

加速器電磁石電源

— サイリスタからIGBTへ —



佐藤 健次*

Magnet Power Supplies for Accelerators
— From Thyristor to IGBT —

Key Words : Common mode, Normal mode, Noise reduction, Thyristor, Comal mode, IGBT

1. はじめに

本論の前に、寄り道から始めさせて頂く。現在、サイクロトロン加速器の非線形加速理論の構築に凝っている。この研究の切っ掛けは、一昨年出版された本誌の研究ノートにて、「サイクロトロンによる超高精度ビームの加速」と題して、斉藤高嶺さんが執筆されたところ^[1]と関係する。サイクロトロン本体の電磁石の鉄芯の温度を一週間程度の長時間0.01℃以下に抑えることで、磁場変化をその間1ppm程度に抑えることが出来、その結果、世界的にも例を見ない超高精度ビームが得られるようになった。電磁石の励磁コイルに電流を流すと励磁コイルが発熱し、その熱で鉄芯が暖められて鉄芯の温度が上昇し、磁極の熱変形や鉄芯の磁性の変化で、磁場が変化する。こうした変化は、当然と言えば余りにも当然であるが、サイクロトロンが発明されて以来70年余を経たにもかかわらず、鉄芯の温度変化を抑えることに重きを置かず、励磁コイルの電流を調整することで磁場変化を相殺出来ると考えて来た節がある。このような事態を招いた原因に思いを巡らすうちに、従来の加速理論では、多少の磁場変化があっても良いとして来たからではないかと思い始め、厳しい要求が課せられる非線形加速理論の構築に取り組むことになった。

シンクロトロン加速器での三次共鳴と言う非線形運動を利用した遅いビーム取り出しにおいて、周期的摂動として横方向にキックする高周波電場を加えた場合に発生する現象を、実験的に、また、理論的に、博士前期課程の大学院生の皆さんと研究した^[2, 3, 4]。元々のハミルトニアンが非線形運動として与えられているとき、これに周期的摂動を加えた場合に起こる現象から推し量って、サイクロトロンの非線形加速理論を構築しようと言う考えである。

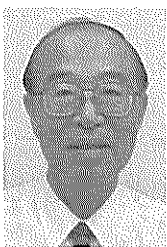
このビーム取り出しのハミルトニアンは

$$H = H_{NL}(J) + \varepsilon V \cos(\nu\phi) \quad (1)$$

と与えられる。 $H_{NL}(J)$ で表される元々の非線形運動は、セパトリックスで分離された安定領域と不安定領域から成り、粒子は通常は前者の安定領域内を運動し、非線形振動を行う。これに、 $\varepsilon V \cos(\nu\phi)$ と言う、周期的摂動が加わると、セパトリックスがストカスティックな層として消滅し、その層の中でカオス運動を行う粒子が、取り出しのセパトリックスを通して、拡散運動により、外部へと取り出される。実験によれば、この層の幅に対応するハミルトニアンの広がり、 ε には比例せず、 $\sqrt{\varepsilon}$ に比例しており、理論でも、その振る舞いが再現出来た。

サイクロトロンの非線形加速理論では、摂動は、例えば、磁場のずれであり、(1)式の周期的摂動とは異なっているものの、粒子の運動の変化として ε に比例する現象は存在せず、いきなりに $\sqrt{\varepsilon}$ に比例する現象が引き起こされる可能性がある。即ち、磁場のずれが正の場合には、 $\sqrt{\Delta B/B}$ に比例する運動の変化が起こり、その変化を避けるためには、磁場の安定度として、1ppmと言うような、非常に厳しいものが要求されると言う仕掛けである。

ところで、サイクロトロンの磁場の変化を、何故、極限まで抑える作業に取り組むことになったのかの



*Kenji SATO
1942年6月生
1970年大阪大学大学院理学研究科博士課程修了
現在、大阪大学・核物理研究センター
加速器研究部門、教授、理学博士、
加速器物理学
TEL 06-6879-8930
FAX 06-6879-8899
E-mail : sato@rcnp.osaka-u.ac.jp

