

同軸ケーブルを用いたパルス発生器の検討

越智 幸治 南里 圭一郎 木島 均

A study on Pulse Generator using Coaxial Cable

Koji Ochi* Keiichiro Nanri** Hitoshi Kijima***

Abstract

In order to carry out the simulation of the electrical noise, a pulse generator with fast rise time is needed. For this reason, the pulse generator using a coaxial cable is usually used. The Pulse generator consists of a DC power supply, a charging resistor, a coaxial cable, a relay, and a terminator. Even the same voltage as charge voltage was outputted when the termination of the impedance was high, only the output of the half of charge voltage is obtained when the termination impedance was set at 50 ohm which is the characteristic impedance of the coaxial cable. For this reason, we have been developing a pulse generator with the same voltage as charge voltage while a termination impedance was set at 50 ohm, by connecting a coaxial cable in series and in parallel.

キーワード：インパルス、TLP法、ノイズイミュニティ試験、Blumlein line 線路法、

1、はじめに

電源線に重畳されるノイズの一つとして電源スイッチのON時のチャタリングやOFF時に発生するシャワーリングアークノイズがある。これらをシミュレーションする代表的なものとして、インパルスノイズシミュレータがある。本検討で対象としたインパルス発生器は、同軸ケーブルを利用して方形波を発生させており、立上り時間が非常に早く (≤ 1 ns)、高電圧 (現在市販されているものの最大値は4 kV) のパルスを発生させることができるのが特徴である。

このパルス発生器の出力インピーダンスは50 Ω なので、負荷インピーダンスが50 Ω の場合に“1”の充電電圧に対して“1/2”の出力電圧となる。(負荷インピーダンスが高い場合は限りなく“1”に近づく)

電源線に注入するノイズイミュニティ試験において、さらなる高電圧での試験の要望は根強くあるものの、インパルス発生部のスイッチの耐電圧 (8 kV) の限界によって最大出力電圧が制限されているのが現状である。

このため、各部品の耐電圧を上げることなく、同軸ケーブルの特性インピーダンスと同じ値の抵抗器で終端した場合でも、充電電圧と同じ電圧 (従来の2倍) の出力パルスを得ることが出来たので報告する。

-
- * 職業能力開発総合大学校非常勤講師
 - ** 職業能力開発総合大学校卒業生
現在 九電工勤務
 - *** 職業能力開発総合大学校
電気設備ユニット

2、同軸ケーブルを用いたパルス発生器の原理

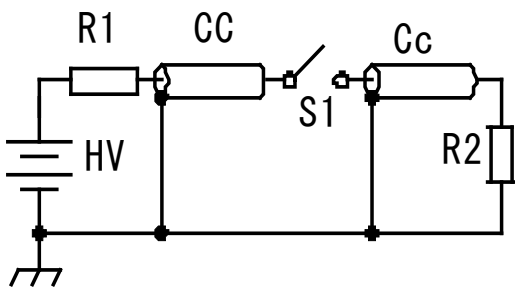
この方法は一般にTLP (Transmission Line Pulse)法と呼ばれており、図1に示す如く、高電圧電源、充電抵抗、同軸ケーブル、同軸リレー、終端抵抗で構成される。同軸ケーブル内の進行波反射を利用してパルス幅を形成しており、パルス発生部の同軸ケーブルの遅延時間の2倍のパルス幅となる。つまり、50 Ωの同軸ケーブルは一般的に1 m当たり約5 nsの遅延時間があるので、それによるパルス幅は10 nsとなる。また、パルス電圧は終端抵抗の抵抗値 (R)と同軸ケーブルの特性インピーダンス (50 Ω) との関係で決まる。

$$V = E \times R / (R + 50)$$

V : 出力パルスのピーク電圧

E : 充電電圧

同軸リレーの接点が開いている時に高電圧電源から充電抵抗を通して同軸ケーブルに電気エネルギーを蓄えられる。蓄えられた電気エネルギーは同軸リレーの接点が開くと、出力同軸ケーブルCcと逆方向に伝搬し、終端抵抗R2の両端にパルス幅がCcによる遅延時間の2倍のパルス幅の高電圧パルスが出力される。



