数値電磁界解析による裁断波雷インパルス電圧試験回路の直角波応答評価

正員 馬場 吉弘 (同志社大学)

正員 石井 勝 (東京大学)

Unit Step Response of a Measuring Circuit for Chopped-Lightning Impulse Voltages
Studied by Numerical Electromagnetics Code

Yoshihiro Baba, Member (Doshisha University) and Masaru Ishii, Member (University of Tokyo)

Unit step response (USR) characteristics of a measuring system for the test of chopped-lightning impulse voltages, which were computed by the Numerical Electromagnetics Code (NEC-2), are compared with those of the USR measuring circuit recommended by IEC. When an impulse voltage generator of high impedance is used in the test of a chopped-lightning impulse voltage, its response is similar to that of the USR measuring circuit, while a low-impedance generator is used, its response differs.

Although the influence of sphere electrodes of the chopping gap is identified as a spike in the initial rising part of the USR, it little influences the USR parameters of a system including a shield ring and a high-impedance impulse voltage generator. In the case of a system having a 100 Ω or 200 Ω damping resistor and a low-impedance generator, however, the response times become longer owing to the presence of sphere electrodes.

キーワード : 裁断ギャップ, 裁断波雷インパルス電圧, 数値電磁界解析, 直角波応答, 抵抗分圧器

Keywords : chopping gap, chopped-lightning impulse voltage, numerical electromagnetic analysis, step response, resistor divider

1. はじめに

IEC 規格⁽¹⁾ では, 高電圧試験に関わる測定システムの校正は基準測定システムとの比較により行うことが標準となっている。この比較試験が行えない場合には, その代替法の一部として直角波応答試験が記述されている。直角波応答試験は上述のように義務づけられてはいないが, 単一の系で測定システムの特性を評価することができ, また直角波応答 (USR: Unit Step Response) パラメータにより客観的に応答特性を把握できるという利点を有しているため, 研究面においては定着した手法として広く利用されている。

各種電圧のなかで測定精度を確保するのが最も困難なものとして波頭裁断波雷インパルス電圧が知られている。IEC 規格では, この電圧を測定するための基準測定システムに対して, 部分応答時間 20 ns 以下, 実験的応答時間 10 ns 以下, 整定時間 150 ns 以下を満たす必要のあることが規定されている。

裁断波雷インパルス電圧試験では, インパルス高電圧発生器と分圧器の間に, 裁断用の球ギャップがそれらと並列に接続される。球ギャップがスパークオーバーすると, それに伴い強力な電磁界パルスが発生する。この電磁界パルスは抵抗分圧器に結合し誘導を生じる。文献⁽²⁾⁽³⁾ では, この誘導 (雑音) 成分が裁断波雷インパルス電圧の測定値に与

える影響について検討が行われている。一方, IEC 規格が推奨する直角波応答測定回路には球電極が無いなど, 裁断波試験回路とはかなり異なったものとなっている。上述のような誘導雑音に関する検討が別途必要になるのは, 本来測定システムの応答の一部と考えるべき球ギャップでのスパークオーバーによる誘導成分が直角波応答測定回路では考慮されないことに起因しているものと考えられる。

本論文では, 直角波応答測定回路と裁断波雷インパルス電圧試験回路の USR パラメータに, どの程度の相関あるいは相違があるかについて, 電磁界解析コード NEC-2⁽⁴⁾ (Numerical Electromagnetics Code) を用いて両回路の応答を解析し, 比較検討したので報告する。

2. 解析方法

電磁界解析コード NEC-2 はモーメント法⁽⁵⁾ と呼ばれるマトリクス解法により, 線状導体に流れる電流とそれによって生じる電界あるいは線状導体を照射する電界とそれによって誘導される電流の関係を表す電界積分方程式を計算するソフトウェアである。