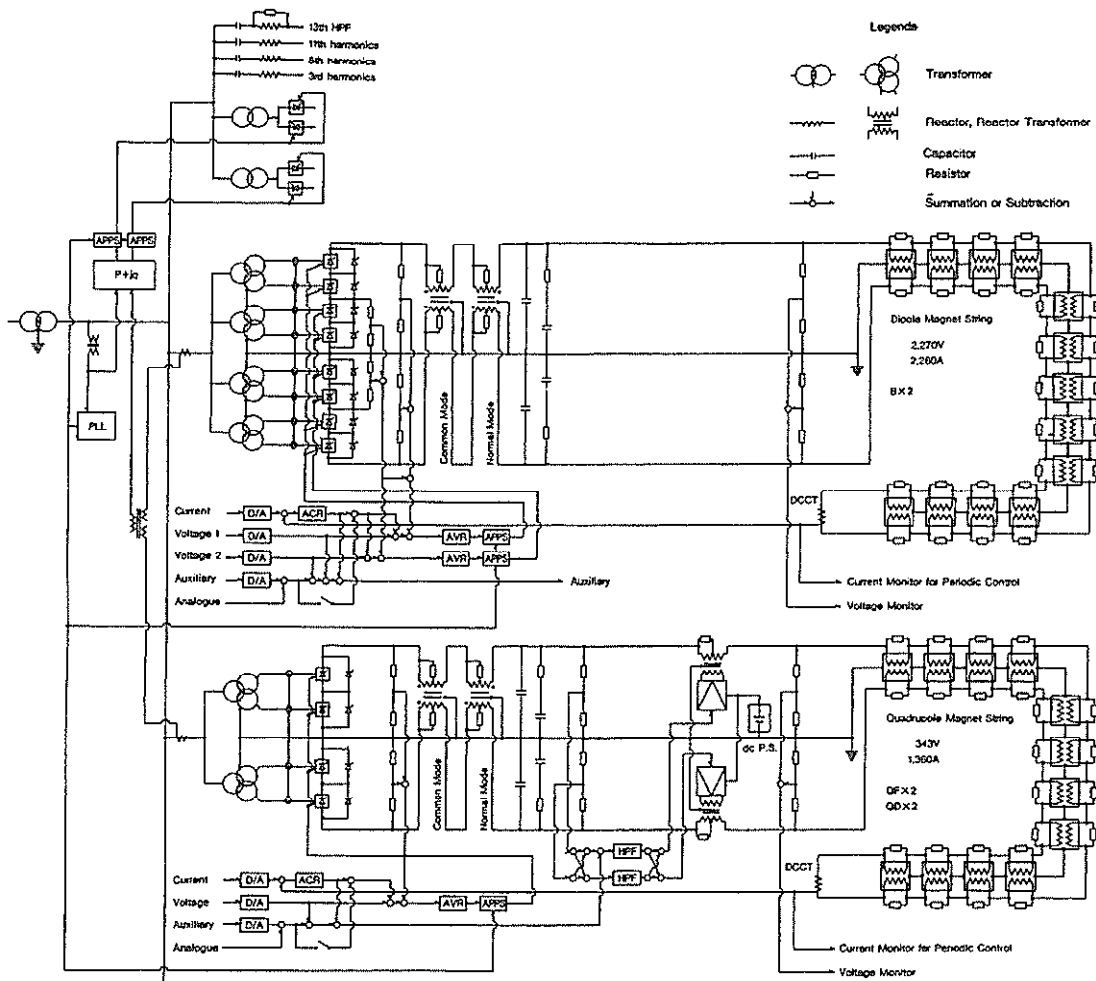


図1 放医研重粒子線がん治療装置HIMACのシンクロロン電磁石用サイリスタ電源。
ただし、交流系統は単線結線図。上半分は偏向電磁石電源。
下半分は四極電磁石電源。また、回路要素の記号を右上部に示す。

重粒子線がん治療装置HIMACのシンクロロンの建設に携わった。この加速器は、当初から、大変順調に運転され、例えば、パルス装置であるにも関わらず、周回ビームを観測しながらのビーム負帰還制御が不要である等、治療装置としての要求に応えることが出来た。筆者が転任した後ではあるが、(1)式の周期的振動を加えて、呼吸に同期したビームを取り出すことが出来るようになり、実用化されている。いずれも、当時、既設で稼働中であったシンクロロンの運転からは、ほとんど、予想していなかった運転である。そのような高性能運転が実現されたのは、筆者が発案した回路構成に基づく、加速器電磁石電源が低雑音で高性能であったことが挙げられる。

