

EOLクリッパー回路の試作と動作

本間 博幸¹、中島 啓光、明本 光生、設楽 哲夫、福田 茂樹
高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

パルス電源の出力部保護回路であるEOLクリッパー回路を試作した。動作試験を行いほぼ満足できる性能であることを確認した。

1. はじめに

KEKB入射器マイクロ波源の大電力クライストロン用パルス電源では、現在、負荷からの反射エネルギー吸収のためシャント回路を使用している。PF入射器のパルス電源設計時、EOLクリッパー回路も検討されプロットタイプのパルス電源での試験結果も良好であったが、当時構成要素のバリスターの寿命に不安があり、モニター用カレントトランスフォーマーも高圧部分で使用されることから信頼性の点で採用を見合わせた経緯がある^[1]。

PF、トリスタンの入射器からKEKB入射器への増強直後、クライストロンの中には放電で碍子にピンホールの開くものが現れた。パルス電源出力回路部の配線とパルストランスの変更ため、パルス出力電圧波形のバックスイング部分に重畳する周期的なスパイク電圧が大きくなったことが原因である。この対策として、エネルギー吸収性能がシャント回路より優れているEOLクリッパー回路を導入することが検討され試作を行なった。しかし、ダイオードスタックの抵抗とインダクタンス成分のため期待される効果が中々得られなかった。幸い、クライストロンの碍子形状を変更することにより放電を防ぐことが出来る様になりピンホールの問題には一応の解決が見られたが、EOLクリッパー回路の理解も漸く進み、要求される性能も得られるようになった。本稿では試作品の動作について報告する。

2. EOLクリッパーとシャント回路の比較

図1(a)はパルス電源の出力電圧波形をEOLクリッパーとシャント回路を用いたものそれぞれについて、回路シミュレーションコード「B2SPICE」を用い計算した結果である。図1(b)ではスパイク電圧の部分を拡大している。図2はシミュレーションのパラメーターと両回路の使用位置の違いを示す。シミュレーションでは両者共に抵抗値はPFNの特性インピーダンスに等しい4.7Ω、配線、ダイオードのインダクタンス値を合わせて1μHとしている。

又、クライストロンは4.7Ωの純抵抗とし、パルストランスのパラメーターも込みで計算を行った。

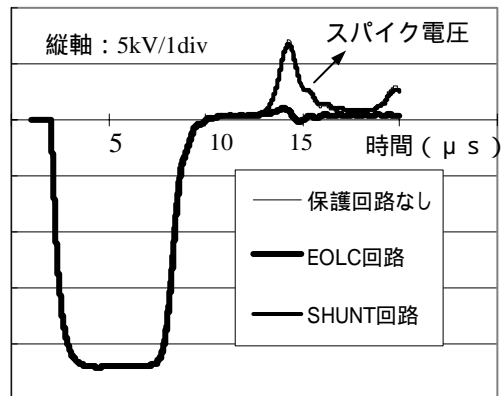


図1(a) パルス電源出力電圧波形

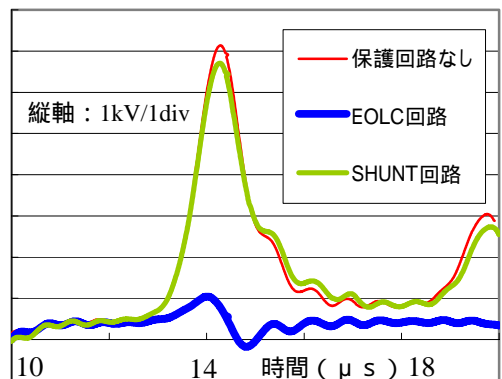


図1(b) スパイク電圧部分の拡大

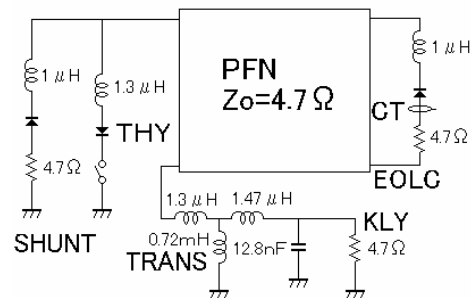


図2 シミュレーション回路

図1の結果から、シャント回路ではほとんど抑止できないスパイク電圧がEOLクリッパーにより十分

¹E-mail: hiroyuki.honma@kek.jp

小さくできることがわかる。図3(a)、(b)は負荷短絡時に両回路を流れる電流をシミュレーションしたものである。この結果からもクリッパー回路の吸収特性が良いことがわかる。

