

簡便なバック・レグ巻き線駆動法による KEK-PS BOOSTER の軌道補正

戸田 信、佐藤康太郎、染谷宏彦、二宮重史

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県 つくば市 大穂 1-1

概要

速い繰り返しの加速器電磁石に巻いたバック・レグ巻き線の簡便な駆動方法を報告する。原理のかなめは、二つの電磁石のペアを選び、バック・レグ巻き線に誘起する主電源の電圧を互いに消しあうように結合し、そのループの中に定電流電源を挿入することにある。こうして、電圧消去用のトランスを省略すると同時に、電源にかかるコストを大幅に低減する。KEK-PS-Booster での補正結果を報告する。

1 KEK-PS での歴史と我々のねらい

KEK 陽子加速器でも、今まで何人かがバック・レグ巻き線を使った軌道補正を試みてはいるが、駆動電源の故障等が頻発して、いずれも実用化にはいたっていない。KEK-PS Booster の場合は、補正電流を小さくするように設計しているために、補正巻き数を大きくしていた。従って、動作中の最悪状態での電源端子での誘起電圧は、700V にも上るようになっていた。結局この補正巻き線も使われずに放置されていた。

KEK-PS Booster の場合、入射エネルギーが当初の設計の 20MeV から 40MeV に上がったことで、水平方向のアーチャは重視されなかったことも、軌道補正を等閑視した理由であろう。だが、酒井[1]の報告にもあるように Beam 入射時の閉軌道歪は振幅で言う、19mm(peak to peak)もある。閉軌道歪の補正は、加速器運転の第一歩とも言える基本的な事柄である。これをなおざりには出来ないと考えて、この仕事をスタートした。設計の際の基本理念は次のとおりである。

- (1) 既設の巻き線を流用する。
- (2) 実用機とする。スイッチ 1 つで動作状態となるものとする。
- (3) Beam 入射から取出しまで、連続に補正可能とする。

われわれのプランの初期段階には、電磁石の主電源から電力を取り、そのエネルギーを蓄積して補正電流を流すという新しいタイプの方式を考えていた。これも良い方法であるが、議論の結果、本報告の方式となった。この方式は、電磁石の主電源への影響が皆無であるからである。

2 装置の構成

2.1 軌道補正の原理

二つの電磁石のペアを選びそれらのバック・レグ巻き線を、主電源による emf が消しあうように結合する。そのループ中に定電流源を接続する(図 1)。こうして、定電流

電源への主電源からの影響を無くするのである。定電流電源の電圧は、バック・レグ巻き線とケーブルの Inductance と補正電流の電流変化率で定まる。

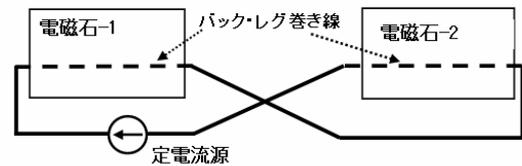


図 1: 巻き線の結線図。

ペアをうまく選ぶと、閉軌道歪を消去できるのである。例えば、8 個の電磁石のうち M7 と M8 をペアとして、おのおのの電磁石の中心に、-3mrad, +3mrad の Kick を入れる(図 2 の中央の折れ線)と、図 2 の四角印で示した閉軌道歪を再現することが出来る。丸印は、[1]から採った閉軌道の測定値である。従って、これらの逆極性の Kick で閉軌道歪が補正できるのである。この例では、19mm_{p-p} の振幅が、8mm_{p-p} と 1/2 以下に出来ることを示している(図 2 の菱形)。この計算で使った Cell 構造は、OFDDFO と簡略化し、Edge focus は無視している。M1~M8 は電磁石を、S1~S8 はストレート・セクションを示す。ストレート・セクションでの閉軌道が先述の四角印である。