そのことは、言い換えれば、磁場が低雑音で高性能であったということであり、「磁場が良ければ全て良し」との思いで、サイクロロンでも、何がどうあ

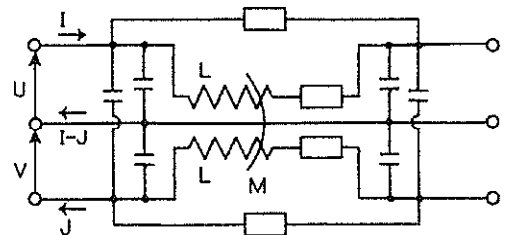


図2 偏向電磁石1台の3端子入力で3端子出力の等価回路図。ただし、回路要素の記号は図1と同じ。

源に辿り着いた。当時の電源では、スイッチング素子にサイリスタを使用した。最近、素子はIGBTにとって代われようとしている。前者ではスイッチング時の雑音の周波数が数kHzで、その雑音を低減出来た訳であるが、後者ではMHzと格段に高く、雑音を低減することが容易ではない。

ところで、最近、粒子線がん治療装置の建設の機運が全国的に高まって来ている。そこで、本稿では、サイリスタ電源での物理と技術を振り返り、IGBTのMHzの雑音を低減し、高性能の電源とするための物理と技術について議論する。

2 加速器電磁石用サイリスタ電源

2.1 放医研HIMACシンクロトロン電磁石電源

放医研の重粒子線がん治療装置HIMACは2台のシンクロトロンで構成されており、その2台に対して、偏向電磁石電源は合計2台で、四極電磁石電源は合計4台である。図1では、それらのそれぞれを代表させて、上半分に偏向電磁石電源(2,270V, 2,260A: 負荷は13台の偏向電磁石の直列接続。)1台を示し、下半分に四極電磁石電源(343V, 1,360A: 負荷は12台の四極電磁石の直列接続。)1台を示している。筆者がこの図を描いた1994年当時、偏向電磁石電源にはアクティブ・フィルターを設けておらず、四極電磁石電源には、リアクトル・トランス方式のアクティブ・フィルターを設けていた。その後、筆者の転任後、前者にもアクティブ・フィルターが設けられ、その結果、台形励磁のパルス運転時のフラット・トップでは、直流的には、両者とも、安定度や再現性は2ppm程度であり、雑音の交流成分は、両者とも、0.3ppm程度である。このように、0.3ppm程度の低雑音に抑えることが出来た点が、高性能と呼ぶ所以であり、世界的にも例を見ない値である。

さて、この電源と電磁石の回路構成の最大の特徴を、直列接続された負荷が偏向電磁石である場合の、その1台を取り出したときの等価回路図として、図2に示している。即ち、上の励磁コイルと下の励磁コイルとを分離し、磁極やリターン・ヨークに線を繋いで、3端子入力で3端子出力の、6端子回路網としていることが特徴である。ここで、ヨークを繋いだ線を中線と呼び、それを1点で接地しているが、この中線には直列接続された電磁石の各々からの電流の合成電流が流れるので、コモン・モードと呼ぶことにする。

このコモン・モード電流は、上の励磁コイルの電流を I とし、下の励磁コイルの電流を J とすると、 $(I-J)$ で与えられる。このような差の世界があれば、 $(I+J)$ と言う和の世界を考えれば良いので、その結果、入力端と出力端との変換は、4行4列の変換行

列で与えられる。

$$\begin{pmatrix} U+V \\ I+J \\ U-V \\ I-J \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U+V \\ I+J \\ U-V \\ I-J \end{pmatrix} \quad (2)$$

