

# 负荷对冲击电压发生器输出能力的影响研究

王浩洋, 孙伟, 傅正财, 陈坚

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

**摘要:** 冲击电压试验中, GIS 和高压电缆试品的负载电容可达 3 000 pF 至 10 000 pF。为满足这种大负荷试品的冲击试验输出波形要求, 对设计中未考虑大电容试品的常规发生器, 需要通过改造提高其输出能力。以 15 级的 3 000 kV 冲击电压发生器为例, 应用 ATP 暂态电磁仿真软件建立发生器模型, 对在发生器输出端串入高压阻容元件这种改进电路方法进行仿真。定量分析了发生器负载、总电感和等效波头电阻对输出波形的影响, 以及输出效率随负载的变化。大负载情况下应用这种改进措施后, 发生器的负载能力可从 4 000 pF 提高到 11 000 pF, 波形过冲可控制在 10% 以内。对于高压引线的长度限制也给出了建议。

**关键词:** 冲击电压发生器; 负载影响; 波形过冲; 波形调整

中图分类号: TM832

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)05-0092-04

## Investigation of Load Impact on Output Capability of Impulse Voltage Generators

WANG Hao-yang, SUN Wei, FU Zheng-cai, CHEN Jian

(Dept. of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The entrance capacitances of GIS and HV cable can reach 3 000 pF to 10 000 pF in impulse voltage test. It is necessary to improve the output capability of the impulse voltage generators (IVG) which were designed without consideration of large capacitance loads. In this paper, by applying the ATP simulation method, a 15-stage 3 000 kV IVG with a high-voltage RC-filter at the output terminal for improving output capability is analyzed. The waveform influencing factors including load, total inductance, and equivalent resistance, and the output efficiency are investigated. It is shown that the above improving method can enhance the IVG output capability from 4 000 pF to 11 000 pF, with the waveform overshoot being controlled within 10%. In addition, the length limit of HV connecting wire is suggested.

**Key words:** impulse voltage generator; load impact; waveform overshoot; waveform adjustment

## 0 引言

电力系统的高压电气设备在出厂试验中, 甚至在安装现场都必须进行冲击电压试验。根据我国试验标准 GB/T 16927.1-1997 的要求<sup>[1]</sup>, 波前时间  $(1.2 \pm 30\%) \mu\text{s}$ 、半波峰时间  $(50 \pm 20\%) \mu\text{s}$  的雷电冲击全波, 相对过冲幅值不得超过 5%。新版 IEC 60060-1 Ed.3.0 标准的要求将相对过冲幅值放宽到不超过 10%<sup>[2]</sup>。GB/T 16927.1 的修订草案中也拟与 IEC 标准保持一致。

随着 GIS 和高压电缆的推广和普及应用, 这种大电容 (可达 3 000~10 000 pF) 负载性质的试品越来越多。对于一些已有的在设计制造时没有充分考虑到这种大电容负载的冲击电压发生器, 需要通过发生

器改造或采取必要的技术措施来提高输出能力, 以满足对试验波形要求, 继续发挥试验设备的作用。

为提高冲击电压发生器的负荷能力, 国内外已做了很多工作, 现有的措施主要有两种。一是利用电阻的无感绕法和更紧凑的结构等方法以减小回路电感, 提高负载能力<sup>[3]</sup>。但这种方法因电感不可能无限减少而存在固有的局限性。二是改进回路法。文 [4, 5] 提出了两种相似的方法, 即在冲击电压发生器输出端串联一个阻容并联的低通滤波电路, 并简述了其有效性。但目前尚未见对此方法的电路元件取值的具体分析、这种改进电路能适用的负载范围以及在各种特殊情况下如何进行调整的讨论。笔者采用仿真方法分析改进电路的参数选取以及改进后能满足的负载范围, 并讨论了其他因素的影响。

收稿日期: 2009-03-26; 修回日期: 2009-05-18

作者简介: 王浩洋 (1983), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压试验技术与试验设备开发。

