

D. Aizawa, M. Higuchi, T. Sakamoto & H. Hayano\*

Touhoku-Gakuin University  
Chuo 1-13-1, Tagajo, Miyagi 985 Japan  
High Energy Accelerator Research Organization  
Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

### Abstract

In ATF, beam energy in linac should be stabilized to less than 0.1% (peak to peak) to inject a beam stably from the linac to damping ring. Beam energy in the linac is very sensitive to the klystron RF amplitude and phase. Normally klystron RF is stabilized pulse to pulse by the modulator deQing circuit to 0.4% peak-to-peak in amplitude and 1.5 degree peak-to-peak in phase. In order to reduce these fluctuation down to 0.1% in amplitude and 1 degree in phase, we developed a feed-forward which is applied to the deQing circuit. We report the detail of the feed-forward circuit and the test result.

### フィードフォワード回路によるクライストロン RF の安定化

#### 1.はじめに

高エネルギー加速器研究機構の次世代線形加速器の試験加速器施設(ATF)では、ダンピングリングへ安定なビームの入射を行うために、LINACのビームのエネルギー変動を0.1%以下にする必要がある。ATFでは電子ビームを生成するのに熱陰極電子銃を用いているが、生成された電子ビームがSHB、Buncher、加速管を通るときに、クライストロンで生成されるRFによってバンチング、及び、高周波加速を行う。クライストロンで発生したRFの振幅、位相が安定でない場合、ビームのバンチング、又は加速が安定せず、バンチ毎のビームのバンチ長や、ビームのエネルギーが変わり、ダンピングリングに安定に入射できなくなる。それらの条件からクライストロンのRFの振幅、位相の変動はできる限り抑えなければならない。現在のLINAC、ダンピングリングの状況から要求されているパルス毎のRFの変動は、振幅で0.1%、位相で $1^\circ$ 以下である。

これに対して現在のクライストロンのRFはパルス毎で、振幅で約0.4%、位相で約 $1.5^\circ$ の変動が測定されている。これは、現状でのビームのエネルギーの広がりを見ると、ダンピングリングから要求されている値よりも大きい。以前の相関測定より推測されているように、ビームのエネルギー変動に大きな影響を持つのは、クライストロンの出力RFの振幅、及び、位相であり、その安定化の開発研究が必要である。

RFの安定化のためにクライストロンの電源電圧の安定度の測定を行い、RFとの相関を捜した結果、PFN充電電圧とRFとが相関を持って変動していることがわかったのでフィードフォワードによる充電電圧の安定化の開発を行い、RFの安定化を試みた。

#### 2. deQ 回路による充電電圧の安定化

クライストロンでRF増幅をさせるときは、PFN (pulse forming network) 内のコンデンサーに数10kVの電圧まで充電しサイクロトンのスイッチング動作によりパルスを形成しパルス変圧器で変圧を行いHVパルスとして

クライストロンのグリッド、カソード間に加えられる。このHVパルスの電圧が変動するとクライストロンの出力RFの振幅と位相も変動を持つことになる。変動の少ないRFを得るためには、RFを作るためのクライストロン内のビームの変動を抑える必要がある。現在のモジュレーターには安定したHVパルスの供給するためにdeQ回路が組み込まれている。あらかじめこのdeQ回路に基準電圧を設定しておき、PFNに充電される電圧が基準電圧に達したらチョークトランスの2次側のコイルに電流を流し込むことで、充電を抑えPFNに充電される電圧の最大値を以前の電圧で一定の充電電圧が得られるようにすることでPFN充電電圧の安定化を図っている。

PFNに充電される電圧が全幅で約0.1%の変動をすることと、PFN充電電圧の到達電圧とPFN充電電圧の微分波形のピーク値が相関を持つことが以前の相関測定より確認されている。PFN充電電圧の微分波形のピーク値はPFNに充電勾配の最大値を示す。このピーク値がPFN充電電圧の到達電圧と相関関係にあるということは、充電完了以前に充電後の予測できることを示している。