水平方向の betatron tune は 2.18 となるように F と D の強さを定めた。

因みに、図 1 では、1 ターンしか示していないが、最大 4 ターンまでの任意の巻き数に出来るようにした。

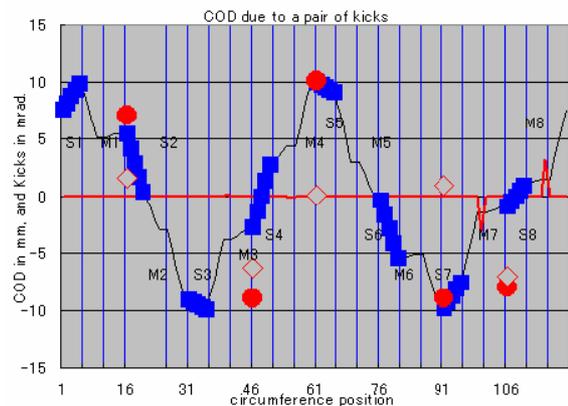


図 2: 閉軌道歪の再現。

2.2 電磁石の性質

電磁石およびその主電源の性質を知らねば、この種の装置の設計は出来ない。表 1 に必要な諸元を示しておく。

表 1：電磁石の諸元

Inductance	24.65mH
巻き数	40
Max. Current	1698A
Min. Current	412A
Repetition	20Hz
Inductance/turn	15.4μH
emf/turn	75V
Bend Angle	360/8=45°
Current/1mrad. at Inj	21AT
Current/1mrad. at Extr.	86.5AT

2.3 補正用電源の仕様

補正量は、電磁石の中央で $\pm 3\text{mrad}$ である。これから、Beam 入射の時点で、表 1 を使って、63AT となる。実際は、電磁石中央で beta 関数の値は、 $\beta_C=1.47\text{m}$ で、電磁石内の平均値は $\beta_M=3\text{m}$ であることから、この電流値を β_C/β_M 倍して、32AT でよいことになる。Beam 取り出しの時も、同じ閉軌道歪があるとすれば、このほぼ 4 倍の 132AT となる。

必要な電源電圧は、電流値と、低い周波数では、主に電源と巻き線間を結合する電線(250m)の抵抗で、高い周波数では、この電線と巻き線が有する、Inductance で定まる。

波形制御の観点から、100Hz くらいまでの最大電流振幅(100A を仮定)を可能なように考え概算すると、表 2 となる。

表 2 負荷の性質

	N=2	N=4
L_{Load}	0.123mH	0.493mH
$L_{Cable}(125\text{m})$	$\sim 0.12\text{mH}$	$\sim 0.12\text{mH}$
R_{Cable}	0.34Ω	0.34Ω
V at 100A, 100Hz	37V	47V
$\omega_L=R/\{2\pi(L_{Load}+L_{Cable})\}$	223Hz	105Hz

この表 2 から、やや冗長ではあるが、最大電流振幅を $\pm 100\text{A}$ とし、最大電圧振幅を $\pm 50\text{V}$ とできるような定電流電源を 2 台つくった。周波数特性は、微小電流振幅で、1kHz まで定電流特性を維持するものとした。なお、電流波形追

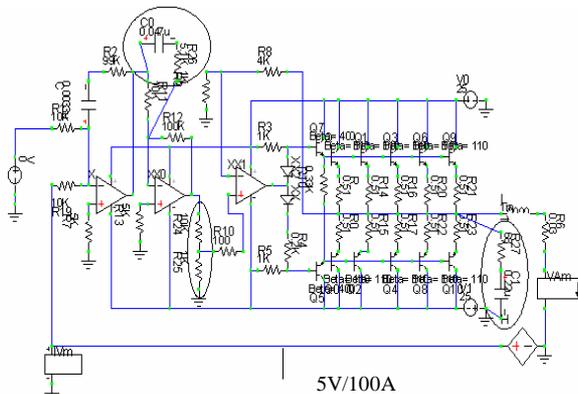


図 3：電源のシミュレーションに使った回路図。

随性を改善するために 2 次補償のテクニックを用いている[2]。図 3 は電源の特性を解析するために使った回路図である。図の左側にある C と R2 で二次補償を行っている。これらを接続することで、20Hz の信号に対する追随精度が 30 倍改善できる。この周波数で Loop gain は、通常の $\sim 34\text{dB}$ に対して、 $\sim 64\text{dB}$ にすることが出来る。今まで多くのこの種の電源に接してきたが、しばしば、この回路の定数を管理していないのではないかと疑わしい物があった。