HV : 高電圧電源 R1 : 充電抵抗
S1 : 同軸リレー R2 : 終端抵抗
CC : 同軸ケーブル Cc : 出力ケーブル

図 1 TLP 法によるパルス発生方法

低い電圧ではあるが、この方法によりパルスを発生させ、終端抵抗器の抵抗値を変化させて出力パルス電圧を測定したので、参考までに記載する。実験装置は直流電源、充電抵抗、同軸ケーブル、

同軸リレー、終端抵抗で構成した。

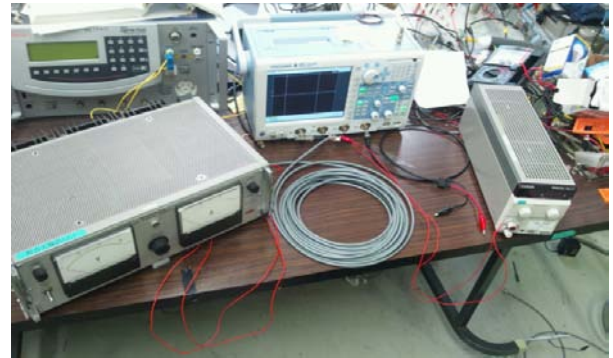


図 2 実験装置

図 2 は実験状況の写真である。使用した同軸ケーブル(3D-2V)の特性インピーダンス Z_0 は 50 Ω である。充電電圧を 1 V に固定して終端抵抗 R2 を変化させることにより出力電圧がどのように変化するのかを測定確認した。

条件としては

- (1) $Z_0 > R_2$ ($R_2 = 25 \Omega$)
- (2) $Z_0 = R_2$ ($R_2 = 50 \Omega$)
- (3) $Z_0 < R_2$ ($R_2 = 100, 1000 \Omega$)

測定結果の一例として、 $R_2 = 50 \Omega$ の結果を図 3 に示す。上の輝線は電源電圧を示し、下の輝線は出力波形を示す。1 V の電源電圧に対して、0.5 V のパルス電圧であることが確認できた。

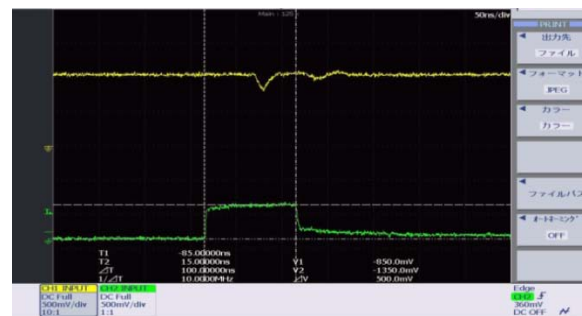


図 3 1 V の場合の $Z_0 = 50 \Omega$ の測定結果

終端抵抗器の抵抗値を変化させた時の出力パルス電圧の計算値と実測値を表 1 に示す。

表1 終端抵抗値と出力パルス電圧との関係

終端 抵抗値	パルス電圧 (V)	
	計算値	実測値
25 Ω	0.33	0.35
50 Ω	0.50	0.50
100 Ω	0.66	0.60
1000 Ω	0.95	0.95

この表 1 から、実測値と計算値とはよく一致していることが確かめられた。

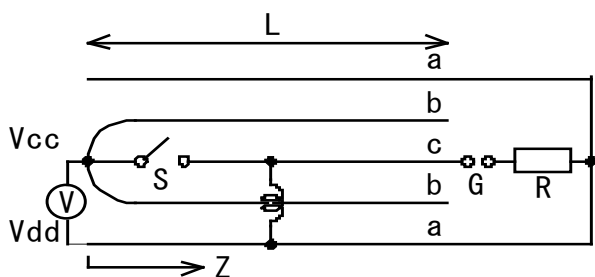
3、2倍電圧出力方法について

参考文献(1)において、充電電圧と同じ波高値のパルスを生じさせる Blumlein line 線路法について記述されている。この方法は、3重構造の同軸ケーブルを使用しており、市販はされておらず入手が困難である。このため、3重構造の同軸ケーブルを一般の同軸ケーブルに置き換えて、充電電圧と同じ電圧の出力パルス電圧を得る方法について検討した。

