

KEK 入射器棟の FC 電源におけるノイズ低減について

NOISE REDUCTION OF FC MODULATOR IN KEK LINAC

夏井 拓也[#], 松本 修二, 設楽 哲夫, 明本 光生, 中島 啓光, 川村 真人, 榎本 嘉範
Takuya Natsui[#], Shuji Matsumoto, Tetsuo Shidara, Mitsuo Akemoto, Hiromitsui Nakajima, Masato Kawamura,
Yoshinori Enomoto
KEK

Abstract

In KEK injector Linac, positron beam has been generated and injected to SuperKEKB main ring. We use 10 nC an electron as the primary beam. The primary beam hits a tungsten target and generates a converted positron beam. It was needed that strong solenoid magnetic field to focus the positron beam. We use a Flux Concentrator (FC) to obtain the strong focusing magnetic field. Since FC is a pulse magnet and needs a pulse high current, the FC modulator generates a big noise, and it makes some trouble sometimes. We understood the meaning of the noise as an electrical circuit and improved those problems of the circuit. I report matters of noise and countermeasures.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器棟では、SuperKEKB の Main Ring に電子と陽電子ビームを供給している。High Energy Ring には 7 GeV の電子ビームを、Low Energy Ring には 4 GeV の陽電子ビームを注入している。電子ビームは光陰極 RF gun で 4 nC のビームを生成する。一方、陽電子ビームは、まず熱電子銃で 10 nC の電子ビームを生成し、それを陽電子のプライマリービームとしている。プライマリー電子ビームは 3.3 GeV まで加速させタングステンターゲットに当てることで陽電子に変換している。その陽電子を集束させるためには非常に強い磁場が必要となる。この磁場を作っているのが Flux Concentrator (FC) である。FC はパルス大電流をソレノイドコイル状の導体に流すことで磁場を集中させる原理のため、12 kA、10 μ sec 程度のパルス電流が必要となる[1]。

このパルス大電流を作るための FC モジュレータからは大きなノイズが発生されることが観測されており、度々問題となってきた。また、モジュレータが作る電流波形は基本的にはハーフサイン形状だが、そこに早い周波数成分が乗っており、これが、インダクタンスである FC 本体で大きな電圧を作ってしまう、真空中での放電をおこし FC 本体を破損するという事例もあった[2]。このようにモジュレータからの電流波形の高周波成分は FC 本体にも、周りの制御機器にも悪影響をおよぼしていた。

FC 本体の改善の成果で、電圧による放電は収まっていたものの、ノイズとしての悪影響は残ったままであった。そこで、入射器の安定な運転のために本格的に FC モジュレータのノイズ問題に取り組むことになった。これまでも KEK では大電力パルス機器からのノイズは度々問題になっていた。しかし、対症的アプローチが主で、ノイズというものの物理的な意味を完全には理解しきれていないのが現状であった。今回の事例では、できるだけ電気回路的にノイズの本質を理解しようとして、回路シミュレーションも行い、それに沿って対策を講じた。その結果、狙い通りのノイズ低減、波形改善が実現できたので、今後の同様な大電力パルス機器の改善などに少しでも役立ててもらえるよう、ここに記したいと思う。

2. FC モジュレータ回路と高周波成分

FC モジュレータの原理はコンデンサに高電圧を充電して、スイッチング素子としてサイラトロンを使用し、接続された FC 本体(インダクタンス)にパルス大電流を流すのである。Figure 1 に示す通り電気回路としては非常に単純であり、発生する電流波形は基本的にはハーフサインとなる。

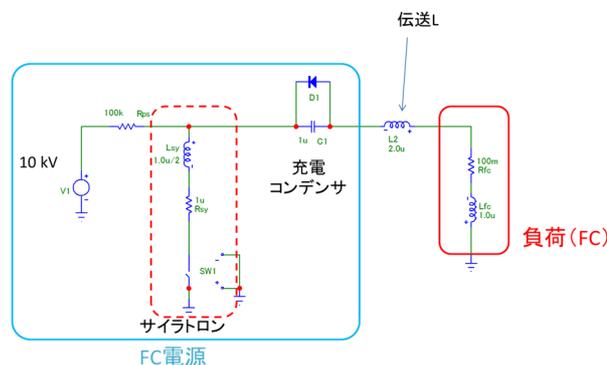


Figure 1: Electric circuit of FC modulator.

