

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)}、佐藤和男^{A)}、佐藤 勇^{A)}、
横山和枝^{B)}、境 武志^{B)}、菅野浩一^{B)}

^{A)} 日本大学原子力研究所

〒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

概要

今年度初頭からの自由電子レーザーの実験を通して、周期的で顕著な商用電源変動が見出された。原因は現在のところ不明であるが、このために、電子ビームに著しい不安定性が生じている。一連の測定により、この電源変動が原因となって生ずる加速電場の変動が確認された。また原因解明のために行ったさまざまな測定の結果、上記の変動を直接の原因とはしない RF 系の変動が見出された。

1. はじめに

日本大学原子力研究所電子線利用施設 (LEBRA) では、125MeV 電子線形加速器を用い、広帯域・高輝度光源の開発と、その利用実験の準備を行っている^[1]。その一環として、この4月から、集中的に赤外の自由電子レーザーを発振させるべく実験を行ってきたが、運動量幅 1% のアナライザを通過後の電子ビームの不安定性に悩まされている。ここで言うビーム不安定性とは、エネルギー、エネルギー幅、軌道、等の電子ビームの状態が時間的に変動し、その結果、電流が絶えず変動する状況である。電子ビームを変動させる最大の要因は、室温の変化による RF アンプの位相変動であることが分かっている。その対策として、本来、パルス内の位相変動を補償する目的で RF アンプの前段に設置された高速 ϕA を利用して、この変動をキャンセルする装置を製作した。未だ完全ではないが、近日中に解決する見込みである^[2]。次に

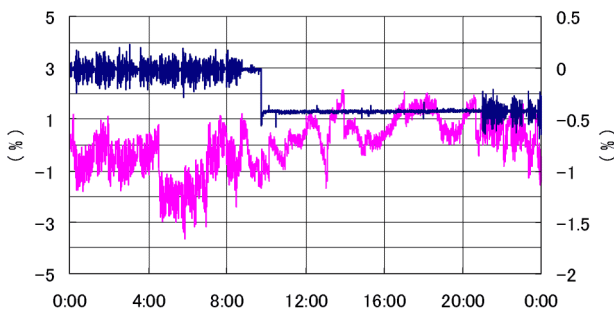


図1：平日の電源変動パターン、上が AVR 出力 (右側目盛り)、下が商用電源。

考えられるのが商用電源の変動である。商用電源が変動すると、サイラトロン周りの電源に影響を与え、その結果がパルス電圧の変動として現れてくる。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されたはずであった^[3]。ところが、最近になって、ビーム不安定性の要因を探るために、商用電源及び AVR 出力の電圧を長時間監視したところ、奇妙な事実が判明した。

2. 電源電圧の監視

商用電源は AC100V のラインから、AVR 出力の電圧は AC200V のラインから、夫々、トランスで降圧し、デジタルマルチメーターを用いて測定した。測定したデータはシリアル及び GP-IB インターフェイスを介してパソコンに取り込んだ。

当初、AVR の電圧は、クライストロンパルスモジュレータの LV を入れた状態で測定していたが、その後、問題となる電圧変動は、負荷の有無にほとんど依存しないことが分かったので、パルスモジュレータの LV は入れず、AVR の出力のみ監視することにした。この結果、無人で監視することが可能になり、継続的な監視体制ができた。

電圧の監視は、4月18日から開始し、4月30日夜からは昼夜連続で行っている。

3. 変動パターン

変動は時間帯により、平日か休日かにより、また

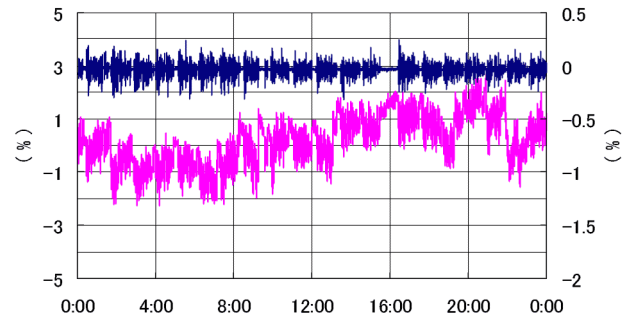


図2：休日の電源変動パターン、上が AVR 出力 (右側目盛り)、下が商用電源。

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

月によっても変わっている。図1に典型的な平日の変動パターンを示す。この図から商用電源は1日に5%程度変動することが分る。ゆっくりした変動と、急激な変動、小刻みな変動が組み合わされている。しかし、顕著なのは午前9時と午後9時を境に変動の仕方が変わることである。午後9時以降は小刻みな変動の振幅が昼間に比べて2倍から3倍に増えている。昼間の商用電源の変動に対して、AVRの出力の変動は、0.05%以下に抑えられているが、夜間の変動に対しては0.5%程度まで増大している（それでもAVRのスペックはほぼ満足している）。なお、午前10時頃に現れているAVRの段差は、パルスモジュレーターのLV投入によるものである。本報告書では、AVRの出力電圧変動が0.05%のときを安定時、0.5%の時を変動時と呼ぶことにする。