NEC-2 で計算を行うためには解析対象の導体系を円筒要素の組み合わせでモデル化する必要がある。各要素は単なる導体とすることもインピーダンスを持たせることも可

能で、電圧源も一要素に割り当てる。計算は周波数領域で行われるため、時間領域の応答を得るためにはフーリエ変換および逆フーリエ変換を必要とする。NEC-2 はモデル化された導体系の電流分布を、各円筒要素表面における軸方向電界の境界条件を満足した形で計算する。ここでいう電界とは、系の全ての円筒要素の軸方向電流に起因した電界のことである。解析手法の詳細については文献⁽⁶⁾を参照されたい。計算精度は、USR パラメータの測定値と計算値の差という意味では、20 ~ 30 % 程度⁽⁷⁾であるが、計算値の相互比較を行う上では 10 % 程度の精度を有しているものと考えられる。なお、同一の測定系の USR パラメータを国内 8 機関の実験室で測定した結果では、部分応答時間、実験的応答時間および整定時間の変動係数が 30 % 程度になったことが報告⁽⁸⁾されており、この例から見ても計算結果にのみ誤差が含まれているとは断定できない。また波形同士で比較すると、測定と計算の差はおおむね 5% 以下である。

3. 解析モデル

図 1 にインパルス電圧測定システムの解析モデルを示す。同図(a) は IEC 規格⁽¹⁾における直角波応答測定推奨回路で、

(a) モデル A (直角波応答測定推奨回路)

(b) モデル B (裁断波雷インパルス電圧試験回路)

図 1 インパルス電圧測定システムの解析モデル

Fig. 1. Models of impulse voltage measuring system to be analyzed.

同回路の垂直導体板は線状導体で構成したメッシュにより模擬した。図 1(b) は裁断波雷インパルス電圧試験回路で、同回路の球電極は 6 角形のかご状導体で模擬した。

電圧源は立ち上がり時間 2.5 ns の直角波状電圧を発生するものを用いた。モデル A においては、この直角波電圧源を垂直導体板と水平リード線の間に挿入した。裁断波雷インパルス電圧の実試験回路において、球ギャップがスパークオーバーした後の測定システム周囲の電磁界は、直角波電圧源を球ギャップ間に置くことにより模擬できる (モデル B)。

抵抗分圧器の抵抗値は 9 kΩ とし、定格電圧 0.5 ~ 1 MV 級のを想定して、その高さを 3.3 m とした。シールド環は直径 1.48 m の円に内接する 8 角形の導体で模擬し、分圧器頂部から斜めに下ろした 4 本の導体により高さ 2.7 m のところに装着した。大地面は完全導体面を仮定した。

モデル B のインパルス高電圧発生器 (I.G.) 部分には、図 2 (a)、図 3 (a) に示す異なる 2 種類の回路⁽²⁾⁽⁹⁾を、それぞれ図 2 (b) および図 3 (b) に示すように簡略化したものを付加した。モデル B の測定システムに生じる過渡現象の

図 2 文献⁽²⁾のインパルス高電圧発生回路 (I.G.) と周波数 10 MHz におけるその等価回路

Fig. 2. Circuit of high voltage impulse generator found in ref. (2) and its equivalent circuit at 10 MHz.

図 3 文献⁽⁹⁾のインパルス高電圧発生回路 (I.G.) と周波数 10 MHz におけるその等価回路

Fig. 3. Circuit of high voltage impulse generator found in ref. (9) and its equivalent circuit at 10 MHz.

基本周波数は、接続線（約 6.6 m）を進行波が 2 往復するのに必要な時間が約 90 ns となることから、10MHz（ $\approx 1/90\text{ns}$ ）程度となる。この周波数においては、1.1 mH のインダクタンスは 70 k Ω 程度のインピーダンスに見えることになる。したがって、図 2 (a) のインダクタンスを含むブランチを無視することができ、同図 (b) の回路に簡略化することができる。一方、図 3 (a) の回路では、周波数 10 MHz において 1000 pF のキャパシタンスは 16 Ω 、3 mH のインダクタンスは 190 k Ω 、そして 0.12 μF のキャパシタンスは 0.13 Ω となるため同図 (b) の回路に簡略化される。これらは、水平接続線端部から見たインパルス高電圧発生器のインピーダンス特性を近似的に表現するためのもので、この部分からインパルス電圧が出力されるわけではない。