KEK Linac は地下トンネルにビームラインが配置され、地上がクライストロンギャラリーになっており、FC モジュレータも地上に配置されて、伝送線として 30 m の同軸ケーブル 10 本を並列に使う FC に電流を供給している。

しかし、実際に FC 本体に印加される電圧は、Fig. 2 に示すようにスパイクノイズ的な高い周波数成分を持っていた。これは、本来想定されていた電圧の 2 倍程度の最大電圧となっており、初期の FC ではこれが原因で放電し、FC にダメージが入ってしまった事もあった。スパイク電圧を減らすためにスナバ回路も導入されていたが、大きな効果は得られていなかった。また、このスパイク電圧は 1.5 MHz 程度の高い周波数成分なので、ノイズとして FC モジュレータの通信機器や付近の機器に悪影響を及ぼしていた。このような高い周波数の電圧振動は FC 本

体へ与えるダメージの懸念と、周辺へのノイズという 2 つの意味で改善が求められていた。

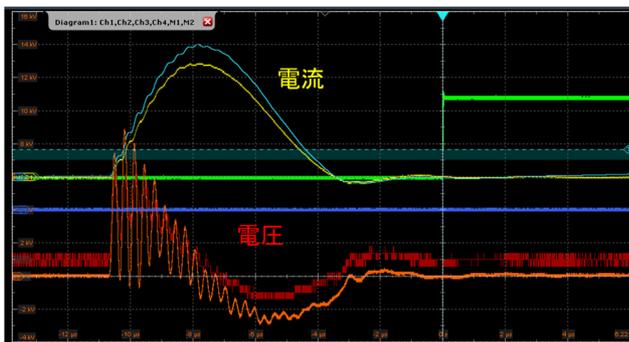


Figure 2: Waveform of the FC.

3. ノイズ電圧の原因について

本来の単純な回路では発生しないはずの 1.5 MHz の電圧ノイズがどこで発生しているか調べるため、回路シミュレーションを行った。その結果、モジュレータから FC を繋いでいる同軸ケーブルが原因であることがわかった。

伝送線路は 10 本の同軸ケーブル(30 m)を並列に使っており、リターンに外導体を使用している。そのため、この間に並列にコンデンサが入っていることと等価になってしまい、FC 本体のインダクタンスと共振を起こしていることがわかった。実際の伝送線路の容量と FC のインダクタンスで共振周波数と計算すると、現実の 1.5 MHz とほぼ同じになった。

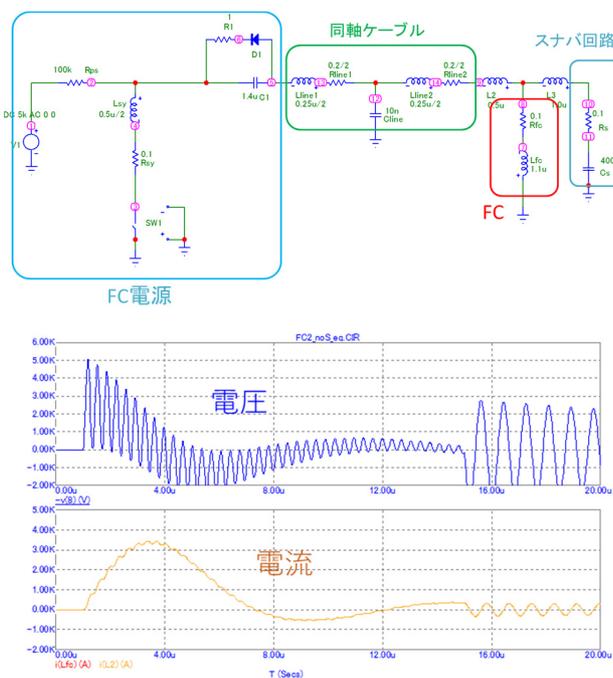


Figure 3: Simulation circuit and result.

シミュレーションに使用した回路とその結果を Fig. 3 に示す。このように、実際の測定結果と同じ波形になること

がわかった。本来ならばスナバ回路がこの電圧振動を抑制するはずだったが、スナバ回路につながるケーブルの持つ僅かなインダクタンス成分のせいで、これが機能しないということもわかった。

さらに、周辺へどのようにこの高周波成分が伝わってしまうのかもシミュレーションを行った。周囲のアースラインには 1.5 MHz の電圧成分が見えてしまっており、これがノイズとして影響していた。よって、何らかの形でアースラインを伝ってリターン電流が流れているのだと考えられる。FC 本体は真空チャンバーの中で完全に絶縁されているが、実際には周辺とわずかながら容量結合していると考えられる。

そこで、適当な容量でアースラインと結合している回路モデルを Fig. 4 のように考えた。やはり FC 本体にかかっている電圧の高周波成分が容量結合でアースラインに抜けていくことが再現された。このリーク電流があらゆる経路を伝って FC モジュレータのコンデンサに帰ってくる過程で周りの機器にノイズとして影響を与えていたと考えられる。

