

商用電源変動とビーム不安定性

早川 建^{1,A)}、田中俊成^{A)}、早川恭史^{A)}、佐藤 勇^{A)}、横山和枝^{A)}、中尾圭佐^{B)}、境 武志^{B)}、

金井 泉^{C)}、本郷礼二^{C)}

^{A)} 日本大学量子科学研究所

〒274-6501 船橋市習志野台 7-24-1

^{B)} 日本大学理工学部

〒274-6501 船橋市習志野台 7-24-1

^{C)} 東京電子株式会社

〒327-0103 佐野市石塚町 568-11

概要

前回、同じタイトルで報告した^[1]時には原因不明であったクライストロンパルス電圧と電源変動の相関が明らかになった。問題は PFN の充放電に伴う大きな負荷変動にあった。高圧直流電源は、この変動を補償するように動作するが、その変動幅が補償範囲を超えていたのである。この状態になると、DC 電源は単なる整流平滑回路になってしまうので、商用電源の変動が PFN の充電電圧の変動として現れていた。

1. はじめに

当施設の所在地（船橋市習志野台）に於ける、商電源電圧の変動の状況は前回の報告時に比べて好転はしておらず、むしろ悪化していると言ってよい。すなわち周期が数秒の速い変動（ $\sim 1.5\%$ p-p）は平日は夜間午後 9 時から、翌日の午前 9 時まで続き、週末は終日現れている。平日の昼間はこの変動の振幅が比較的小さい（ $\sim 0.5\%$ p-p）のだが、夜間と同じ程度の変動を示す日もある。長い周期の変動は昼夜を問わず存在する。これらの様子を図 1 に示す。この日は平日にもかかわらず、日中も振幅の大きな変動が起きていた。しかし、AVR の出力を見ればわかる

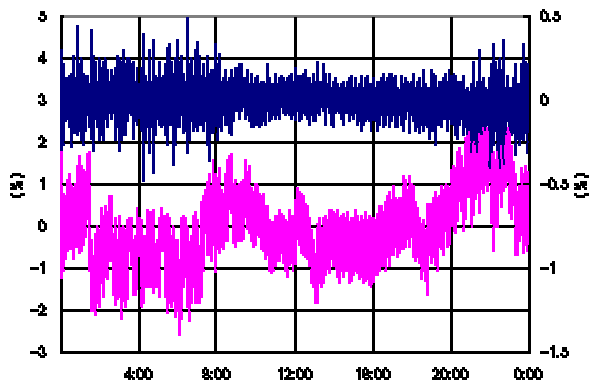


図 1. 平日の電源変動パターン、上が AVR 出力（右側目盛り）、下が商用電源。

ように、夜間の変動とは異なる性質を持っている。商用電源に我々の求める安定度を期待することはできないが、せめて夜の部の変動が何とかならないか東京電力に申し入れしたのだが、解決しなかった。

昼の部の変動でも、そのためにパルス電圧が変動していることには変わりなく、その浸入経路を見つけてこれを遮断しなければ、自由電子レーザーの安定化は果たせない。商用電源が変動すると、パルスモジュレーター内の装置、特にサイラトロンが影響を受け、その結果がパルス電圧の変動として現れる。この問題はサイラトロン周りの電源の前に AVR を挿入することによって解決した。しかしそれでもパルス電圧が電源変動のパターンで変化するので、パルスモジュレーターの給電ラインに大型の AVR を挿入して安定化をはかった。パルストランスのバイアス電源まで含めて AVR の内側に入れたのにもかかわらず、依然としてパルス電圧の変動は止まなかった。図 2. に示すように、電源変動に対応して、全く同じパターンでパルス電圧、RF 出力などが、変動している。

