

PHASE MEASUREMENTS TO TUNE KEKB 60-KW DRIVER KLYSTRONS

T. Matsumoto, S. Michizono, H. Hanaki, S. Fukuda and S. Anami

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

Abstract

60-kW driver klystrons (sub-booster klystrons) have been developed in order to feed the drive power to eight high-power klystrons per sector for KEKB. In order to tune the sub-booster klystrons, a phase detector (mixer) was utilized. By monitoring the phase of the rf output-power, parasitic oscillations and phase instabilities, which were not clearly found when using only an rf power detector, were observed. We could stably operate the klystrons by tuning the magnetic field of focus coils. It was clarified that measuring the phase of the rf output power was useful for the adjustment of klystrons.

KEKB 用 60kWドライバクライストロン調整のための位相測定

1. はじめに

KEKB 計画[1]において入射器では、50MW クライストロンに SLED を併用して電子ビームを 8.0GeV まで加速する。この際、ビームとrfのタイミングの関係から、上流に位置する1本のドライバクライストロンで8本の大電力クライストロンを励振させる[2]。ドライブライン及びクライストロン入力回路 ($I\Phi A$) の減衰を考慮すると最低 40kW の励振電力が必要であり、60kW ドライバクライストロン(サブブースタクライストロン)[3]を KEK で設計・開発した。これは三菱重工 (MHI) で製造され、昨年より既に運転に利用している。

今回、位相検出器を使ってサブブースタクライストロンの調整を行ったので、その測定および調整結果について報告する。

2. 位相測定

この 60kW サブブースタクライストロンを用いた際、大電力クライストロンの出力が SLED 運転のための位相反転時に不安定になることがあった。これは、その後の測定からサブブースタクライストロンの出力の位相不安定によるものであることがわかった。

いままで、サブブースタクライストロンの調整は、rf出力電力波形のみの安定度を目安に行われていた。しかし、SLED を安定に動作させるためには、出力の位

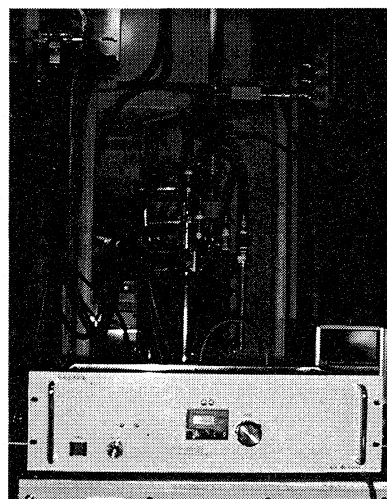


図1: サブブースタクライストロンと位相検出器

相安定性も考慮する必要がある。そのために位相検出器を含んだテストベンチ(図1)を構成し、クライストロンの再試験を行った。

3. サブブースタクライストロンテストベンチ

今までに6台のサブブースタクライストロンの調整と評価を、図2で示すテストベンチを用いて行った。

信号発生器からの 2856MHz の連続波は2分割され

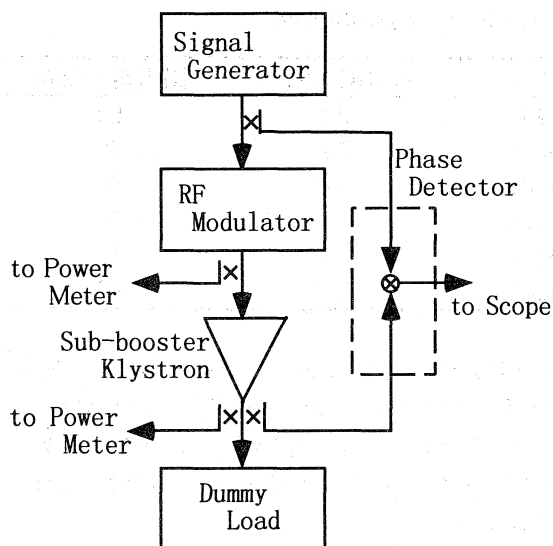


図2:サブブースタクライストロンテストベンチ

て、一方は位相検出器の参照波となる。他方はrf変調器に送られ、クライストロンの入力パルス信号となる。なお、このrf変調器は入力パルス信号の途中で位相反転をした SLED 用の信号[2]も出すことができる。