### 1 冲击电压发生器电容负载回路分析

冲击电压发生器的简化放电等值回路见图1。图1中,  $C_1$  为主电容,  $G$  为点火间隙,  $R_{11}$  为保护电阻,  $R_2$  为等效波尾电阻,  $R_{12}$  为等效波头电阻,  $C_2$  为负载电容,  $U_1$  为发生器充电电压,  $U_2$  为试品电压。

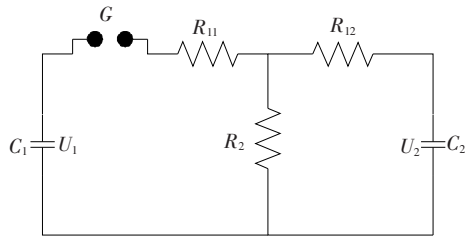


图1 冲击电压发生器的简化放电等值回路

此放电回路的微分方程为

$$u_1 = u_2 + R_{12}C_2 \frac{du_2}{dt} + (-C_1 \frac{du_1}{dt})R_{11} - C_1 \frac{du_1}{dt} = C_2 \frac{du_2}{dt} + R_2(u_2 + R_{12}C_2 \frac{du_2}{dt}) \quad (1)$$

解此微分方程, 可得输出电压  $u_2$  的时域解<sup>[6]</sup>

$$u_2(t) = KU_0(e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \quad (2)$$

式(2)中,  $U_0$  为电容器  $C_1$  的充电电压,  $K$  为回路系数,

$$K = \frac{R_2}{C_2(R_{11}R_2 + R_{11}R_{12} + R_{12}R_2)} \cdot \frac{T_1T_2}{(T_1 - T_2)} = \frac{C_1R_2}{T_1 - T_2} \quad (3)$$

式(3)中,  $T_1$  和  $T_2$  为波尾和波头时间常数。

在波尾时间范围内,  $e^{-t/T_2} \approx 0$ , 可以认为

$$u_2(t) \approx KU_0(e^{-t/T_1}) \quad (4)$$

可得波尾时间

$$t_f = T_1 \ln 2 \approx 0.7T_1 \approx 0.7R(C_1 + C_2) \quad (5)$$

考虑到电感作用后波头阶段的放电等效回路见图2<sup>[7]</sup>。图2中,  $L$  为发生器总电感,  $R$  是发生器等效波头电阻。

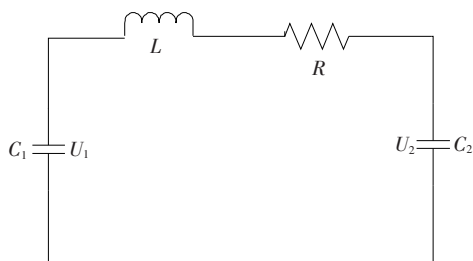


图2 波头阶段的放电等效回路

由图2可算出波头时间  $t_f$  为

$$t_f \approx 2.33T_2 \approx 2.33RC_2 \quad (6)$$

由此可见, 调整出符合标准的雷电波可以通过调整波头和波尾电阻的配置来实现。而为获得非振

荡波, 应使

$$R \geq 2\sqrt{\frac{L}{\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}}} \quad (7)$$

式(7)中,  $L$  是回路电感, 包含电容的剩余电感、电阻的电感、引线的电感以及回路的结构电感等。在主电容和负载电容一定的情况下,  $R$  不可无限减少。对于设计制造时未特别考虑大电容试品的冲击电压发生器, 在大电容负载情况下, 试验输出波形可能达不到标准要求。