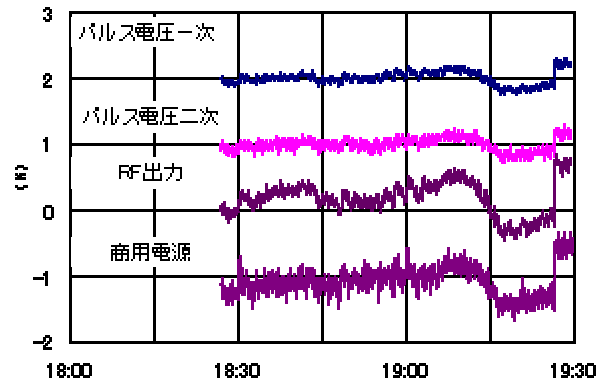


図 2. 電源変動とパルス電圧、クライストロン・マイクロ波出力。上から順に、一次側パルス電圧、二次側パルス電圧、マイクロ波出力（検波器出力）、商用電源電圧。

¹ E-mail: hayakawa@lebra.nihon-u.ac.jp

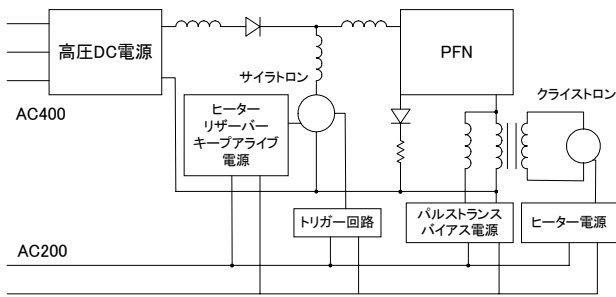


図3 . パルスモジュレーター、直流電源、クライストロンアッセンブリ-概略図

2 . 電源変動の侵入経路

図3にパルスモジュレーターのブロック図を示す。この図から分るように、商用電源から電力を供給されているのは、高圧直流電源、サイラトロン加熱電源、サイラトロンリザーバー加熱電源、トリガー回路、クライストロン加熱電源、パルス変圧機バイアス電源、および図には示さなかったが、クライストロン収束コイル電源である。最後のクライストロン収束コイル電源については、たとえこの電流が変動してもパルス電圧に影響するとは考えられないので、除外した。前記のように、サイラトロン周りの電源が変動すると確かにパルス電圧が変動していた。そこで、商用電源変動の影響を除去するために、電力供給ラインにAVRを挿入した。この結果、パルス電圧変動は劇的に低下した。しかしそれでも商用電源変動のパターンでパルス電圧が変動していた。商用電源の比較的長時間スケールの長い変動はAVRによってほぼ完全に除去できるので、AVRから給電される装置はこのパターンでは変動しないはずである。そこで、大容量のAVRを導入して、サイラトロン周りだけでなく、高圧直流電源を除く全ての電源をAVRから給電するようにした。ところが状況は一向に改善されないのがであった。高圧直流電源は仕様どおり 10^{-4} 程度の安定度を示しており、全く問題ないように見えた。あるいは、測定系の問題なので

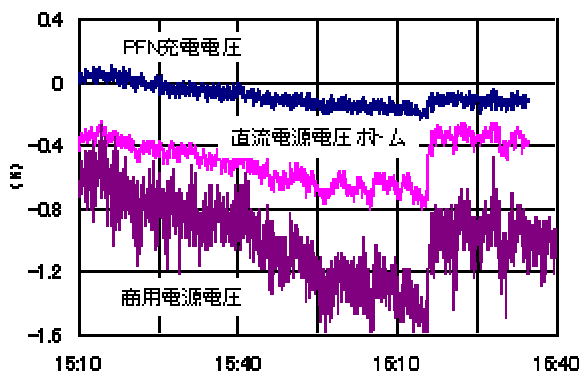


図4 . 充電中の高圧直流電源電圧とPFNに充電された電圧の変動。商用電源と同じパターンで変動している。

はないかと思ひ至り、バッテリー駆動のオシロスコープによる測定も試みたが、結果は同じであった。サイラトロン周りを安定化したにもかかわらず変動していることから明らかであったが、PFNの充電電圧もまた変動していた。ここに至って、電源変動の侵入経路は高圧直流電源以外に考えられなくなった。そこで、充電中の電圧を測定する事にした。チャージングコイルの電源側に高圧プローブが取り付けられているので、これを利用した。充電中の電圧波形は、充電電流波形をひっくり返したような形の落込みを示している。充電電流を多く流す時には、供給側の容量が不足して、電圧が落ち込むのである。この電圧の落ち込んだ底の部分の電圧を長時間に渡って測定した。この測定の結果を図4に同じ時刻の電源変動と共に示す。明らかに、同じパターンで変動している。高圧直流電源が充電中に変動していることが分かってしまえば、その侵入経路を推定することは容易である。すなわち、充電中、高圧直流電源は安定化されていないのである。