クライストロンからの出力は、39D 同軸管の無反射終端の前に取り付けられた方向性結合器からの出力をさらに方向性結合器で分割し、一方を出力電力の観測用とし、他方を位相検出器への信号とする。

位相検出器では、参照波からの信号をトロンボーン型同軸移相器にて位相を可変としたものと、出力からの信号をミキサへ入力する。これら2つの波形の位相差に相当した信号がミキサから出力され、これをオシロスコープで観測する。

4. RF 出力の位相測定

図3は、クライストロン(#9601)への入力電力が 20.2

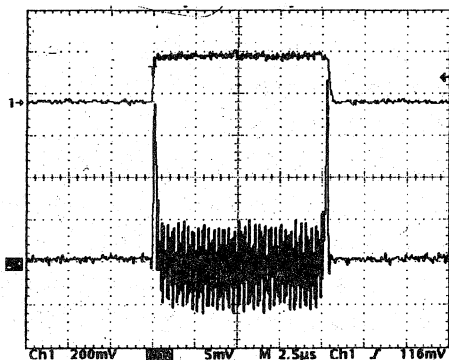


図3:寄生発振をおこしたrf出力

上 : 出力電力波形 (57.1kW)

下 : 位相波形 (7.2deg./div)、横軸 : 2.5 μs /div

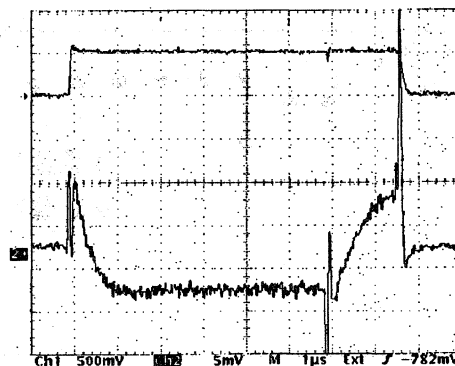


図4:飽和点付近で位相不安定の波形

上 : 出力電力波形 (80.3kW)

下 : 位相波形 (4.9deg./div)、横軸 : 1 μs /div
パルス立ち上がり後7 μs で位相反転

mW、出力電力が 57.1kW の時の出力電力とその位相の波形である。非飽和領域の非常に利得の高いところでのものであり、ノイズと結合して寄生発振を起していると思われる。出力電力からもわずかに波形が乱れているのがわかるが、位相を見ることによりはっきりと発振を確認できる。

次に出力電力飽和点付近での位相不安定の一例を図4に示す。この場合は、クライストロン(#9602)への入力電力が 38.6mW で、出力電力がほぼ飽和に近い 80.3kW の時の波形である。この時の出力飽和点は入力電力が 45mW の時で、出力電力が 82.4kW であった。ここで入力は立ち上がり後、7 μs で位相反転を行っている。この位相が不安定になる現象は、飽和点の近くで入力電力や集束磁場を調整していた時に、ある特定の動作点において、位相波形でのみ見出された。この位相不安定の原因については、現在考察中である。

位相検出器を用いたクライストロンの調整は、出力電力波形からでは検出されない、このような位相不安定に対して有効であることがわかった。

5. 磁場調整後の入出力電力特性

一般にクライストロンの出力及び安定性はクライストロンの集束磁場に大きく依存する。今回の調整は、位相検出器で出力電力、位相を観察しながら、集束電磁石の電流値を変化させ、出力電力、位相ともに最適となるように行った。

図5に位相検出器による調整前後の入出力電力特性をサブブースタクライストロン(#9601)について示す。このグラフで、調整1とあるのは、印加パルス電圧が 26 kV の時に、出力電力が最大になるように磁場を調整したものである。調整2とあるのは、印加パルス電圧が 27 kV で位相検出器を用いて、飽和点において位相が安