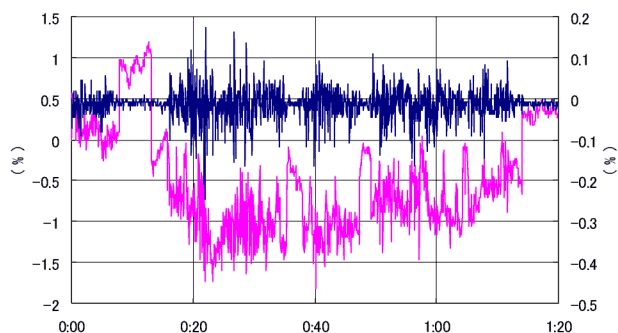
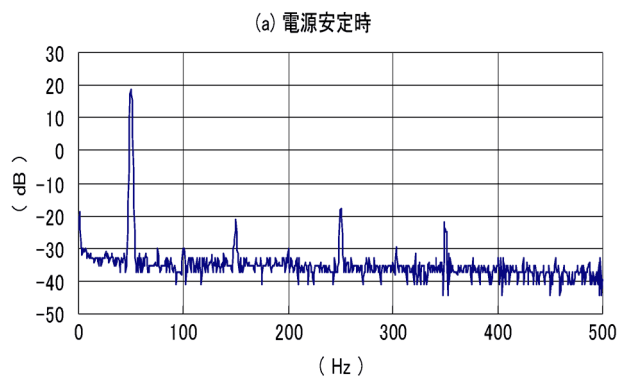


図3：電源変動の基本パターン、周期約1時間。

5月の連休に入って、すこし変化が見られた。図2に示すように、終日、平日の夜間と同じ変動をする日が現れた。5月1日は平日のパターン、2日は終日、3日は平日のパターン、3日の夜から6日の夕方までこの変動が続いた後、6日の夜以降、パタリとこの現象が途絶えた。東京電力の資料によると、4月は電力需要の谷間にあたるので、それと関連する一時的な現象であったと思われる。ところが、5月30日午前0時頃から再びこの現象が現れるようになり、現在に至っている。4月中は土日のデータ無いので何ともいえないが、6月になってからは、平日



は図1のパターン、土日は終日図2のパターンが現れている。6月は祝日が無いので、そのときどうなるかは確認していない。この変動を、もう少し詳しく見ると、図3のような約1時間持続するパターンが繰り返し現れていることが分る。当施設の位置する船橋市は近隣にいくつもの工業団地があり、電源変動の要因には事欠かないが、このはっきりしたパターンは単一のソースを意味していると思われる。それが何であるかは不明である。

4. スペクトル解析

電源変動を除去するために挿入したAVRの仕様を表1に示す、型番SNAC-1Kはサイラトロン社の電源を安定化するために使用していたもの、TAR3002-3はこの事態が発生したため、パルスモジュレーターの低圧部分全体を安定化するために導入したもので、

表1：AVRの概略仕様

	SNAC-1K	TAR3002-3
型	磁気増幅器型	サイリスタ型
定格電圧(V)	200	200
変動幅(%)	±0.5	±0.4
応答速度(Sec)	< 0.3	< 0.08~0.15
$\Delta V = 30V$		

この使用時はSNAC-1Kは外している。結果的には、どちらのAVRを使用しても同じであった。応答速度のカタログ値は0.08~0.15secとあるから、これより早い変動が現れていると思われる。これを確認するためにスペクトル解析を行った。ソニーテクトロニクス社製のオシロスコープTDS3035とそれに付属しているFFTモジュールを用いた。DCから500Hzまでの部分を抜き出したものが、図4(a),(b)である。変動時、2次と4次の高調波は、現れるときと現れないときがあるが、5次の高調波は安定時に比べて常に10dB程度大きくなっている。また、3次の高調波はあまり変わらない。すなわち、この変動は主に5次の高調波歪であると考えられる。

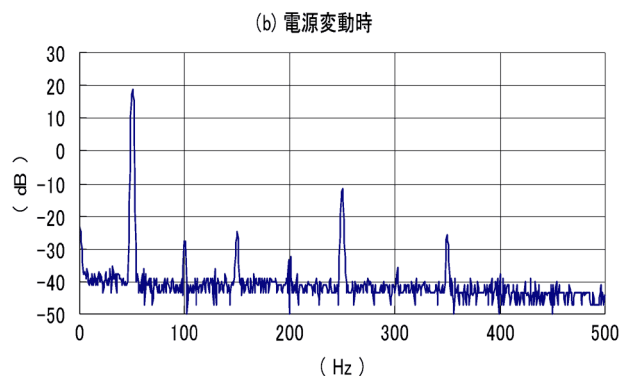


図4：商用電源の安定時のスペクトル(a)、変動時のスペクトル(b)、変動時は5次の高調波の成分が増加する。

5. ビームへの影響

電源変動の影響が電子ビームの変動として現れてくる経路としては、収束系とRF系が考えられる。収束系の直流電源は、無論安定化されており、また、磁極を持つ電磁石は早い変化には追従しないと考えるので、問題となるとすれば、ステアリングコイルである。これは、設計当時考えていたのよりかなり少ない(数分の1)電流値で使われているので、安定度が不足している可能性はある。RF系はシグナルジェネレーターからクライストロンの出力に至るまで、あらゆるステージで電源変動の影響を被る恐れがある。それだけに全て電源は安定化されている。唯一、安定化されていなかったのはパルスモジュレーターであったが、これも前期のように、1998年の段階でAVRを挿入することにより安定化した^[1]。しかし、今回観測された変動はAVRで完全に除去されていないので、パルスモジュレータが元凶である可能性は高いと思われる。