#### 3. deQ トリガーフィードフォワード回路による充電電圧の安定化

deQ回路をさらに安定化させる方法として、充電電圧を予測制御するフィードフォワード回路を組み込んだ物が開発された。開発されたフィードフォワード回路の動作について説明する。まず、PFNの充電電圧を微分回路に通した後でサンプルホールドをおこない微分波形のピークをとる。あらかじめ微分波形のピーク値の基準を設定しておき、その値と測定値を比較し、差をとって誤差信号とする。その誤差信号をA/D変換をかけたあと、VOLTAGE CONTROL DELAYを通すことで誤差信号の大きさに応じて250ns~100 $\mu$ sのDELAYを得る。このDELAYにより、パルス毎の充電電圧の立ち上がり設定よりも大きいときにはDeQトリガーを早いタイミングで合わせ、立ち上がりが小さいときはDeQトリガーを遅いタイミングで行う予測制御を行う。これがDeQトリ

ガーフィードフォワード回路と呼ばれている回路の動作である。この回路のタイミングチャートを [図 1] に示すとともにフィードフォワード回路のブロック図を [図 2] に示す。

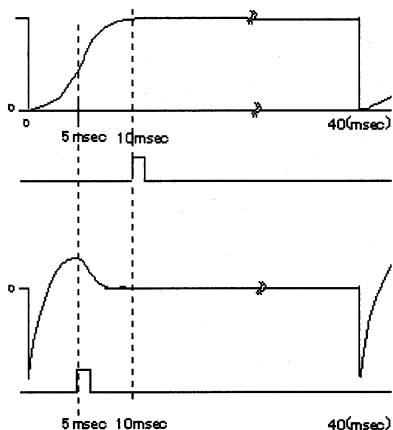


図 1 フィードフォワードのタイミングチャート

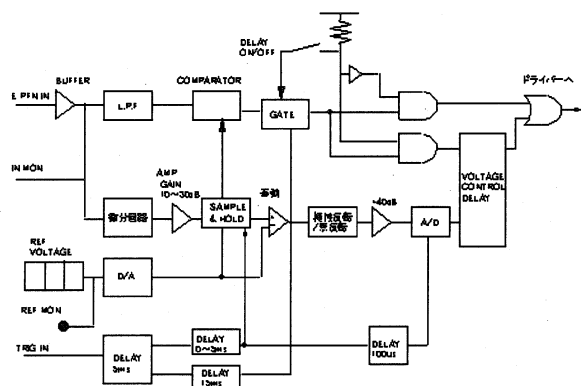


図 2 フィードフォワード回路のブロック図

DeQ トリガーフィードフォワード回路を安定に動作させるためには、微分回路の後にあるアンプのゲイン、即ち、フィードバックゲインを調整する必要がある。フィードフォワード回路のゲインを、ゲイン調整つまみの目盛りで 7.2, 6.5, 6.0 と変え、それぞれの場合についての PFN の充電電圧と PFN 電圧 SLOPE (誤差信号) の相関測定を行った。その結果を [図 3] に示す。

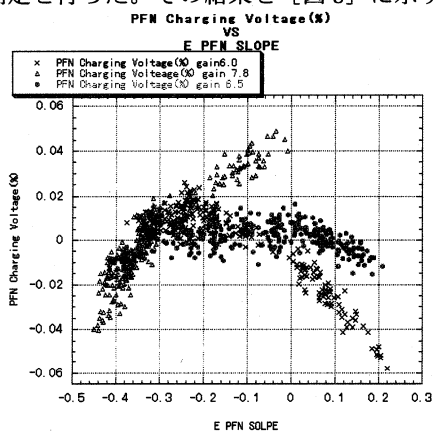


図 3 フィードフォワードのゲインサーチ

その結果、ゲインを 6.5 に設定した時がもっとも PFN の充電電圧の変動が抑えられたので、これに設定した。

PFN の充電電圧の立ち上がりがある基準をよぎる時刻、と deQ トリガーが発生したときの時刻の差を  $\Delta t$  とする。 $\Delta t$  は、フィードフォワードによって、deQ トリガーをどのぐらいの範囲で制御したかを示している。この  $\Delta t$  と PFN 電圧 SLOPE との相関測定をおこない、 $\Delta t$  の範囲を測定した。その測定結果を [図 4] に示す。