3 . 高圧直流電源

高圧直流電源は前記のように、仕様どおり 10^{-4} 程度の安定度を示しており、それで安心しきっていたのだが、元々は定負荷用に作られた電源であるので、パルスモジュレーターのように変動の大きな負荷に接続した時の振る舞いをもっとよく考えておくべきであった。直流電源回路のブロック図を図5に示す。この図では、昇圧トランスと整流回路を電池の記号で表している。破線及び括弧内の数値は改造前の状態である。これから分るように、トランスで昇圧した後整流した3kV程度の電圧を制御用電子管のカソード・アノード間に印加する。その電圧にIVRで昇圧後、整流した約20kV程度の電圧を積み重ねている。定負荷時は、電子管の吸収電圧が1.5kV程度になるようにグリッドのバイアス点を定める。この場合出力は21.5kV程度になる。入力あるいは負荷変動によって、検出点Aの電位が動かないように吸収電圧を調整する。パルス負荷の場合、負荷変動が大きすぎて、電子管による調整範囲を超えてしまったと考えられる。実際、充電中のカソード・アノード間の電圧

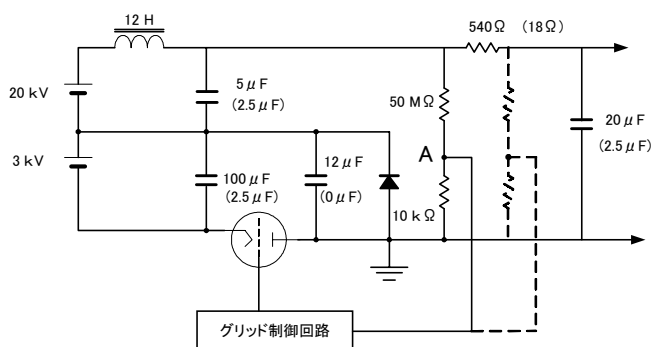


図5 . 高圧直流電源のブロック図 . 破線及び括弧内の数値は改造前の状態。出力抵抗増強と検出点の移動、コンデンサーの容量増加が変更点。

を測定した結果を図6に示す。充電が開始されると、測定点Aの電位の落ち込みを補償するように電子管は吸収電圧を小さくしてゆくが、遂には放出すべき電圧を全て失ってしまう。こうなってしまうと、この電源は入力変動にも負荷変動にも対応できないただの整流回路になってしまう。従ってこの時の商用電源電圧が、そのまま出力に反映するようになってしまうのである。

4. 電源の改造

問題は電源の制御系が、負荷変動に追従しようとして、結局追従しきれず、全く制御を失ってしまうことにある。負荷変動の最大の要因は無論、放電によってPFNの電圧が一気にゼロまで落ち込む現象である。これに、PFNのコンデンサーやインダクターの室温変動による容量変化、サイラトロンの変動等が重畳されるのであるが、これらは電源変動に比べて十分小さいと仮定できる。そうであれば、電源は必ずしも負荷変動を見る必要が無い。電源変動だけを補