NEC-2 での解析に際して、導体系を長さ 0.47m $\sim$ 0.57m、半径 10 mm の円筒要素を組合せることによって模擬した。分圧器部分は、長さ 0.55 m で抵抗値 1.5 k Ω の要素を 6 つ直列に接続したもので模擬した。同様に、I.G.回路 I の 2.5 k Ω 部分および I.G.回路 II の 450 Ω 部分は、それぞれ長さ 0.55 m で抵抗値 417 Ω あるいは 75 Ω の要素 6 つで模擬した。I.G.回路 II の 100 Ω の抵抗体および 1000 pF のキャパシタについては、それぞれ長さ 0.55 m の 1 要素に割り当てた。計算は、195.3 kHz $\sim$ 400 MHz（周波数ステップ 195.3 kHz）の範囲で行った。

なお、分圧器を模擬した抵抗体の最下部の要素を流れる電流が、標準的な構成の測定系出力の実測波形と良好に一致する⁽⁷⁾ことから、本論文では、この電流波形を測定システムの応答とする。また、実際に分圧器の脚部は、大地面から若干高くなっているなど、単純化されたモデルと細部が異なるが、それが脚部の電磁界に及ぼす影響はほとんどないことが実測と計算結果の比較により明らかになっている⁽⁷⁾。

表 1 モデル A の USR パラメータ

Table 1. USR parameters for model A.

Rd [Ω]	T α [ns]	Tn [ns]	Ts [ns]	β [%]
0	14.1	7.1	288	31.0
100	19.2	19.9	113	12.1
200	24.5	26.6	95.0	0.6

表 2 モデル B の USR パラメータ (I.G.回路 I)

Table 2. USR parameters for model B including I.G. circuit I.

Rd [Ω]	T α [ns]	Tn [ns]	Ts [ns]	β [%]
0	15.8	7.6	252	46.4
100	18.9	13.7	133	30.0
200	21.6	19.6	125	18.4

表 3 モデル B の USR パラメータ (I.G.回路 II)

Table 3. USR parameters for model B including I.G. circuit II.

Rd [Ω]	T α [ns]	Tn [ns]	Ts [ns]	β [%]
0	17.0	29.1	230	18.3
100	21.2	35.4	178	1.6
200	41.4	41.4	195	0.0

4. 解析結果と考察

< 4. 1 > 直角波応答測定回路と裁断波雷インパルス電圧試験回路の USR の比較 測定システム A および B の直角波応答の計算波形を図 4 (a) $\sim$ (c) に示す。また、図 4 の直角波応答波形から求めた各モデルの USR パラメータ（部分応答時間 T α 、実験的応答時間 Tn、整定時間 Ts、オーバーシュート β ）を表 1 $\sim$ 表 3 に示す。

モデル B が I.G.回路 I (2.5 k Ω) を有する場合の USR パラメータとモデル A のそれとの差は、T α で 0 $\sim$ 3 ns、Tn

(a) モデル A

(b) モデル B (I.G.回路 I)

(c) モデル B (I.G.回路 II)

図 4 各モデルの USR の計算結果

Fig. 4. Computed unit step responses of the models illustrated in Fig. 1.

で 1 ~ 7 ns, Ts で 20 ~ 35 ns 程度となっており, 両回路の応答はそれほど異なっていない。一方, モデル B に I.G. 回路 II を付加した場合の USR とモデル A のそれとの差は, T_α で 2 ~ 17 ns, T_n で 15 ~ 20 ns, T_s で 30 ~ 100 ns 程度となっており, 両回路の応答はかなり異なったものとなる。今回の計算で対象としている時間範囲では, I.G. 回路 II は低インピーダンスで, 初期に左側のリード線に分流あるいは透過したサージは入口の 100 Ω の抵抗により効果的に吸収される。これにより, オーバシュートや振動の振幅が抑えられることがその原因と考えられる。