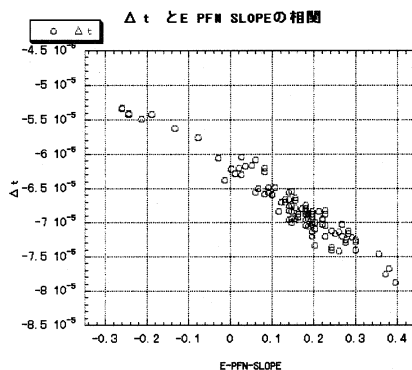


図 4  $\Delta t$  と PFN 電圧 SLOPE

$\Delta t$  が約  $30 \mu s$  の幅を持つことがわかった。これは、フィードフォワード回路が PFN の充電電圧を一定にするため約  $30 \mu s$  の範囲の制御を行っていることを示している。

PFN の充電電圧を安定化するために deQ 回路にフィードフォワード回路を組み込み、その性能を出すための調整として最適なゲインを求め、フィードフォワード回路によってどのぐらいの制御ができるかを測定した。この回路が PFN の充電電圧の変動を抑える効果があるか調べるために PFN の充電電圧と PFN 電圧の SLOPE との相関測定をおこなった。この測定ではフィードフォワードをかけた状態とかけない状態の測定を行い結果を比較する。その結果を [図 5] に示す。

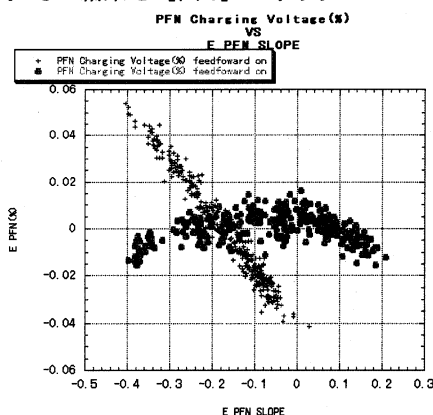


図 5 PFN 充電電圧と PFN 電圧 SLOPE との相関

フィードフォワード ON、OFF の比較

ゲインの設定は 6.5 で測定をおこなった。PFN の充電電圧はフィードフォワードを使用しないときに約 0.1%の

変動を持ち、使用したときは約 0.04%に抑えられたことがわかる。

#### 4. クライストロン出力 RF の安定度の測定

フィードフォワード回路を使うことによって PFN の充電電圧の安定化が成功したことがわかった。PFN の充電電圧が安定化されたによる、クライストロンの出力 RF の安定度への効果を調べた。RF の安定度を測定するためにクライストロンの出力導波管からの RF の振幅、位相の変動を測定する。測定に使う RF は、LINAC の加速管に入力する RF をペーテホールカップラー (-70dB の結合度) を用いて引き出す。

振幅と位相の測定図を [図 6] に示す。

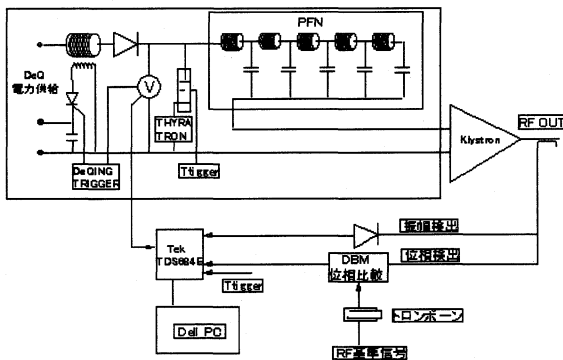


図 6 クライストロン出力 RF の振幅、位相の測定図

クライストロン出力 RF の振幅の測定方法を説明する。RF の振幅を測定する場合、引き出してきた RF をローパスフィルター、アッテネイター、高周波検出器 (HP8470B) を通してオシロスコープで拡大測定し GPIB を使いコンピュータで記録する。その測定結果を [図 7] に示す。