3-1、Blumlein line 線路法の概要

ブルームライン (Blumlein) によって提案された方法で、パルス形成線路は2重の同軸構造のケーブルを使用して、中心線と最外皮との間でパルスを生じさせる方法である。

図4に概要を示す。



Z：同軸ケーブルの特性インピーダンス

L：同軸ケーブルの長さ

図4 ブルームライン線路

3重構造の同軸ケーブルと考えると、中心導体が図4の“c”であり、次の導体が“b”であり、一番外側の導体が“a”である。

図4のDC電源“V”の上側を“+”下側を“-”とすると、スイッチ“S”がオフ状態では“a”および“c”は- (Vdd) になり、“b”は+ (Vcc) として充電される。従って、ギャップ“G”の両端は同じ電圧なので放電状態にはなく、終端抵抗“R”には何にも発生しない。

スイッチ“S”がオンとなると、過渡状態においては“a”と“c”の間にあるインダクタンスによってそれぞれは分離されるので、“c”は瞬時にVccとなり、ギャップ“G”の両端にはVccの電圧がかかって放電状態となり、パルスの出力を開始する。“b”の電位は“c”によってVcc分ち上げられるので、 $2 \times Vcc$ の電圧となり、パルス出力電圧は充電電圧と同じVccとなる。

3-2、実現する方法

2重の同軸構造のケーブルの代わりに一般の同軸ケーブルを積み重ねる方法を検討した。つまり、同じ同軸ケーブルを2本用意し、同軸ケーブルAの芯線を同軸ケーブルBの外皮に接続して、同軸ケーブルAの外皮と同軸ケーブルBの芯線から2倍電圧の出力を得る方法である。この場合、パルスの出力インピーダンスは同軸ケーブルの特性インピーダンスの2倍となる。従って、使用している同軸ケーブルと同じインピーダンスで出力させるためには、同軸ケーブルAおよびBの特性インピーダンスを半分にする必要がある、このためには同じ同軸ケーブルを2本並列接続すれば良い。

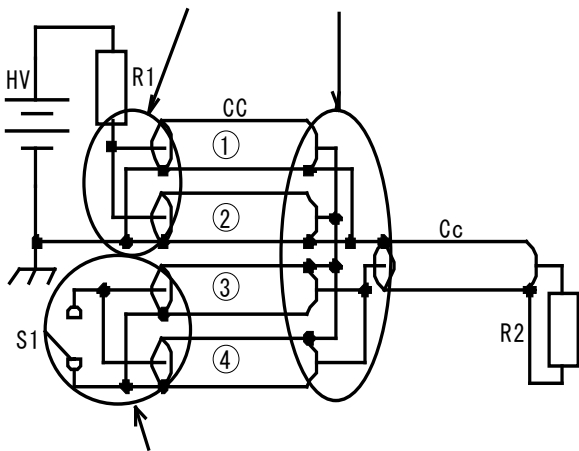
つまり、同じ長さの同軸ケーブルを4本用意して、2本並列接続したものを直列に接続することとなる。

図5に発生部の構成を示す。高電圧充電部(同軸部品A)、パルス幅形成用同軸ケーブルCC(同一長の同軸ケーブル4本:①~④)、同軸スイッチS1部(同軸部品B)、接続部(同軸部品C)、出力

用同軸ケーブル Cc で構成される。

クとの接続はコネクタを使用した。

同軸部品 A (充電部) 同軸部品 C (接続部)



同軸部品 B (S1 周辺回路)