一般的に、変換行列の中の逆対角行列である2行2列の2つの変換行列がノンゼロとすれば、それを通して、和の世界と差の世界が混ざり合う。これに対して、図2の上半分の回路と下半分の回路とが上下対称であれば、逆対角行列がゼロになり、部分空間が対角化され、 $(U+V)$ と $(U-V)$ とが独立し分離される。そこで、後者をコモン・モードと呼んだので、前者をノーマル・モードと呼ぶことにする。ところで、負荷を電磁石としたので、中線を流れる電流には直流成分はなく、従って、ノーマル・モード $(I+J)$ は直流成分+交流成分であり、コモン・モード $(I-J)$ は交流成分のみである。

以上のように、回路を上下対称に配置出来たとして、ノーマル・モードのみの精度を高め低雑音にすれば、高性能電源が実現されるかと言うと、それでは不十分である。上の励磁コイルの電流 I と下の励磁コイルの電流 J とは、

$$I = \frac{I+J}{2} + \frac{I-J}{2} \quad (3)$$

$$J = \frac{I+J}{2} - \frac{I-J}{2} \quad (4)$$

のように、ノーマル・モードとコモン・モードの和または差として与えられ、ノーマル・モードと同時に、コモン・モードの精度を高め低雑音にする必要がある。そのためには、電源で発生するノーマル・モードとコモン・モードの両成分に対して、静的フィルターを設ける必要があり、サイリスタ・バンクも上下対称に配置して、その中点を中線に繋ぐ必要がある。また、上下の対称性の破れは二つのモードを混ぜ合わせて複雑な状態を発生させるので、その他の回路要素についても上下を対称にすることが重要であり、これらを反映させて設計したのが、図1である。このとき、コモン・モードの静的フィルターに使用するリアクトル・トランスは小型で良く、低廉であるのが自慢の一つでもある。

ところで、雑音と呼んでいる交流成分は電源の何処から発生するのであろうか。当時の国内の複数の

シンクロトロンサイリスタ電源で実測されたデータを調査し解析すると、主たる交流成分はコモン・モードであり、いずれも、その周波数は数kHzであった。また、その波形を見ると、サイリスタ素子のスイッチング時の転流に付随した減衰振動の周波数であった。なお、コモン・モードの雑音と比較してノーマル・モードの雑音が少ないのは、通常の回路構成で設けられている静的フィルタが、ノーマル・モード・フィルタの役目を果たし、その雑音を減衰させているためであると、筆者は考える。

パワー・エレクトロニクスの参考書や教科書を見ると、スイッチング素子の側路には、コンデンサと抵抗を直列に繋いだスナバー回路を並列に設けている。スイッチング素子に繋がる配線には自己インダクタンスがあり、スイッチング時の急峻な変化により、スイッチング素子の両端に高い電圧が発生するが、それにより、スイッチング素子が破損されるのを、スナバー回路は防いでいる。参考書や教科書では、ここまで書かれているのだが、その後、コンデンサと抵抗だけ取り扱った回路解析が示されており、自己インダクタンスについて触れられていない。これらの3種類の全ての回路要素を取り入れれば、減衰振動しか起こらないはずであり、その減衰振動こそが観測されている波形であり、交流成分の雑音の最大の要因であると、筆者は考える。

2.2 核物理研究センターでの民間等との共同研究による電源の研究

核物理研究センターでは、民間等との共同研究として、図3に示す、サイリスタ電源(210V, 3,000A: 負荷はKEKで解体されたTRISTAN加速器から譲り受けた偏向電磁石4台の直列接続。)を製作し運転を行い、その動作の研究を行った。その研究に際して、コモン・モードの正否や真偽を確認するため、中線の切り離しが出来るスイッチを設け、コモン・モード・フィルタの生殺が出来るスイッチを設けた。博士前期課程の大学院生の研究^[5]によれば、コモン・モード・フィルタを生かし、サイリスタ・バンクの midpoint を中線で繋ぎ、一点接地を行ったとき、最高の性能が得られた。アクティブ・フィルタが設けられていないにもかかわらず、直流的にも交流的にも、2ppm程度の低雑音で高性能であった。