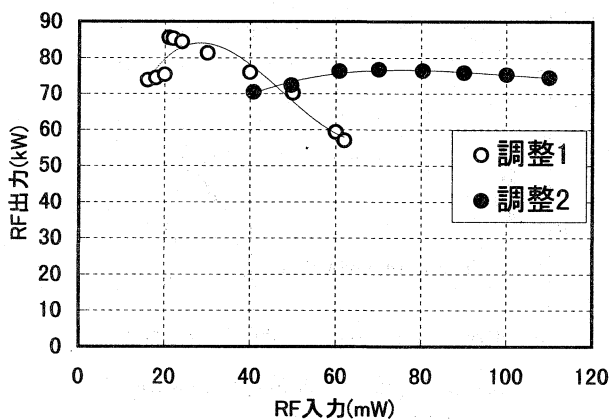


図5:サブスタッククライストロン(#9601)の入出力電力特性

調整1: 位相検出器を用いずに飽和点で出力電力が最大になる磁場調整の時

調整2: 位相検出器を用いて飽和点で位相が安定で出力電力が最大になる磁場調整の時

横軸: 入力電力(mW)、縦軸: 出力電力(kW)

定になるように磁場の調整を行ったものである。

図5より、位相検出器を使用しないで調整した場合、飽和点付近で急激に出力電力が上がっている。これは飽和点近くで発振が起きているか、もしくは図4のような位相不安定があったと考えられる。

位相検出器を用いた調整(調整2)後の飽和点での出力電力と位相の波形を図6に表す。パルス内での位相が非常に安定していることがわかる。

今回、合計6台のサブスタッククライストロンの調整を行った。調整によって設定した飽和点の入力電力と

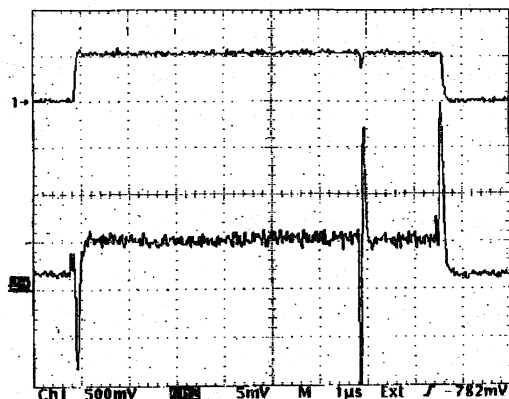


図6:位相検出器を用いた調整後の飽和点での

出力電力波形と位相の波形

上: 出力電力波形 (82.4kW)

下: 位相波形 (4.4deg./div)、横軸: 1μs/div
パルスの立ち上がり後7μsで位相反転

表1:テストベンチにおける調整後のサブスタッククライストロンの飽和出力電力

クライストロン	入力電力(mW)	出力電力(kW)
#9401	20	62
#9501	70	70
#9502	110	58
#9503	140	58
#9601	65	77
#9602	50	82

出力電力を表1に示す。なお、この時の印加パルス電圧は全てのクライストロンに対して約27kVであった。

テストベンチでの位相検出器を使った調整の結果、すべてのクライストロンで、58kW以上の出力電力が得られるようになった。

次に、テストベンチで評価したクライストロンを実際のドライブラインに接続して、最終的な出力電力と位相の調整を行った。この時の出力電力はドライブラインからの残留反射(VSWRで約1.2)により、テストベンチでの出力電力と比べて若干低くなったが、出力、位相ともに安定であった。これら全てのクライストロンは、放射光運転再開のためのコンディショニング及びビーム加速試験に使用され、約2ヶ月間にわたり安定に動作していることが確認された。

6. 結論

KEKB計画で各セクターにある8本の大電力クライストロンを励振させるために開発された60kWサブスタッククライストロンの調整を行った。その際、出力電力だけでなく位相検出器を用いることにより、非常に小さい寄生発振を感度良く見出すことができた。また出力電力波形を見ただけでは見落としがちな位相不安定を取り除くためには、位相検出器を用いた調整が有効であった。

参考文献

- [1] KEK B-factory Design Report June, 1995.
- [2] “放射光入射器増強計画—KEKBに向けて”, KEK-Report 95-18, 1996.
- [3] S.Fukuda et al., “Performance of the RF-Source For KEKB Linac”, Proceeding of the XVIII Int. Linear Acc. Conf., pp.187-189, 1996;
S.Fukuda, “Design and Manufacturing The 60kW Klystron Driving the 50MW Klystron for KEKB”, Proceedings of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sept.1995