R1 : 充電抵抗 R2 : 終端抵抗

S1 : 同軸スイッチ

同軸ケーブル CC ①~④ : パルス形成用同軸ケーブル

同軸ケーブル Cc : パルス出力用同軸ケーブル

図 5 発生部の構成

同軸ケーブル①,②および③,④は並列接続となり、特性インピーダンスを 25 Ωとしている。①,②の外皮は GND であるが、③,④の外皮はそうではないので、同軸ケーブルの外皮間には 8 kV 以上の絶縁耐圧が必要であり、同軸ケーブルの収納方法にも工夫が必要となる。また、同軸スイッチの外皮は③,④の外皮と同じ高電圧がかかるので、リレー駆動用コイルとの間にも高耐圧高絶縁が必要となる。

丸枠内の箇所は特性インピーダンスが乱れ易い箇所なので、これらの部品の出来不出来がパルス品質を左右するので、可能な限り小さく、また加工しやすいように設計した。

パルス幅は同軸ケーブルの長さで決まるため、パルス幅を変更するためには 4 本の同軸ケーブルを交換する必要がある。従ってパルス幅は固定としたが、パルス幅の変更も可能なように各ブロッ

4、仕様の設定

に従来品の部品を利用することとし、インパルスの出力電圧と立上り時間の仕様を表 2 のように定めた。

表 2 仕様の比較

	従来器仕様	目標仕様
充電電圧	8 kV	8 kV
出力電圧	4 kV	8 kV
立上り時間	≤ 1 ns	先端部 ≤ 2 ns 全体 ≤ 10 ns
パルス幅	50 ns ~ 1 μs	100 ns
繰返周波数	60 Hz	60 Hz

出力電圧を上げるための妨げは、水銀リレーである。さらに耐電圧の高い水銀リレーは存在しないので、従来品と同じ耐電圧の水銀リレーを使用して目標仕様を達成しようという試みであり、この制約を考慮して、表 2 に示す仕様とした。

つまり、充電電圧と同じ電圧のパルス出力電圧を得ることはできるが、パルス幅は固定とした(パルス幅を変更する場合は同軸ケーブル 4 本すべてを交換することとなるので) ことと、高耐圧で複雑な構造の同軸部品を製作することとなるので、特性インピーダンスのミスマッチングエリアが広がって、立上り時間が若干遅くなってしまいうことが想定されるからである。

次に検証方法についてであるが、広帯域で 8 kV のパルスの測定ができる測定器は存在しない。従来からの測定器は 4 kV までである。そこで、4 kV までは従来の測定系で測定し、出力電圧による出力波形(主に立上り時間およびパルス電圧)の変化があまりないことを確認し、低い電圧で立上り時間などの高速部分の検証を行い、高電圧プロー

ブを使用して高電圧部（周波数制限があるので、立上り部に影響が出る）を検証することとした。

5、同軸部品の構成技術

5-1、同軸部品 A

同軸部品 A の外観写真を図 6 に示す。パルス形成用同軸ケーブル（図 5 の同軸ケーブル CC）に高電圧電源から充電するブロックである。絶縁耐圧を考慮しながら配線した。この箇所は、定在波を反射させるだけなので、高周波性能にはそれほど影響はしない。

