

BEAM LOADING COMPENSATION FOR SHORT-PULSE HIGH-CURRENT BEAMS

Shozo ANAMI, Atsushi ENOMOTO, Satoshi OHSAWA and Isamu SATO
KEK, National Laboratory for High Energy Physics
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305

ABSTRACT

The beam loading effect of short-pulse beams, compared to the filling time of accelerating structures, can be compensated by changing a period of bunch repetition from that of accelerating rf waves. The compensation method, calculation and effect about the case of the PF linac are described.

短パルス大電流ビームのビーム負荷補償

1. はじめに

KEK-PFリニアックでは、Bファクトリー計画の入射器としてより強度の強い陽電子発生が求められている。いくつかの入射方式とそれらに伴うリニアックの増強方式が考えられているが、その中の一つの候補として現在の10倍の強度を持つ陽電子を発生させ、600MeVまで加速する方法がある。この場合、リニアックのエネルギー増強は必ずしも必要ではなく、単に、現在200MeVの位置に置かれた陽電子発生標的を下流の2 GeVに移す事になる。リニアックの下流には100MHzの空洞を備えるcooling ringが設けられる。この方式でリニアックの課題となるのは、如何に大電流の電子ビームを質の低下なく標的まで加速する事が出来るのかという事である。ここで要求される電子ビームは、パルス幅が10nsで、電流は出来るだけ多くであるが、加速管に蓄えられるrfエネルギーには限りがあり、その10~20%分に当たる2~4Aの加速が一応の目標となる。このような大電流、マルチバンチの加速で常に問題となるのは、ビームで誘起されるrfによる横方向のビーム発散と縦方向のエネルギー拡がりである。ここではこのエネルギーの拡がりを押さえるためのビーム負荷補償について、その方法と効果及びその問題点等を取り扱う。

2. ビーム負荷補償の方法

進行波型リニアックで古くからよく行われている過渡的なビーム負荷効果の補正方法は、加速管がまだ十分に加速電場で満たされていない filling time の途中の段階からビームを入れ始める方法である。例えば、ビームパルスの終わりで10%のビーム負荷が見込まれるならば、rfパルスが加速管の90%に達したところで

ビーム入射を開始する。この方法で少なくともビームパルスの始めと終わりのエネルギーを揃える事が出来るが、ビームパルスが終わる前にはrfパルスが加速管の終端まで達していなければならない。このことからこの方法で補正できる最大量は、加速管の T_f に対するビームパルス幅の割合で決められる(定電界型では更に小さくなる)。従って、50ns以下の短いパルス幅で大電流を加速しようとする場合にはこの方法を用いる事が出来ない。

このようなパルス幅の短い場合の負荷補償として、パルス内のバンチ間隔をrfの周期と違える事によって、それぞれのバンチが乗るrfの位相を変えて、エネルギー補正を図る方法が考えられる。即ち、ビーム負荷の影響を殆ど受けない先頭バンチはrfの波頭から最も速くに置き、ビーム負荷の影響を次第に大きく受ける後続バンチになるに従ってrfの波頭に近づける方法である。rfの周期と異なるバンチ列を得るには、プリバンチャ・バンチャを含む入射部の周波数を他の全てと異なるものにすればよい。他の方法として偏向磁石を用いてエネルギー差による航路差で得る事もできるが、ここではビームの質を損なうことのない入射部の周波数を変える方法で考える。

同じように周波数を変えてビーム負荷補償を行う方法として、入射部を除くリニアックの一部を別の周波数系とし、この一部をエネルギー差の補正専用として用いる方法がある。しかし、この方法では、この一部がビームに対して加速・減速の位相になるため、その割合に相当して加速エネルギーが低下する。又、大型加速器では異なる周波数にしなければならないこの一部の数が多数なものともなる。このため、特に既設

であるPPリニアックにこの方法を用いるのは困難であると考えられる。

3、ビーム誘起電圧の成長とその補償

まず、 n 個のバンチ列が加速管を通過したときに誘起する電圧について考える事にする。この状態を P. B. Wilson による phasor diagram で表示すると図1の様になる[1]。ここで基準となる実軸をバンチ電流の方向に取り、この軸がバンチの繰返し周波数(ω_b)で回転していると考え。従って、それぞれのバンチで誘起される電圧の位相(周波数は分散特性曲線で位相速度 C と重なる基本周波数 $\omega_{rf}(=2856\text{MHz})$)は、バンチごとに $\delta(=T_b - T_{rf} = 2\pi/\omega_b - 2\pi/\omega_{rf})$ ずれて行く。今 n 番目のバンチが丁度通過したところであるとすると、それぞれのバンチによって誘起される電圧の総和は、

$$\vec{V}_{bn}^+ = V_{b0}(1 + e^{-\alpha}e^{j\delta} + \dots + e^{-(n-1)\alpha}e^{j(n-1)\delta}) \quad (1)$$