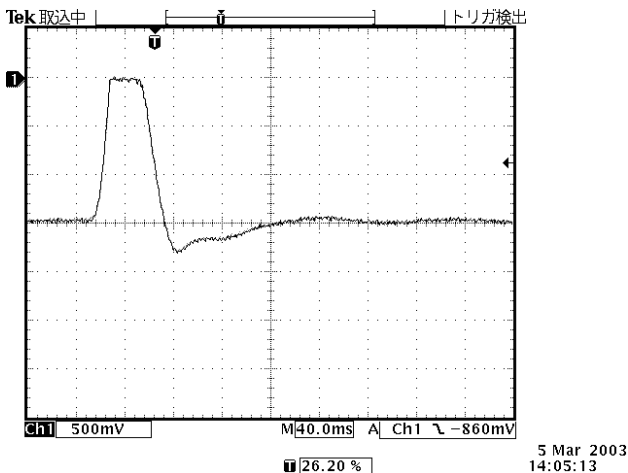


図6. 改造前の電圧制御用電子管の吸収電圧波形、充電中に吸収電圧を全て放出してしまっている。

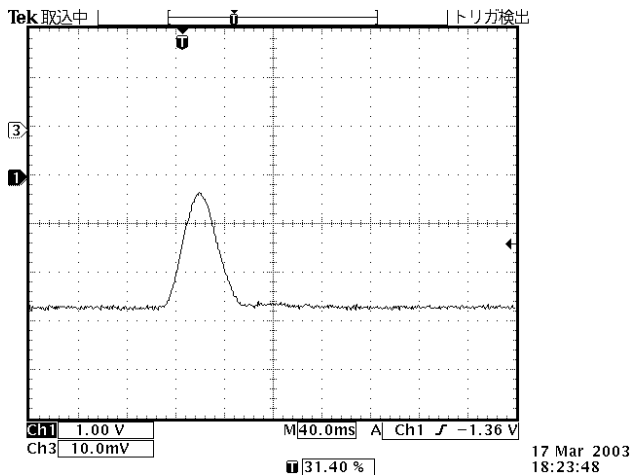


図7. 改造後の電子管の吸収電圧波形。充電中大きくスウィングするが、制御可能範囲を超えていない。

償するように働けば良いのである。負荷変動はむしろ見えないほうが良い。負荷を電源から隠蔽する方法は幾つか考えられたが、ここでは、システムの挙動になるべく影響を与えないように、出力抵抗を大きくする方法を採用した。出力抵抗を18から590に増強し、かつ、電圧の検出点を出力抵抗の電源側に移動した。またこの措置による充電電圧の低下を軽減するため、負荷側のコンデンサーを増強した。検出点を出力抵抗の電源側にしたのは、前述のように負荷を隠蔽するためである。改造の結果、図7に示すように、吸収電圧波形の振幅は小さくなり、充電中も調整範囲に収まるようになった。調整できる範囲は±500Vほどあるので、20kVに対して、±2.5%の商用電源変動を補償することができる。改造後、充電時の電圧を測定した結果を図8に示す。このときは、±1%程度、商用電源が変動していたが、充電電圧はほとんど変化していない。これは直流高圧電源本来の安定度を示しているように見える。

5. ビームへの影響

直流高圧電源の改造によって、商用電源変動の影響が取り除かれるようになった結果、定量的な評価は未だ行っていないが、以前より安定な電子ビームをFELに供給できるようになった。また、夜間の大変動時においても影響なく実験ができるようになった。

6. まとめ

長年の懸案であった商用電源変動のパルス出力への回り込みの現象は、今回の一連の研究によって、充電時における高圧直流電源の挙動にその原因があることが判明し、電源の改造によって、解決を見た。

わかってみれば、もっと早い時期に気がついてしかるべき問題ではあった。

参考文献

[1] 早川建、他、”商用電源変動とビーム不安定性”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan. p285

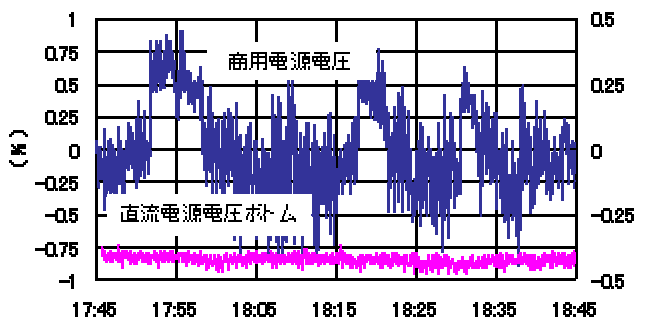


図8. 改造後、充電中の高圧電源電圧変動(右側目盛)と商用電源電圧の変動(左側目盛)。商用電源電圧の変動はほぼ完全に取り除かれ、直流電源本来の安定度を示している。