なお, 表 1 から表 3 により明かなように, 各モデルは波頭裁断波雷インパルス電圧測定に要求される時間パラメータを満たしていない。一般に, 時間パラメータは測定系の大きさに比例して大きくなるため, MV 級の測定システムにおいては, 規定された時間パラメータを満たすのは困難になる。このレベルの定格電圧の測定系で, 基準を満たすためには, 分圧器低圧部にインダクタンスのピーキング回路⁽¹⁰⁾を付加したり, 分圧器を油中に収めた縮小型⁽¹¹⁾にするとといった工夫が必要になる。

< 4. 2 > 供試物への接続線の影響 裁断波雷インパルス電圧の比較校正試験においては, 標準分圧器と被校正分圧器が並列に接続される。分圧器の抵抗値がリード線のサージインピーダンスに比べて十分高い場合には, 一方の分圧器からは, 他端開放のリード線が接続点につながれたものとみなすことができる。この影響を調べるため, モデル B の球電極と水平リード線との接続点に, それらに直交する長さ 3.3 m の水平リード線 (開放端) を被校正分圧器への接続線として付加した場合の USR パラメータの計算結果を表 4, 表 5 に示す。これらは表 2, 表 3 の USR パラメータとほとんど変わらないことから, 被校正分圧器へのリード線をつないだことによる影響はほとんどないことが確認される。

表 4 供試物への接続線を付加した場合の
モデル B の USR パラメータ (I.G. 回路 I)

Table 4. USR parameters for model B, to which I.G. circuit I and open-ended horizontal lead wire of 3.3 m in length are connected.

Rd [Ω]	T_α [ns]	T_n [ns]	T_s [ns]	β [%]
0	16.8	6.4	263	51.5
100	19.6	12.9	188	34.9
200	22.0	18.6	135	22.5

表 5 供試物への接続線を付加した場合の
モデル B の USR パラメータ (I.G. 回路 II)

Table 5. USR parameters for model B, to which I.G. circuit II and open-ended horizontal lead wire of 3.3 m in length are connected.

Rd [Ω]	T_α [ns]	T_n [ns]	T_s [ns]	β [%]
0	17.8	28.9	238	19.8
100	21.3	34.8	165	6.1
200	40.5	40.6	193	0.0

< 4. 3 > シールド環, 高圧リード線および球電極から放射される電磁界パルスの影響

測定システムの各部分から放射される電磁界パルスが USR に与える影響について調べるため, 図 5 の各配置におけるモデル B の USR を計算した。なお, モデル B には I.G. 回路 I と制動抵抗 $R_d = 100 \Omega$ が付加されている。図 5 (a) の配置では, 分圧器抵抗体が測定システムから絶縁されており, 同図 (b) の配置では, 水平リード線からシールド環と分圧器が切り離されている。同図 (c) では, 水平リード線が分圧器に向かう方向に対して直交するように配置されている。

以上の条件で計算した USR 波形を図 6 (a) ~ (c) に示す。図 6 の各図には, 球電極を付加した場合の計算波形の他に, 球電極を取り除き, その部分を 1 本の線状導体で置き換えた場合の計算波形を示している。

図 6 (a) の USR と同図 (b) の USR の相違は, 主としてシールド環から分圧器抵抗体へのカップリングの有無に起因したもので, シールド環の USR に与える影響が極めて大きいことが確認される。図 6 (b) と同図 (c) の相違は, 水平リード線から分圧器へのカップリングの有無によるものであるが, この影響はシールド環のそれに比べればかなり小さい。図 6 (c) は, 球電極と垂直リード線から放射された電磁界パルスによって抵抗分圧器に生じた誘導によるものである。この誘導成分は初期に急峻に立ち上がり, その部分で最大値を取る。そして, その値は図 4 に示されている USR 整定値の 25 % 程度の大きさとなっている。図 6 (a)(b) および図 4 (b)(c) の立ち上がり部分初期にも, ほぼ同じピーク値を有するパルス (図中矢印) が見られるが, これらは球電極と垂直リード線から放射された電磁界パルスの影響である。球電極を取り除いた垂直リード線だけの場合には, この誘導成分のピーク値は図 4 に示された USR 整定値の 17 % の大きさとなり, 球電極を考慮した場合に比べて小さくなる。このことは球電極の存在により, そこから初期に放射される電磁界が強くなることを示している。