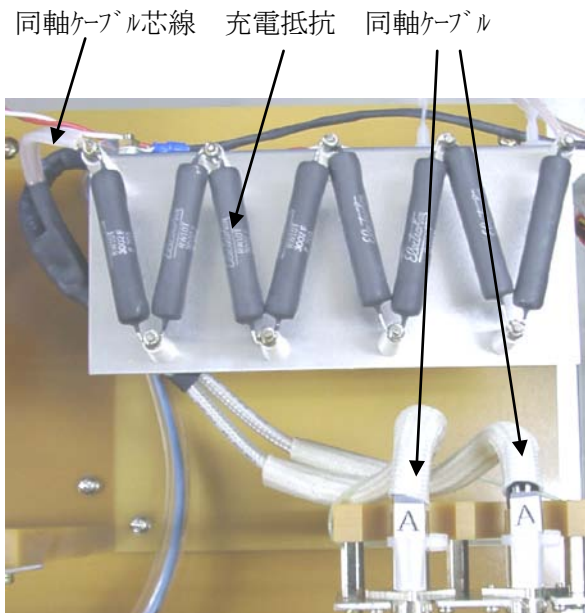


図 6 同軸部品 A の外観

5-2、同軸部品 B

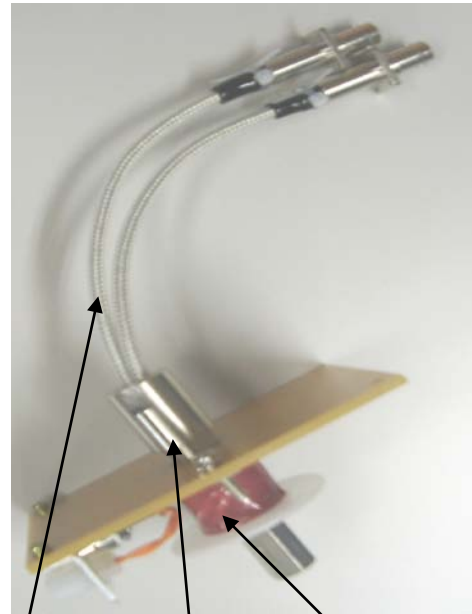
同軸リレーのスイッチは波形切れやチャタリングを防ぐ目的で水銀スイッチを使用した水銀リレーとすることとした。

同軸ケーブルを 2 本並列接続して水銀リレーの片電極に導き、水銀リレーの反対電極は同軸ケーブルの外皮に接続するという回路ブロックである。

また、芯線と外皮との間には高電圧（8 kV 以上）がかかるので、芯線と外皮との間を高耐圧の設計とする必要がある。また、GND に対して同軸部品の外皮に 8 kV が通電されるので、外皮とリレード

ライブ用コイルとの間にも 8 kV 以上の絶縁耐圧を確保する必要がある、構造の構築と加工方法を含めて、一番重要な検討要素であった。

水銀リレー部の加工外観を図 7 に、水銀リレーユニットを機器に取り付けた状態を図 8 に示す。



同軸ケーブル 同軸(水銀)リレー コイル

図 7 水銀リレーユニット



図 8 水銀リレー取付状態

加工方法についてであるが、まず水銀スイッチの

上側には同軸ケーブルを 2 本接続した。この加工は、同軸ケーブル 2 本の芯線をまとめて水銀スイッチ上部端子に接続し、絶縁チューブをかぶせてシリコンゴム（熱硬化タイプ）を注入した。さらにエア抜きをして熱硬化した後にケースに入れて同軸ケーブルの外皮を加工した。水銀スイッチの下側はケースに接続させるために、柔らかい銅線を丸めて座布団状にして詰め込んだ。また、水銀リレーとドライブコイルとの間には、絶縁用にマイラフィルムを巻いた。

この状態の水銀リレーを絶縁板に取り付けて水銀リレーユニットとした。なお、同軸ケーブルの他端がコネクタになっている理由は、作業性とパルス幅を設定する同軸ケーブルの交換ができることを想定したことによる。

5-3、同軸部品 C

同軸ケーブルを 2 本ずつ並列接続し、それらを積み重ね（直列接続）、一本の同軸ケーブルとして出力する部品である。並列に接続されたそれぞれの同軸ケーブル（①、②および③、④）には最大で約 8 kV の電圧に充電される。出力用同軸ケーブル Cc は、出力端が 50Ω で終端されている場合は 8 kV の方形波が通過する（パルス電圧 8 kV）が、出力端がオープンの場合にはその 2 倍である 16 kV の方形波が通過することとなる。これらのことを考慮して設計をした。

図 9 は同軸ケーブルを接続した箇所の写真であり、図 10 はそれをベーク板ケースに収納して機器に取付けた状態の写真である。

この箇所は、インピーダンスのミスマッチング部を最小限とすることと、作業性を考慮して、立体構造とした。図 9 において、下部のプリント基板部が合成部分である。プリント基板を直角に配置して、同軸ケーブルの芯線を貫通させた。なお、同軸ケーブルを固定するためにさらにプリント基板を使用したので、2 段構造になっている。また絶縁耐圧を上昇させるために、ブロック全体をケ