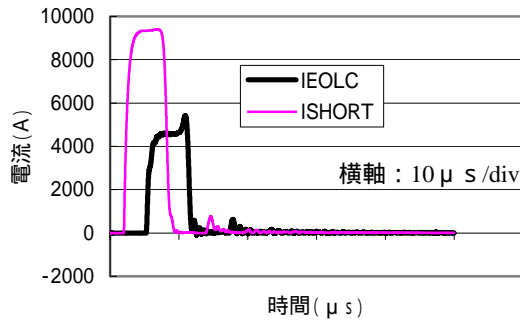


図3(a) 負荷短絡電流とEOLC電流

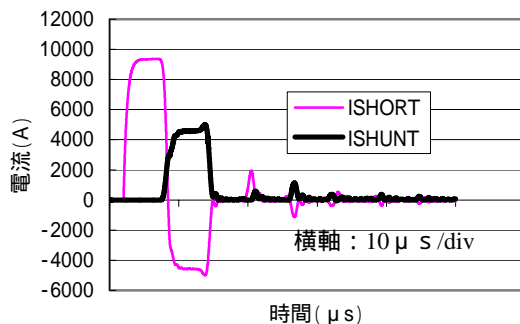


図3(b) 負荷短絡電流とSHUNT電流

3. EOLクリッパー回路の構成と仕様

図4 は今回試作したEOLクリッパー回路の外観を示す。回路はオリジン電気社製ダイオードスタックMDA72SN15、東海高熱製エレマ抵抗（5並列で構成、全電力容量1.7kW）とStangenes社製カレントトランスフォーマー（CT）モデルno.3-0.01から構成される。

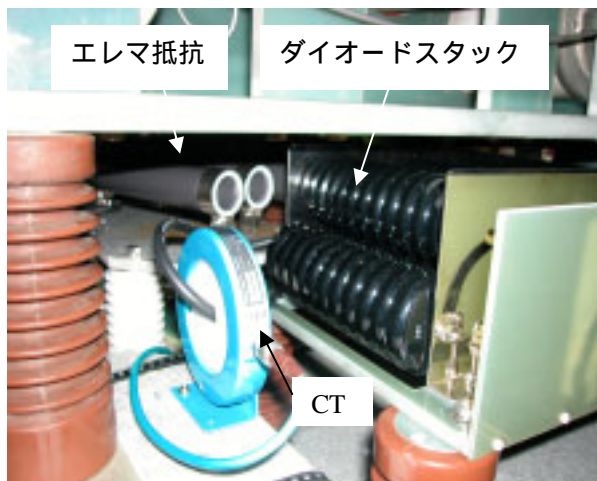


図4 EOLクリッパー回路外観

表1にダイオードスタックの性能を示す。スタックは合計99個のモジュールから構成されるが、ひとつのモジュールには2個のダイオード素子が入っており、それぞれを接続する配線は流れる電流による磁場が互いに打ち消される構造にして低インダクタンスを実現している。エレマ抵抗の電力容量はPFN架台とそれを支える台車間の限られた空間の大きさにより制限されている。CTはグランド側ではなく、図2の様にパルス出力時に高圧となる部分で用いられるが、モデルno.3-0.01はドーナツの内径が73mmあり高圧配線との耐圧距離が比較的とれている。

表1 ダイオードスタックの性能

ダイオード種類	拡散接合型シリコン
スタック構成	11直列×9並列
ピーク非線り返し逆電圧	72kV
尖頭逆耐電圧	47 kV
平均整流電流*	1.5A
尖頭順サージ電流**	1000A
接合部温度	-55 ~ 125
インダクタンス	0.1 μH
順電圧（電流20A時）	50V

* 50Hz単相半波整流電流の平均値

** 50Hz正弦波尖頭1サイクルで流すことのできる値

4. 試作回路の動作

4.1 負荷短絡試験

図5 はパルストランス1次側への配線を短絡し、パルス電源を動作させた時の短絡電流とクリッパー回路電流を測定したものである。エレマ抵抗の抵抗値はPFNのインピーダンスとほぼ等しい4.2 Ωとし、充電電圧は45 kVとした。この図から、図3(a)に示した様にほぼ1回のパルスで反射エネルギーが吸収されていることがわかる。クリッパー電流値は約5000Aであるが、ダイオードスタックの設計はピーク電流が7000A、幅が10 μsのパルス電流が20 msの間隔で2回繰り返しても、ダイオード接合部温度上昇計算値が9 ℃にしかならないものである。スパイク電圧部分の50ppsの繰り返しで常に流れている電流によるダイオード表面の温度上昇を、42kVの充電電圧で数時間のランニング試験の後測定したところ結果は35 ℃であった。ダイオード表面から接合部までの温度勾配を無視すれば、短絡時の接合部温度は44 ℃にしかならない。表1の接合部温度に十分収まっている。しかも、CTの出力を用いコンパレータとリレーにより、トリガーオフ接点を発生するP&H回路の動作時間は30 ms以内なので、3回目の短絡電流は流れず、スタックの保護は確実に働くと考えられる。