シールド環が付加された測定システムにおいては, シールド環がつくる垂直方向電界が強力なため, 球電極の影響は相対的に小さくなるが, シールド環が無い測定システムにおいては球電極の有無の影響が顕著に現れる。文献⁽²⁾⁽³⁾の誘導雑音に関する検討は, このような影響が顕著となるシールド環の無い測定システムを対象に行われている。

図 7 はモデル B から球電極を取り除き, その部分を 1 本の線状導体で置き換えた回路の直角波応答波形である。USR の立ち上がり初期に見られるパルス (図中矢印) の振幅は, USR 整定値の 17 % となっている。

表 6, 表 7 は図 7 の直角波応答波形から算出した USR パラメータである。I.G. 回路 I を有するシステムでは, 球電極を外した場合 (表 6) と付加した場合 (表 2) の間には, T_α , T_n で 1 ~ 3 ns, T_s で 5 ~ 10 ns 程度の差しかない。しかし, I.G. 回路 II を有する場合には, 球電極の有無 (表 3, 表 7) により USR パラメータは大きく変化し, 特に制

(a) 配置 X (b) 配置 Y (c) 配置 Z

図 5 モデル B の解析配置

Fig. 5. Arrangements of model B for numerical analysis.

(a) 配置 X

(b) 配置 Y

(c) 配置 Z

図 6 図 5 の各配置でのモデル B の USR 計算波形 (I.G.回路 I, $R_d = 100 \Omega$ 付加, 球電極 有および無)

Fig. 6. Computed unit step responses of model B in various arrangements.

動抵抗が付加されているシステムにおいては, T_α で 8 ~ 20 ns, T_n で 8 ns, T_s で 25 ~ 50 ns 程度の差が生じている。図 4 (c) と図 7 (b) の USR 波形の相違は, 図 6 (c) に示された 2 波形の僅かな差にほぼ等しいが, この差が USR パラメータには大きく影響している。

(a) I.G.回路 I 付加

(b) I.G.回路 II 付加

図 7 モデル B から球電極を外した場合の USR の計算結果

Fig. 7. Computed unit step responses of model B, from which sphere electrodes are removed.

表 6 モデル B から球電極を取り外した場合の USR パラメータ (I.G.回路 I)

Table 6. USR parameters for model B including I.G. circuit I, from which sphere electrodes are removed.

$R_d [\Omega]$	$T_\alpha [\text{ns}]$	$T_n [\text{ns}]$	$T_s [\text{ns}]$	$\beta [\%]$
0	17.6	8.6	265	46.0
100	21.0	15.0	140	27.1
200	24.4	21.3	130	15.8

表 7 モデル B から球電極を取り外した場合の USR パラメータ (I.G.回路 II)

Table 7. USR parameters for model B including I.G. circuit II, from which sphere electrodes are removed.

$R_d [\Omega]$	$T_\alpha [\text{ns}]$	$T_n [\text{ns}]$	$T_s [\text{ns}]$	$\beta [\%]$
0	19.0	37.0	243	13.6
100	43.4	43.4	225	0.0
200	49.7	49.7	223	0.0

5. 結論

本論文では、直角波応答測定推奨回路と裁断波雷インパルス電圧試験回路の直角波応答特性を電磁界解析コード NEC-2 により解析し、両者の応答特性について比較検討した。

裁断波雷インパルス電圧試験回路の直角波応答は、I.G. 回路の内部インピーダンスに大きく依存することが明らかになった。I.G. 回路の内部インピーダンスが高い場合には、その応答特性は直角波応答測定回路のそれに近いものとなるが、I.G. のインピーダンスが低い場合には実験的応答時間が長くなるなどやや異なった応答特性を示す。