電流波形は、多チャンネルの任意関数発生器を RF グループが使っているため、その 1 チャンネルを使用している。

2.4 DCCT が拾う Beam ノイズ

バック・レグ巻き線には強い Beam 電流波形が重畳している。この高周波ノイズで、DCCT が誤動作した。50A のスパイク電流が流れたような誤信号を出力した(Beam を加速するとき、図 3 の矢印の点に 5V ものスパイク状の外乱が観測される)。最初は、この所為で電源が過電圧トリップを繰り返した。これを避けるためには DCCT を銅版でシールドすることが最も有効であったが、ノイズを完全除去に出来るまでにはいたっていない。ノイズの主な周波数成分は、2~6MHz であることから、市販の電源用のノイズ・フィルターが有効なはずであるので、これも設置しては見したが、シールド程の効果は示さなかった。図 4 の写真の中で、加速途中にノイズの影響が残っている。

3 補正の結果

バック・レグ巻き線を使った閉軌道補正 On/Off で Beam 強度の変化を記録したのが図 4 である。二つの写真ともに、Beam のロスを最小になるように調整している。右側の写真が補正電流(中央の右下がりの cos 関数に近い波形)を流したものである。補正電流 On のときは、(1)加速器に入ってくる Beam 量が減少している。これは、入射機器のある S1 で軌道が違ってくるためである。Beam 入射機器の調整はこのときしていない。(2)Beam 入射後 1msec の Loss が減少している。(3)その時の加速軌道が中心軌道となっている。

(2),(3)は補正による良好な結果を示している。(1)は今後の調整の体制を改善すればよい。写真の ΔR 信号から、補正電流がゼロ(図 4 の左の写真)でも、DCCT に重畳する Beam ノイズの影響がでていることが分かる。 ΔR 信号はもともと、この写真よりきれいな折れ線関数になるのだが、この写真の信号には小さい凹凸が見える。これは DCCT に重畳したノイズを消去するように、誤った補正電流が流れているせいである。

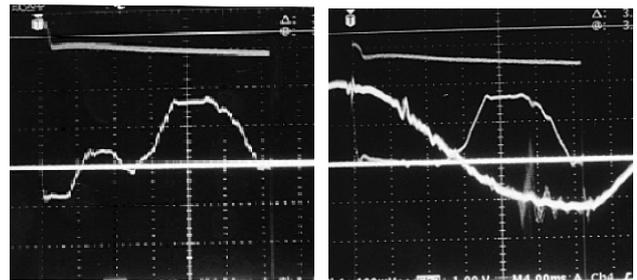


図 4：補正電流 On/Off での Beam 強度(上のトレース)の比較。中央は S5 の ΔR モニター、右写真は補正電流(入射時

S5 の ΔR の値(軌道)は、高周波の軌道制御装置で加速中は、内外に数 10mm にわたって任意に変化させることが出来る。いくつかのバックレグ電流値で、軌道変化可能な幅を測定した。軌道変化幅の最大のときの補正電流値が、閉軌道を最もうまく消去していると考えられる(図 5)。図 5 から、(1) Beam 入射近くでは、32AT が最もきれいに軌道補正しているといえる。この電流値は計算どおりである。(2) Beam 入射後 21msec の時点では、入射のときとは逆極性の電流で、もっと強い補正が必要に見える。ノイズ対策が十分ではなく、これ以上有意な測定は出来ていない。

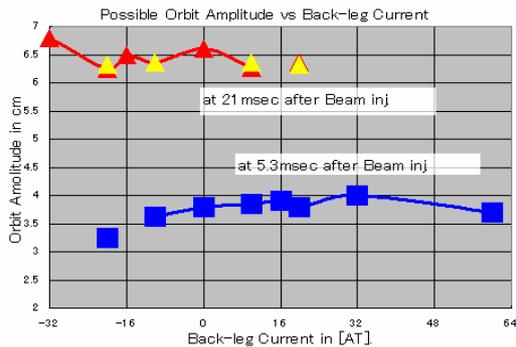


図 5 : S5 での可能な軌道変位とバック・レグ電流の関係。

以上は、M7-M8 のペア、各々の 4 ターンの巻き線を使って補正した経験である。このペアの反対側、M3-M4 ペアにも補正電流を流せるようにセットアップしていたが、これは使わずじまいであった。計算上も、M7-M8 ペアのみの方がきれいに補正されていた。これらのことは逆に、文献[1]の測定値の信頼度が高いということ傍証している。それでは、その測定値をさらにきれいに補正する方が良くだろうと考えて、見つけ出したのが次の補正方式である。