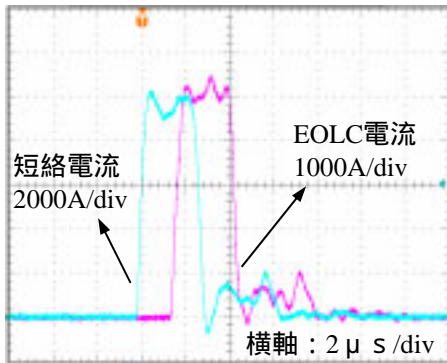


図5 短絡電流とEOLC電流

4.2 スパイク電圧の抑止効果

図6はPFN42kV充電時のスパイク電圧波形測定結果（トランス2次側）を、EOLクリッパー回路をつけない場合とつけた場合で比較したものである。エレマ抵抗の抵抗値は前述した4.2 である。この図から、抑止効果が図1ほどではないことがわかる。全体のインダクタンスが配線のみも含め約 $2\mu\text{H}$ となり、ダイオードスタックの抵抗分が表1の順方向電圧から算出される 2.5Ω ありとしてシミュレーションしたが、測定結果を説明できず、そのためには全体の抵抗値をもっと増やしてやる必要があった。そこでダイオードスタックの抵抗値を実際に測定することにした。

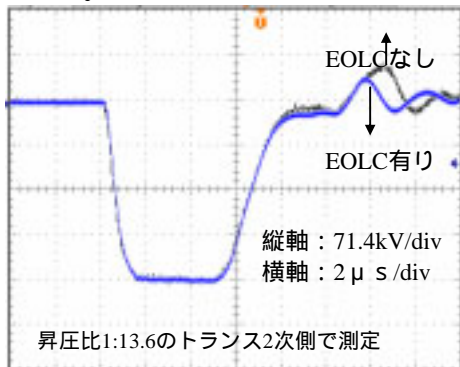


図6 スパイク電圧波形測定結果

図7は前節で述べた負荷短絡試験の際、ダイオードスタックのアノード・カソード間の電圧を高圧プローブで測定し、CTの電流値とからスタック抵抗値を算出したものである。PFNの充電電圧は 30kV で行なった。この図から抵抗値がパルス平坦部では 1.5Ω ほどであり表1の順方向電圧から与えられる 2.5Ω に近い値になっているが、立ち上がり部分では 10Ω 程もあることがわかる。立ち上がり部分では純抵抗以外にインダクタンス成分によるリアクタンスが重畳しているが、表1よりスタックのインダクタンスは非常に小さいので、この値のほとんどがスタックの抵抗成分と言える。 10Ω の抵抗値を用いシミュ

レーションを再実行したところ、図6 の結果をほぼ説明することができた。スパイク電圧に対するスタックの抵抗値は予想以上に大きく、この電圧を抑止するためにはエレマ抵抗の値もこれに合わせて小さくしてやる必要のあることがわかった。確認のためエレマ抵抗値を 0.7Ω としスパイク電圧を測定したところ、EOLC回路なしの場合の半分以下にできた。

エレマ抵抗の最適値としては、スパイク電圧に対しては小さくするほど良いのだが、短絡時の反射エネルギー吸収性能を良くするためには、PFNの特性インピーダンスに等しくすることが望ましいので、平坦部の抵抗分 1.5Ω と合わせ 4.7Ω となる 3.2Ω が最適値と思われる。又、配線のインダクタンスも現在の半分にする事は可能であり効果は更に向上できる。

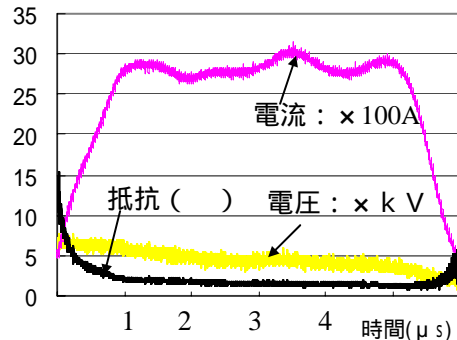


図7 ダイオードスタック抵抗値測定

4.3 連続運転試験

今回特には用いなかったバリスターはサイラトロンアノードに負の電圧を与え一旦オンになったサイラトロンをオフに戻すために用いられるものである。オフにならずに次の充電が始まる場合にはサイラトロンの連続放電が起こる。この確認のためもあり、 42kV の充電電圧で数時間のランニング試験を行った。この結果サイラトロンの動作異常は観測されなかった。又試験後、ダイオードスタックと共にエレマ抵抗の表面温度を測定した結果は 33°C であり、温度上昇はほとんどなかった。エレマ抵抗の電力容量も十分なものであることが確認できた。更にCTでの放電も観測されなかった。

5. まとめ

現在試作品は、クライストロンホールで長期間の信頼性試験を行なっている。今後、信頼性の向上を待ちいろいろな場面で適用することを目指している。

参考文献

- [1] 穴見昌三、”放射光リニアックの大電力高周波源について”、Proceedings of the Workshop on ELECTRON LINAC AND STRECHER FOR THE NEXT PLAN AT KAKURIKEN, Sendai, 1983, pp.91-101