スイッチでコモン・モード・フィルタを殺し、サイリスタ・バンクの midpoint を中線に繋いでの運転では、電源の何処かからにおいが出始めたので、試験を中断した。このことは、コモン・モード・フィルタがない場合、サイリスタ・バンクの midpoint を接地すると、回路の何処かが焼損するので、その midpoint を接地出来ないことを意味している。また、 midpoint を接地しないときには、 midpoint は、恐らく、スイッチング素子の切り替え、即ち、転流に同期して、電圧が正負に変化しており、アクティブになっているものと

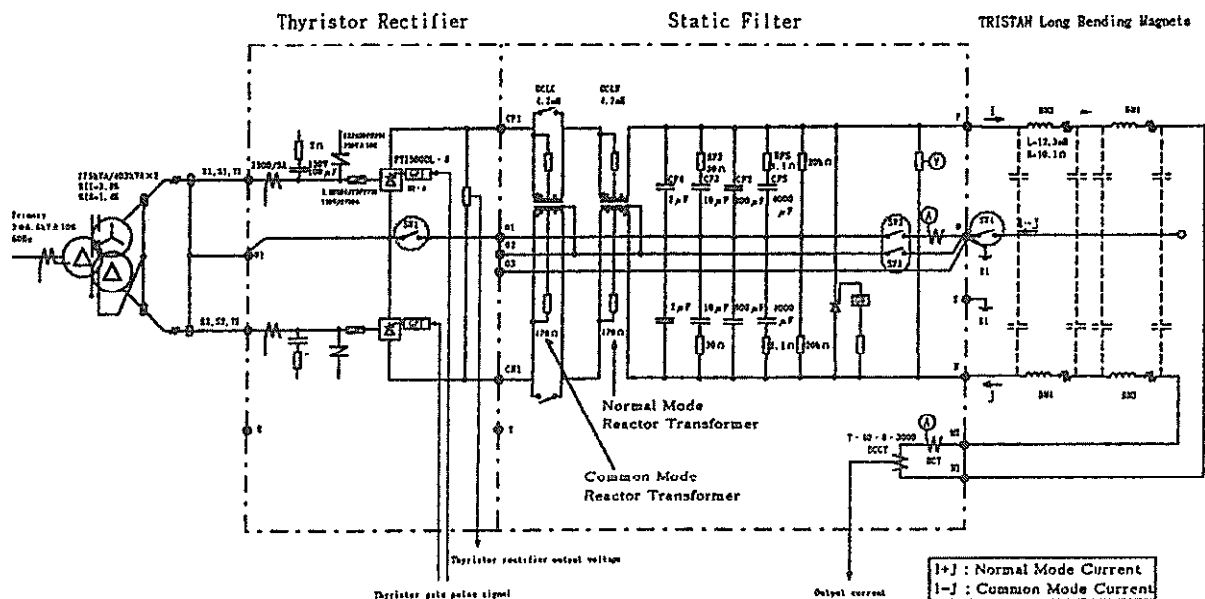


図3 核物理研究センターでの民間等との共同研究による電磁石用サイリスタ電源。

考えられる。電源の midpoint が正負に変化する現象こそ、コモン・モードの雑音の発生源であると、筆者は考える。

以上の結果から、一点で接地した中線とサイリスタ・バンクの midpoint との接続と、コモン・モード・フィルターとをセットにすることが、低雑音で高性能の電源を実現するためには不可欠であることが示された。

3. Comal ModeとIGBT

最近のスイッチング素子の進展に伴い、サイリスタに代わって、IGBTの時代となって来た。サイリスタは制御信号で点弧出来るものの自己消弧であるのに対して、IGBTは制御信号で点弧も消弧も出来る。従って、サイリスタでは商用周波数で点弧と消弧が繰り返されるのに対して、IGBTでは、商用周波数とは無関係に10kHz程度の周波数で点弧と消弧が繰り返され、点弧と消弧の繰り返し周波数が200倍程度異なる。

自己消弧であるサイリスタでは、交流一次系統から見て、電圧に対する電流の位相が同相ではない。そのため、無効電力が発生し、それを補償するため、図1に示すように、大型の無効電力補償装置が必要とされる。この点、制御信号で点弧と消弧とが制御出来るIGBTでは、交流一次系統から見て、電圧に対する電流の位相を同相に出来るので、無効電力補償装置は不要であり、その点、非常に有利である。