ースに収納してシリコンゴムを充填した。



図 9 同軸部品 C の外観

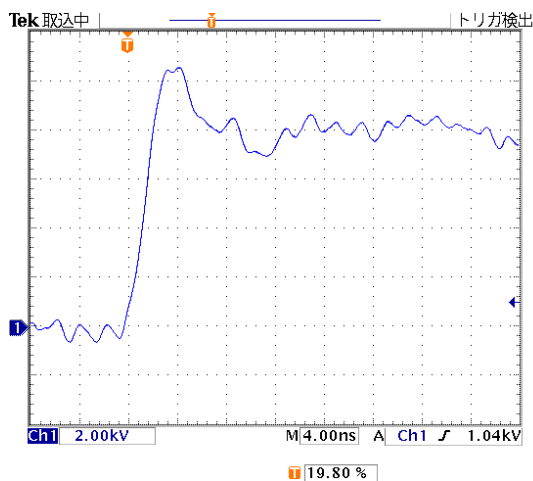


図 10 同軸部品 C の組み込み状態

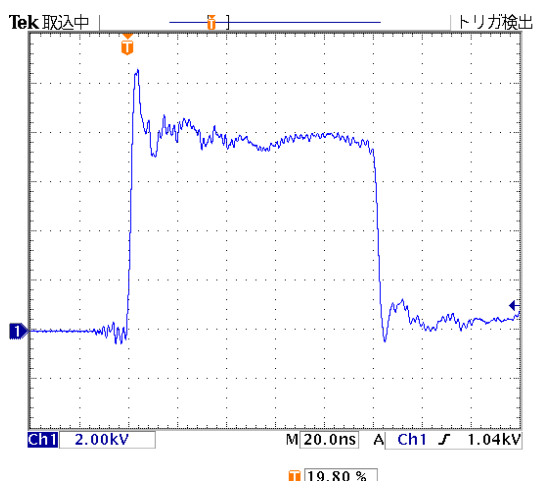
6、評価結果

6-1 高電圧プローブでの 8 kV 出力波形観測例

図 11 に、出力パルス波形例を示す。



X 軸：4 ns/div Y 軸：2 kV/div



X 軸：20 ns/div Y 軸：2 kV/div

オシロスコープ：Tek 製 TDS-3052

プローブ：Tek 製 P-6015A

(周波数帯域幅：DC～50 MHz)

図 11 8 kV 出力波形

8 kV のパルス電圧波形に使用できる 50 Ωアッテネータがないので、50 Ωの抵抗器で終端し、高電圧プローブで観測した。

パルス電圧が約 8 kV であることが確認できた。なお、立上り時間および先端部の波形は、終端の抵抗器やプローブの性能に影響されているので、

平坦な部の電圧で判断した。

これらの評価結果から、市販の同軸ケーブルを使用して、Blumlein line 線路法の応用によって、充電電圧と同じ電圧のパルスを出力させることができた。

6-2 周波数帯域幅 DC～4 GHz のオシロスコープでの観測例

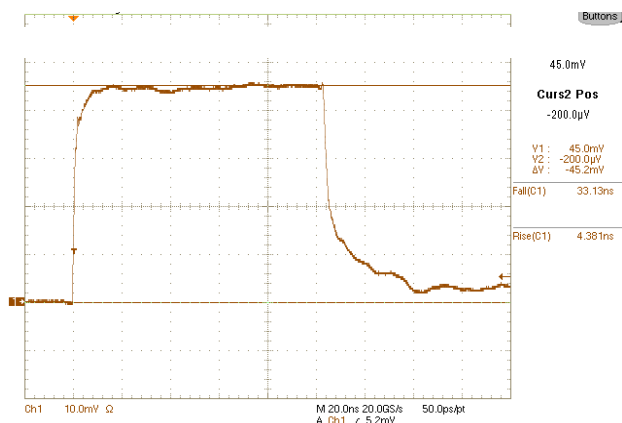
出力パルス電圧を低くして、さらに広帯域のオシロスコープで出力波形の立上り部を観測した。