クライストロンに印加するパルス電圧と、クライストロンのRF出力を、同時に測定した。図5にその一例を示す。パルス電圧はパルストランスタンク内のディバイダーの電圧をオシロスコープを使って観測した。クライストロン出力は、クライストロン直後の導波管に設けられたモニター用方向性結合器にクリスタル検波器を取り付け、その電圧を同じオシロスコープにより観測した。例によって午後9時から周期の短い変動が始まっている。パルス電圧の変動は、安定時には0.3%程度だが、変動時には0.5%以上になっている。またクライストロンの出力を見ると、これはクリスタル検波器の出力電圧であるが、安定時でも周期の短い変動がノイズを含めて0.5%程度、明らかに電源変動の影響と分る周期の長い変動が1%程度あることがわかる。加速電圧に換算すると、前者が0.4%、後者が0.8%ほどになる。これが、不安定時には、周期の長い変動は同程度だが、周期に短い変動が倍以上に大きくなっている。ところが、クライストロン2号機では、変動時のほうがいくらか大きくなっているが、大差が無い。クライストロンの印加電圧と出力振幅の関係は効率が変わらなけれ

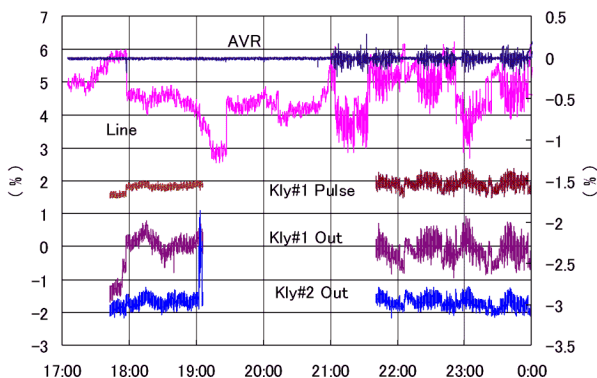


図5：電源変動とパルス電圧、クライストロン出力。上から順に、AVR出力(右目盛り)、商用電源電圧、1号機クライストロンパルス電圧、1号機クライストロン出力、2号機クライストロン出力。

ば5/4乗に比例する。クライストロン1号機のパルス電圧変動に対する加速電圧変動の予想値と実測値を表2に示す。1号機の系統では、パルス電圧変動から予想される加速電圧変動に対して、実際はその2倍の大きさで変動している。これはクライストロンの動作点問題かも知れず、調査が必要である。一方、2号機では、ここにはパルス電圧のデータはのせていないが、ほぼ1号機と同じ動きをし、加速電圧変動はパルス電圧変動から予想される値と矛盾しない。パルスモジュレーターのAC200Vの系統はすべて

表2：クライストロン1号機のパルス電圧変動と、加速電圧との関係。

	安定時	変動時
Pulse 電圧変動 (%)	0.3	0.5
加速電圧変動 予想値 (%)	0.4	0.6
測定値 (%)	0.8	1.5

AVRを通して給電するようにした。従って、パルスモジュレーター内にパルス電圧を変動させる原因があるのならば、その変動のパターンは全て、AVRの変動のパターンに似なければならぬ。ところが観測されているのは、むしろ商用電源変動に似たパターンである。他の要因としては、高圧DC電源が考えられるが、これは、 10^4 台で安定化されているので、原因とは考えにくい。

いずれにしても、加速電圧が1%も変動すれば、当然位相も変動するので、運動量幅が1%に設定されたアナライザーを電子ビームが安定に通過することは難しい。ビーム電流が不安定になるのは当然である。

6. まとめ

平日夜間及び、休日に比較的周波数の高い電圧変動が、商用電源に現れている。この時間帯はエネルギー幅1%のアナライザーを通過するビーム電流はきわめて不安定になる。安定時でも、クライストロンパルス電圧が0.3%程度商用電源の変動に追従して変動する。このパルス電圧変動に起因する考えられる加速電圧の変動が観測された。その変動分は0.4%と見積もられる。しかし1号機ではその倍程度の変動が見られた。電子ビームの安定化はFEL発振維持のためには不可欠であるため、不安定性の原因究明とその解決は今後引き続き行っていかなければならない課題である。

参考文献

- [1] 佐藤 勇、他、“日本大学電子線形加速器の高度化と自由電子レーザーについて” Proceedings of this meeting.
- [2] 横山和枝、他、“クライストロンドライブ系の位相安定化”, Proceedings of this meeting.
- [3] K.Hayakawa, et. al., "TEST OPERATION OF THE PULSE MODULATOR OF THE 125MeV LINAC AT NIHON UNIVERSITY", Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan. p41