サイリスタとIGBTでは、点弧と消弧の周波数が200倍程度異なるので、点弧と消弧のためのスイッチングに付随して発生する減衰振動の周波数も200倍程度異なると考えて良さそうである。即ち、サイリスタでは数kHzであった減衰振動、従って、雑音の周波数が、IGBTではMHzになる。このように、IGBTの雑音の周波数は高いので、単に伝導雑音にとどまらず、輻射雑音も考える必要があり、また、電源内部に設ける、ノーマル・モード・フィルターにしる、コモン・モード・フィルターにしる、単純な集中定数回路では、減衰が難しそうである。

しかし、今のところ、それにも増して、加速器電磁石用のIGBT電源では、3端子入力3端子出力の回路構成が見当たらず、2端子入力2端子出力のようであり、コモン・モード・ノイズを抑制する手立てが施されていないのが問題と思える。(2)式のよう、差の電流($I-I$)をあらわに書いてしまうと、

それが存在しない世界を考えることは難しい。

2端子入力2端子出力の回路構成では、差の電流は、恐らく、床とか大地を流れるであろう。そのとき、直列接続された電磁石の順序で流れる訳ではなく、床とか大地で、インピーダンスの低い経路を、電流自身が探し出して流れるであろう。そうなると、対称性の破れが発生し、和の世界と差の世界との混ざり合いが避けられない。コモン・モードでもなくノーマル・モードでもないので、comal modeと呼びたくなる。このようなコマル・モードで迷走する電流に対しては、コモン・モードの拠り所とする中線すら不明なので、コモン・モード・フィルターを設けることが困難である。

この点、電源の負荷である電磁石の等価回路そのものは、上下が対称で、3端子入力3端子出力の回路構成に出来るので、電源でコモン・モードの配置さえ取り入れると、床とか大地とは無縁の、孤立系にすることが出来、IGBTと言えども、低雑音を実現出来る可能性がある。

4. おわりに

放医研HIMACの完成以降、図1あるいは図3に基づいて、サイリスタ電源を用いたがん治療用あるいは多用途シンクロトロンが3台と電子シンクロトロンが1台建設された。そのうちの2台は図1の放医研のHIMACの成果を反映させており、また、残りの2台は、図3の核物理研究センターの民間等との共同研究の成果を反映させており、いずれも低雑音で高い精度で順調に運転が開始されている。また、いずれの場合も、電磁石の励磁コイルは上下に切り離され、3端子入力3端子出力の回路として配線されている。

また、IGBT電源を用いたサイクロトロンが1台とがん治療用シンクロトロンが1台、建設された。いずれの電源も、スイッチング素子のバンクには接地出来るような midpoint が無いようであり、その midpoint に繋がる中線もなく、図1と図3に言うコモン・モード・フィルターが設けられていない。ただし、電源の2端子出力の上下には、コモン・モード・フィルターの配置をなぞらえたような、上下が対称で midpoint を接地した回路を設けている。

しかし、それでは不十分で、comal modeの状態にあると、筆者は推測している。繰り返しになるが、

(2)式からして、差の世界($I-f$)が存在することは疑いようのない物理であり、電磁石の等価回路は、上下が対称で、3端子入力で3端子出力の回路構成に出来るので、IGBT電源でもコモン・モードの配置をとりたいものである。

参考文献

- [1] 齊藤高嶺 サイクロトロンによる超高精度ビームの加速「生産と技術」Vol.55 No.4(2003)49-52
- [2] 大木俊征 修士学位論文 高周波四極電場を用いた遅いビーム取り出し 阪大 1999
- [3] 日高聡 修士学位論文 高周波四極電場を用いた遅いビーム取り出し過程のカオス論にもとづいた研究 阪大 2000
- [4] K. Sato, S. Hidaka, S. Ninomiya, T. Oki and H. Tamura, Controllable Chaotic Motion of Third - Integer Resonant Extraction Cooperated with RF Electric Fields, Proc. of the 7th European Particle Accelerator Conf., EPAC2000, 1555-1557.
- [5] 田浦裕樹 修士学位論文 シンクロトロン用高性能電源の研究 阪大 1999