と表される。

ここで $\alpha = \omega/2Q \cdot T_b$ であるが、パルス幅 $n \cdot T_b(10\text{ns})$ が加速管の filling time $T_r(=0.5\mu\text{s})$ に比べて十分に短いのでこの間の減衰は無視できる。又、ここまで断らなかったが、やはりパルス幅が短い事から、誘起される波はこの間に加速間を殆ど進行せず、出口側からもれ出すこともないとしている。 n 番目のバンチが見る減速電圧は、(1)式で与えられる電圧の実数部から自分自身が誘起する電圧(V_{b0})の1/2を差し引いた値とな

る。又、外部rf源による加速電圧は図1を参考にして求められ、結局 n 番目のバンチが受ける合成された加速電圧 V_n は次式で与えられる。

$$V_n = V_{rf} \cos(\theta - (n-1)\delta) - V_{b0} \frac{\sin(n-1/2)\delta}{\delta} \quad (2)$$

ここで V_{rf} は零電流加速電圧、 θ は最初のバンチが乗るrfの波頭からの位相である。

今、ビーム負荷補償を適用する条件として、最初と最後のバンチが受ける加速電圧((2)式で $n=1$ と $n=N$)が等しく、最後のバンチが外部rf源による電圧の波頭($\theta = (N-1)\delta$)にあるとすると、

$$V_{b0}/V_{rf} = \frac{1 - \cos\theta}{(N-1)\sin\theta/\theta} \quad (3)$$

が求められる。この V_{b0} を(2)式に代入すると、ビーム負荷補償後の n 番目のバンチが受ける加速電圧が得られる。

$$V_n/V_{rf} = \cos(\theta - (n-1)\delta) - \frac{1 - \cos\theta}{\sin\theta} \sin(n-1/2)\delta \quad (4)$$

ここで、 N が大きいとして $(n-1/2)\delta \approx (n-1)\delta \equiv \phi$ とすると、上式は次のように書き表される。

$$V_n/V_{rf} \approx \frac{\cos\theta}{\cos(\theta/2)} \cos(\phi - \theta/2) \quad (5)$$

この式が、ここまでの計算で求めようとした結果を与えるもので、 N 個のバンチ列からなるパルス内のエネルギー変化を示している。この式で明らかのように、エネルギー分布はパルスの中心で最大となる cosine 曲線で、その最大値は $V_{rf} \cos \theta / \cos(\theta/2)$ 、又パルスの両端で最小値 $V_{rf} \cos \theta$ をもち、エネルギーの拡がりは、

$$\Delta V_n/V_{rf} = \left(\frac{1}{\cos(\theta/2)} - 1 \right) \cos\theta \quad (6)$$

となる。

これらをPPリニアックに適用すると表1に示すような結果が得られる。この表は無補償時のビーム負荷の程度($\Delta V/V$ 、エネルギーの拡がり)に対応してまとめており、負荷補償によってエネルギーの拡がりほぼ4分の1に圧縮されているのが分かる。ただ、平均加速利得($\langle V \rangle_{\text{comp}}$)の低下も見られるが、これは、この方法が外部エネルギーによる補償ではなく、波頭からのずらしによるものであるため止むを得ない事である。表中の電流 I_0 は、 $V_{b0} = 2k_0 q = I_0 r \tau (T_b/T_r)$ 及び $\Delta V = NV_{b0}$ によって次式で与えられる。