4 3 台の電磁石を使った軌道補正

電源に余裕があるので、M7-M8 のペアの巻き線数を 2 ターンにして、M6-M7 でもペアが組めるように改造する。図 6 がその概念図である。これは、この報告を書いている時点で配線が終了したという段階である。

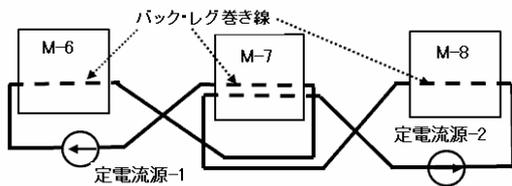


図 6 : 三個の電磁石を使った補正。

こうして、補正蹴り角を電磁石の中心の蹴り角に換算して、それぞれ、 -1.6mrad 、 $(+1.6\text{mrad}+3\text{mrad})$ 、 -3mrad とすれば、閉軌道歪は、補正前の 1/5 以下にすることが出来るのである(図 7 の菱形印)。図 2 と同様、丸印は測定値で、四角は 3 つの Kick(中央の実線で示した)によって生じた軌道歪を示す。

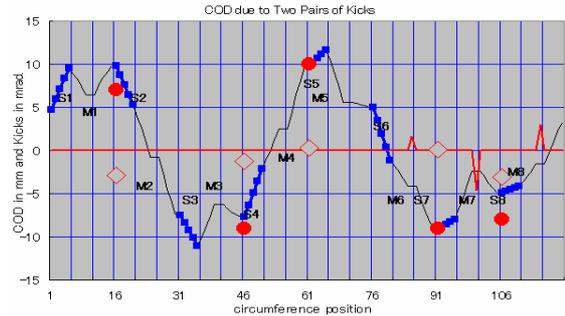


図 7 : 図 6 の結線による COD の計算。

この方法は、我々にとってもうひとつ現実的なメリットがある。それは巻き数を 2 ターンにすることで、電流が 2 倍必要になるので、DCCT に重畳しているノイズの影響を半減する効果もあるのである。

二つの補正電源間の相互干渉は互いに他のバック・レグ巻き線への起電力として現れる。この電圧は、補正電流の主な周波数成分が 20Hz であり、電源の最大出力電圧よりはるかに小さくなる。従って、この誘起電圧が、電源の定電流動作を阻害するようなことにはならない。

5 結論

本プロジェクトの実動部隊は、Transverse の物理には素人ばかりである。専門家なら、COD から Error field を直接計算し、もっと合理的に補正ペアを探し出したであろう。そして、彼等なら、大型の加速器への本方式の応用もたやすいことであろう。

KEK-PS Booster での、加速終了期間の補正はこれからの課題であるが、最初に書いた目的は達成できると考えている。

ここで述べた方法は、速い繰り返しの電磁石を使った小型加速器にも応用可能であろう。こういう加速器は、小型故に、ステアリング電磁石を設置する場所にも困っているだろうから、本方式は軌道補正の貴重な手段となる。

このように、今まで不可能であったような軌道補正が可能となるばかりではなく、例えば、Beam 入射のときだけ補正しようという様な場合なら、定電流源として、市販の直流電源を定電流モードで使用すればよいので、大幅なコスト・ダウンも可能となる方式である。何よりも、電磁石群の持つ誤差磁場はそれら自身で補正しようというのは、自然な考えであろう。

最後に DCCT に重畳しているノイズの除去に関して、ノイズ対策が効果をあげないなら、通常のシャント抵抗に変えることも考えている。

参考文献

[1] 酒井 泉、private communication.
 [2] 二宮重史、他、KEK-PS Internal Report ASN-467
 January 17, 2003.