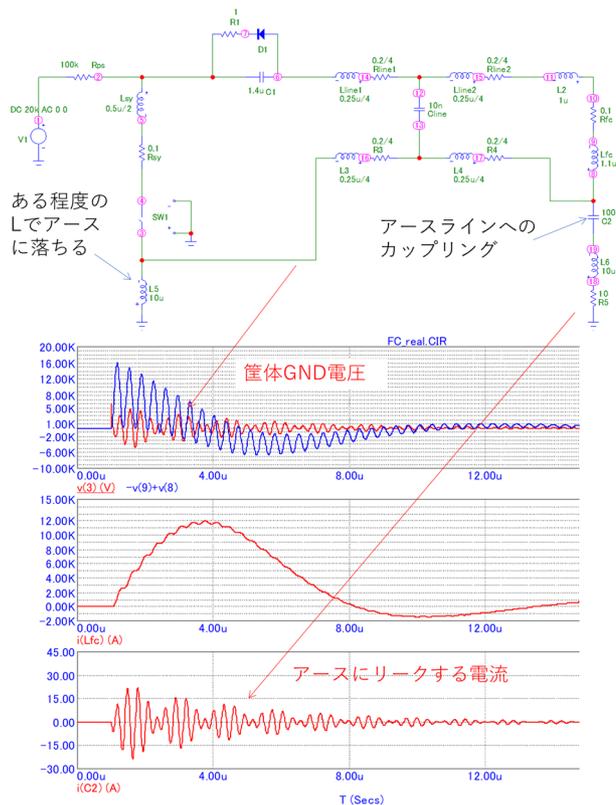


Figure 4: Realistic simulation circuit.

また、トンネル内のアースにリーク電流が流れている直接的な証拠として、伝送線路の同軸線の周りに 1.5 MHz の磁場が発生していることも観測された。これはループコイルによる磁場を測定する手法で、オーダーとしては回路シミュレーションと同じ電流量であることがわかっている。

このように、FC で発生していたノイズ問題は、伝送線路の容量と FC 本体の共振現象による 1.5 MHz 周期の大電圧が、避けられないアースへの容量結合から周囲

に高周波電流としてリークしていたことが原因と結論付けられる。

4. 対策と効果

回路シミュレーションでノイズとして観測されていた高周波成分と、それが周りに漏れ出してしまふ現象が理解できたので、それら低減させる対策を回路シミュレーションも用いて施していった。

まず、リーク電流があり、それが電源ラインのアースから筐体に流れ込むことが分かったので、筐体アースを A 種アース一つに限定し、D 種アースである電源ラインのアースとはノイズカットトランスを使うことで分離する対策をした。安全のためには A 種アースが重要であるので、電源ラインからの不要なループを断ち切る意味で、絶縁トランスは有用である。

また、モジュレータ本体の回路にも手を加えた。回路内で 1.5 MHz の共振電圧を抑える回路を加えた。その回路を Fig. 5 に示す。まず、サイトロンに直列に 1 μ H のインダクタンスを追加した。これは立ち上がり電圧を抑える役割がある。

さらに伝送線路の直前に RC 回路を並列に挿入した。この回路が最も共振電圧を抑える効果がある。立ち上がり時のみこの回路に電流が流れ込むことで、立ち上がりの電圧を抑えている。

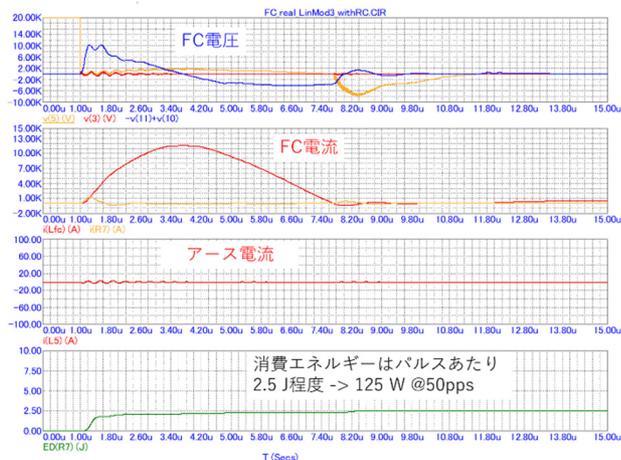
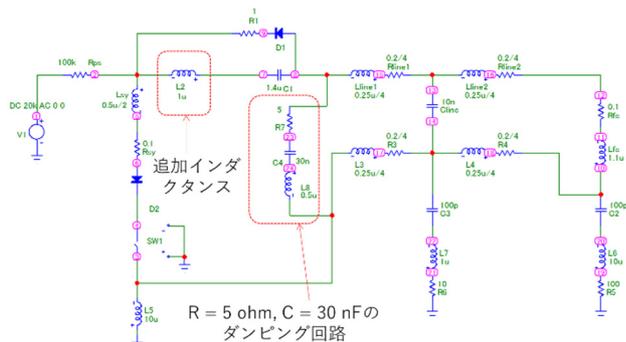


Figure 5: Improved circuit.