高インピーダンス I.G. が用いられる場合には、球電極の存在はその測定システムの応答にあまり影響しない。一方、低インピーダンス I.G. が用いられる場合には、球電極は測定システムの USR パラメータに大きな影響を及ぼす。特に、制動抵抗が付加されているシステムにおいては、部分応答時間で 8 ~ 20 ns、実験的応答時間で 8 ns、整定時間で 25 ~ 50 ns 程度の差が生じることが明らかになった。

謝辞 本研究を行うにあたり、ご支援およびご助言を賜った同志社大学の雨谷昭弘教授、長岡直人教授、森延孝実験講師に感謝致します。また本研究は平成 12・13 年度科学研究費補助金 奨励研究 (A) (no.12750249) の補助を受けて行われたことを記し、関係各位に感謝致します。

(平成 13 年 4 月 23 日受付, 平成 13 年 6 月 12 日再受付)

文 献

- (1) IEC Pub. 60060-2, High voltage test techniques, Part 2: Measuring systems (1994)
- (2) 高橋・錦織・小島・村野・河野: 「雷インパルス電圧測定回路に生ずる誘導雑音の性質について」, 電学論 B, vol.119-B, no.1, pp.47-53 (1999)
- (3) 錦織・小島・河野: 「球ギャップと分圧器間の結合静電容量がインパルス電圧測定に及ぼす影響について」, 電学論 B, vol.120-B, no.4, pp.576-580 (2000)
- (4) G. J. Burke and A. J. Poggio: "Numerical electromagnetic code (NEC) — method of moments," Technical Document 116, Naval Ocean Systems Center, San Diego (1980)
- (5) R. F. Harrington: "Field computation by moment methods," Macmillan Pub. Co., New York (1968)
- (6) 馬場・石井・金辻: 「数値電磁界解析手法による鉄塔インピーダンスの検討」, 電学論 B, vol.116-B, no.7, pp.873-878 (1996)
- (7) 石井・廖: 「インパルス電圧測定系の電磁界解析による特性評価」, 電学論 B, vol.119-B, no.5, pp.620-625 (1999)
- (8) 石井・村瀬・西村: 「MV 級雷インパルス電圧測定系の日本国内試験所間比較試験」, 電学論 B, vol.118-B, no.11, pp.1249-1255 (1998)
- (9) 本山: 「雷サージ解析のための新フラッシュオーバーモデルの開発」, 電学論 B, vol.115-B, no.7, pp.839-846 (1995)
- (10) 原田・脇本・佐伯・里: 「国家標準級インパルス電圧測定用基準分圧器」, 平成 11 年電気学会全国大会, no.576 (1999)
- (11) 山中・原田・佐伯・脇本・張替: 「油入形雷インパルス用分圧器の開発」, 平成 11 年電気学会全国大会, no.575 (1999)

馬場 吉弘

(正員) 1971 年 2 月 24 日生まれ。1994 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。1996 年 3 月同大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。1999 年 3 月同専攻博士課程修了。工学博士。同年 4 月同志社大学工学部助手。2001 年 4 月同専任講師、現在に至る。電磁界インパルスの研究に従事。1999 年電気学会論文賞。IEEE 准会員, IEEE 会員。

石井 勝

(正員) 1949 年 3 月 11 日生まれ。1971 年 6 月東京大学工学部電気工学科卒業。1973 年 3 月同大学大学院工学系研究科修士課程修了。1976 年 3 月同博士課程修了。工学博士。同年 4 月東京大学助教授、生産技術研究所勤務。1992 年同教授、現在に至る。主として系統絶縁、自然雷、高電圧現象の測定に関する研究に従事。1998 年電気学会進歩賞。1999 年同論文賞。電気学会高電圧技術委員会委員長。IEEE Senior Member. AGU, CIGRE 会員。