オシロスコープ：Tek 製 TDS-7404

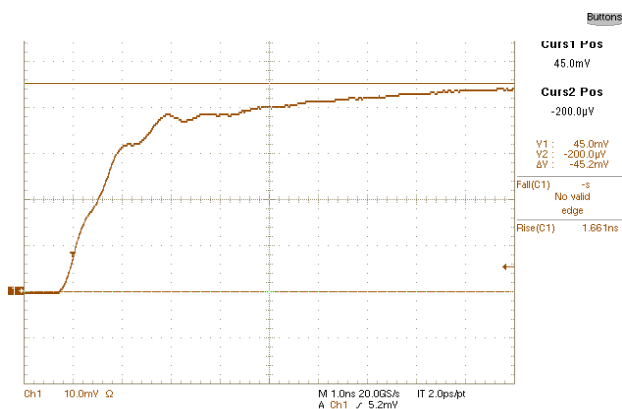
(周波数帯域幅 DC～4 GHz)

アッテネータ：Tek 製 011-0059-03 (周波数帯域幅 DC～2GHz、20 dB) 2 個使用

充電電圧：約 5 V (アッテネータおよびオシロスコープにダメージを与えない様に低い電圧で観測をした)



X 軸：20 ns/div Y 軸：0.5 V/div



X 軸：1 ns/div Y 軸：0.5 V/div

図 12 広帯域領域での波形

立上り部においては、立上り時間の先端部は約 1.7 ns (目標値 : 2 ns 以下) と、なまりを含めた全体での立上り時間は約 5 ns (目標値 : 10 ns 以下) であり、目標仕様を満たしていることを確認した。

6、結論

電源ノイズ等をシミュレーションするために、立上り時間が早いパルス発生器が必要となる。このため通常は、同軸ケーブルを用いたパルス発生器が使用されている。パルス発生器は、直流電源、充電抵抗、同軸ケーブル、同軸リレー、終端抵抗で構成される。しかしパルス発生器の負荷側でインピーダンスを高抵抗で終端した場合、充電電圧と同じ電圧が出力されるものの、特性インピーダンス 50 Ω で終端した場合、充電電圧の半分の出力しか得られない問題があった。

このため、負荷端を高抵抗で終端することなしに、充電電圧とほぼ同じ電圧を発生可能なパルス発生器を作成することとし、出力パルス電圧 : 8 kV、立上り時間 : 2 ns 以下 (立上り先端部) というインパルス発生器を作成できた。

今後さらに以下の改善を行っている。

(1) 立上り部の改善

従来機器の立上り時間である 1 ns 以下には届かなかった。同軸部品 B および C において、インピーダンスが 50 Ω から 25 Ω に変換される箇所および耐電圧構造をさらに工夫することによって、立上り時間をさらに早くすることと、先端部のなまりの改善が可能である。

(2) 測定系の確立

高電圧で高周波領域の測定系については、高電圧に対応した広帯域アッテネータが必要であり、現在調達中である。

入出力インピーダンス : 50 Ω

入力耐電圧 : 8 kV 以上

減衰量 : 40 dB 程度

周波数帯域幅 : DC~500 MHz 以上

(3) パルス幅を可変にする検討

パルス幅を変えるには、同じ長さの同軸ケーブル 4 本を同時に交換する必要がある。今回は、交換が可能なように接続部にコネクタを使用した。さらに交換が容易にできるような構造を考案中である。

参考文献

- (1) 高電圧パルスパワー工学
原 雅則 秋山 秀典 共著
森北出版株式会社
- (2) 直列型ブルムラインを用いた低電圧、低残留磁界の電子シンクロトロン用高速出射装置
築島 千尋 中田 修平
電気学会論文誌 Sep. 1992
- (3) NECA TR-28
日本電気制御機器工業会 技術資料