サイトロンと直列に挿入したインダクタンスは小さなもので、モジュレータ内に容易に追加できたが、RC 回路はかなり大きなもので、モジュレータ筐体内には収まらなかった。そこで、モジュレータの天井部分に追加の筐体

を取り付けた。同軸ケーブルへの接続部分も大幅に改良することで、RC 回路を並列に接続することができた。Figure 6 に追加されたインダクタンスの写真を示す。また、Fig. 7 に RC 回路と Fig. 8 にモジュレータと追加された RC 回路筐体の写真を示す。



Figure 6: Additional inductance.



Figure 7: RC circuit.



Figure 8: Modulator and RC circuit housing.

このような追加の対策により FC にかかるスパイク電圧は低減され、周りに及ぼすノイズの影響も小さくなった。ノイズの定量的な評価は難しいが、一例として、バッテリー式(電氣的に完全に浮かせた状態)のオシロスコープでモジュレータ筐体をあたたかしたときの波形を Fig. 9 に示す。このように、対策前は非常に大きな 1.5 MHz の電圧が見えていたものが、ほとんどなくなっていることがわ

かる。

この対策は 2021 年の夏のメンテナンス期間中に行われ、それから現在に至る1年間の間、全く問題なく FC の運転が行われている。

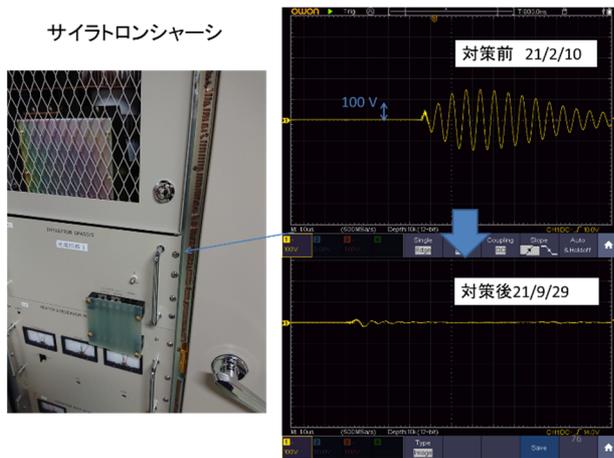


Figure 9: Improved circuit.

5. まとめ

KEK の入射器棟 FC 電源のノイズ問題について、定量的な解析に基づいた解決方法を紹介した。

FC 電源はパルス大電流発生装置であるが、想定外の高周波成分(1.5 MHz)が発生していた。この原因は、電流の伝送に使っていた同軸ケーブルの容量と負荷である FC のインダクタンスが共振を起こしていたのが原因であった。さらに、その高周波成分がアースラインを介して他の機器に流れ込み、ノイズとして問題を起こしていた。FC で発生する 1.5 MHz の共振電圧は、非常に大きな電圧であるため、アースラインとのわずかな容量結合でも大きな共通モード電流が流れ、ノイズとして周辺機器へ影響していた。

当初これらの問題の解析が進まなかった原因は、回路図上に書かれていない回路要素が存在しているということだった。回路図は理想的なものであり、実際に入ってしまう回路定数を追加した、より現実的な回路図を使って解析を進めなければ問題の本質が見えてこない。ノイズ問題というのは、ノイズの原因が曖昧なまま対症的にやり過ごすことが多いように思う。しかしながら、正しく回路モデルを作ればノイズという曖昧な表現ではなく、具体的な物理量として問題を扱うことができる。

今回の事例と解決方法が様々なノイズ問題解決の参考になれば幸いである。

参考文献

- [1] Kamitani, Takuya *et al.*, "SuperKEKB positron source construction status", *5th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'14), Dresden, Germany, June 15-20, 2014*. JACOW Publishing, Geneva, Switzerland, 2014.
- [2] Enomoto, Y. *et al.*, "A New Flux Concentrator Made of Cu Alloy for the SuperKEKB Positron Source", *Proc. IPAC'21* (2021) 2954-2956.