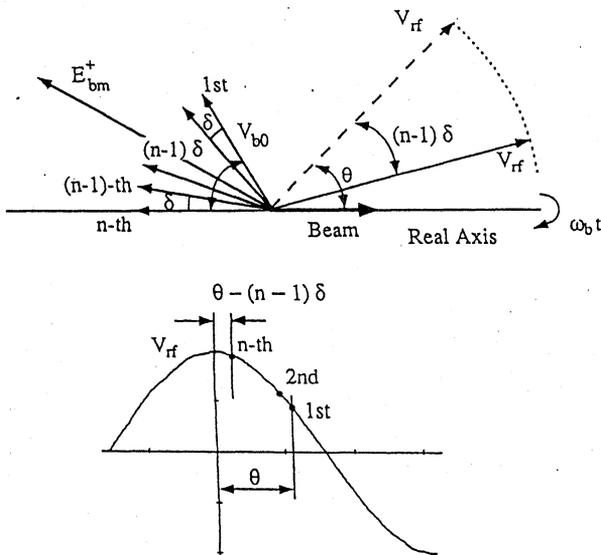


図1 ビーム誘起電圧と外部rf電圧の位相関係

表1 ビーム負荷補償のパラメーターとその効果

$\Delta V/V]_{no}$ (%)	$\langle V \rangle_{no}$ (MV/m)	I_0 (A)	θ (deg)	Δf (MHz)	$\langle V \rangle_{comp}$ (MV/m)	$\Delta V/V]_{comp}$ (%)
5	9.75	1.1	17.7	4.93	9.59	1.2
10	9.50	2.2	25.0	6.94	9.19	2.4
15	9.25	3.2	30.5	8.46	8.80	3.5
20	9.00	4.3	35.0	9.73	8.42	4.8
25	8.75	5.4	39.0	10.8	8.04	5.9
30	8.50	6.5	42.6	11.8	7.67	7.2

$$I_0 = 1 / (r \tau) \cdot (T_r / NT_b) \cdot \Delta V$$

又、最初のパンチの位相シフト θ は(3)式によって求められる(PFリニアック: $r=58M\Omega/m$, $\tau=0.4$, $T_r=0.5\mu s$, $V=10MV/m$)。

4、二次的な補償

以上の様に本ビーム負荷補償の方法では、ビーム誘起による電圧が通過するパンチ数にほぼ比例して成長するのに対して、位相シフトによる外部rfの電圧の変化が非直線の為、エネルギーの拡がりを4分の1程度までにしか圧縮する事が出来なかった。この拡がりを更に圧縮するには何か二次的な補正を加えなければならない。考えられるものとして、エネルギー利得を多少犠牲にしてしまうが、最終パンチの位相を非直線性の大きい加速電界の波頭からずらす方法と、電流パルス波形を平坦なものから傾いたものにする方法とがある。

まず、最終パンチを波頭からシフトさせる方法であるが、この方法ではシフト量に応じてエネルギーの拡がりを小さく出来るが、その分加速利得が低下してしまう。このためここでは、この利得低下の許容限界が5%程度であると考えて、シフト量 θ_0 を15度とした。この時の先頭パンチの位相 θ は先に行った手法、即ち、

先頭と最終のパンチの加速電圧を等しくする為の条件式を用いて算出する。次の電流波形に変化を持たせる方法であるが、予測される波形は、(9)式で得られるパルス内のエネルギー変化から、これを打ち消すような変化率を持つ波形、即ち、近似として直線的に下がる波形である事が分かる。

これらの具体的な計算は紙面の都合上ここでは行わないが、表1にあった $\Delta V/V$ が10%と20%の場合についてそれぞれの計算結果を表2に示している。位相

シフトによる二次補正については、加速利得の低下が大きい割には効果が期待する程でない様である。次の方法についての計算では、パルスの傾きを現実的に得られ易い指数関数で与えている。表に示すdroopの割合は、パルスの両端及び中心の3点でエネルギーが等しくなるようにして求めた値であり、この時にエネルギーの拡がりが最小になる。この方法による効果は、かなり大きな垂れ下がりが必要としているが、先の一次補償で4分の1圧縮されたされた拡がりを、更にその5分の1までには押さえてている。

5、本ビーム負荷補償の問題点

本ビーム負荷補償でパンチ間に対しては十分にエネルギーの拡がりを押さえることが出来た。しかし、大きく波頭からずらした場合、パンチ幅の拡がりによりエネルギーの拡がりの方が大きくなってしまう。このため、本方法が適応できるのはほぼ $\Delta V/V$ が15%程度と考えられる。

参考文献

- [1] P. B. Wilson, "High Energy Electron Linac: Application to Storage Ring Rf systems and Linear Colliders", AIP Conference Proceedings, no.89, pp.450-482.

表2 二次的ビーム負荷補償の効果と比較

補償なし		一次補償			最終パンチの位相シフト				垂れ下がり電流		
$\Delta V/V$ (%)	$\langle V \rangle$ (MV/m)	θ (deg)	$\langle V \rangle$ (MV/m)	$\Delta V/V$ (%)	θ_0 (deg)	θ (deg)	$\langle V \rangle$ (MV/m)	$\Delta V/V$ (%)	droop (%)	$\langle V \rangle$ (MV/m)	$\Delta V/V$ (%)
10	9.5	25.0	9.19	2.4	15	29.5	8.73	0.8	83	9.03	0.5
20	9.0	35.0	8.42	4.8	15	38.9	7.85	2.2	79	8.12	0.9