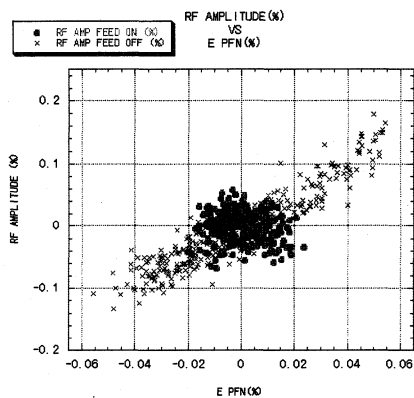


図 7 クライストロン出力 RF の振幅と PFN の充電電圧との相関  
フィードフォワード ON, OFF の比較

クライストロン出力 RF の位相の測定方法を説明する。位相を測定する場合、検出した RF 信号と 2856MHz の基準信号をダブルバランスミキサー (RHG DM8-12) にいれてその出力を電圧として検出した後で位相の変化に変換する。この変換には、基準信号の発振器と DBM の間にトロンポーンを入れて位相変化 1° あたりの電圧が

何 mV に相当するかを測定しておきその値を使用する。位相の変動を示す電圧をオシロスコープで拡大測定し GPIB を使いコンピュータで記録する。その測定結果を [図 8] に示す。

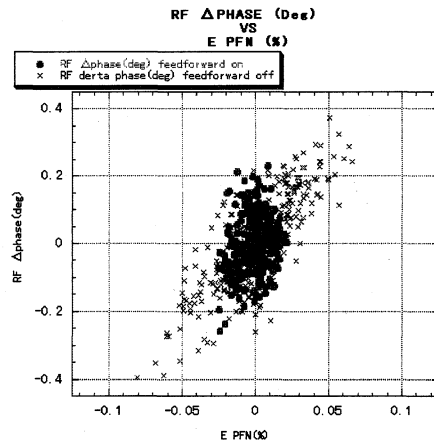


図 8 クライストロン出力 RF の位相と PFN 充電電圧の相関  
フィードフォワード ON, OFF の比較

結果をまとめると、パルス毎の振幅の変動はフィードフォワード回路を用いないとき、全幅で 0.4% が測定され、フィードフォワード回路を用いたときは振幅の変動が 0.1% に抑えられた。パルス毎の位相の変動はフィードフォワード回路を用いないとき、全幅で 0.8° が測定され、フィードフォワード回路を用いたときは振幅の変動が 0.4° に抑えられた。この測定は 25Hz で運転されているクライストロンを、波形記録の都合上 3 秒毎に記録され、300 点の測定点をまとめたものである。したがって、約 15 分の変動を記録したことになる。なお、クライストロンの電源の入力 AC200V はこの間に約 1.5% 程度、ゆっくりと変動していた。

#### 5. まとめ

クライストロン電源の deQ 回路にフィードフォワード回路を使用することにより、PFN の充電電圧の変動が 0.1% から、0.04% に抑えられた。それにしたがって、クライストロン RF の振幅が約 0.4% から約 0.2% に、位相の変動が約 0.8° から 0.4° に抑えられることが測定の結果わかった。DeQ トリガーフィードフォワード回路が正常に動作して、クライストロンの出力 RF を安定化していることが確認できた。

#### 6. 参考文献

- 坂本 智弘  
大電流電子リニアックのビームの安定化の研究  
(東北学院大学修士論文)
- ATF リニアックのクライストロン RF 安定化  
(KEK ATF report)