### 2 仿真分析

以常见的15级设计的3000 kV冲击电压发生器为例, 每级等效电感  $5.5 \mu\text{H}$ , 级电容  $1 \mu\text{F}/200 \text{ kV}$ , 弱阻尼电容分压器高压臂电容估计为  $300 \text{ pF}$ <sup>[7,8]</sup>, 高压引线通常约  $15 \text{ m}$ , 早期设计时负载电容通常考虑到约  $3000 \text{ pF}$ 。额定电压  $500 \text{ kV}$  的GIS雷电冲击全波试验峰值电压要求为  $1675 \text{ kV}$ 。对此发生器用ATP电磁暂态仿真软件建立简化电路模型, 见图3。图3中  $L$  为发生器总电感,  $r$  为点火间隙弧道及回路引线电阻, 约  $10 \Omega$ ,  $R_1$  是等效波头电阻,  $C_0$  是弱阻尼电容分压器高压臂电容,  $R_0$  为分压器阻尼电阻,  $L_1$  是高压引线电感(包含回线),  $C_1$  是主电容,  $C_2$  是负载电容,  $R_2$  是等效波尾电阻。

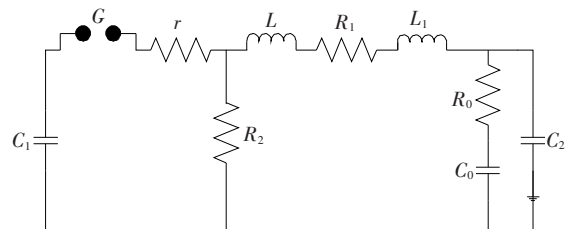


图3 ATP仿真模型

用此电路图进行计算仿真发现, 按新的标准要求来考虑, 负载电容在  $1000 \text{ pF}$  到  $4000 \text{ pF}$  时, 可以输出符合标准要求的波形。在  $4500 \text{ pF}$  负载下, 输出波形见图4。

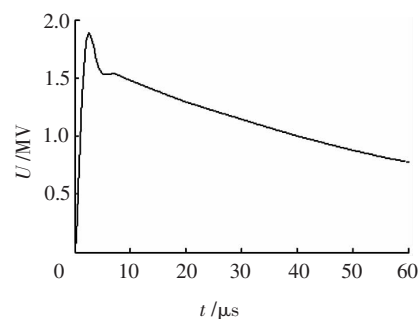


图4 负载电容为  $4500 \text{ pF}$  时的输出波形

波头部分有明显的过冲,约为 11%。随着负载进一步增大,过冲将更加严重。图 5 反映了在 3 000 pF 到 7 500 pF 负载范围内,相对过冲随负载的变化。

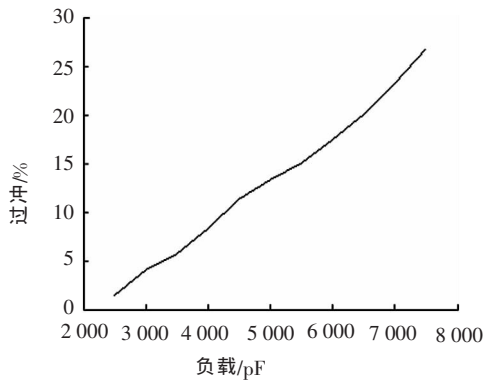


图 5 相对过冲随负载的变化

由此可见,对于没有考虑大负载的冲击电压发生器,如果负载电容超过约 3 000 pF,输出波形要求将难以满足现行试验标准的要求<sup>[1]</sup>。即使新的标准要求对相对过冲放宽<sup>[2]</sup>,在负载大于 4 000 pF 时,也难以满足波形要求。已有研究表明,采取改进电路方法,加入一个阻容滤波电路,可有效减少相对过冲幅值,见图 6。图 6 中, $R_3=130 \Omega, L_3=3 \mu\text{H}, C_3=600 \text{ pF}$ 。

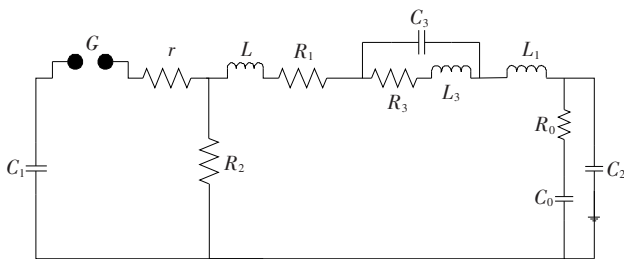


图 6 改进电路的 ATP 仿真模型示意图

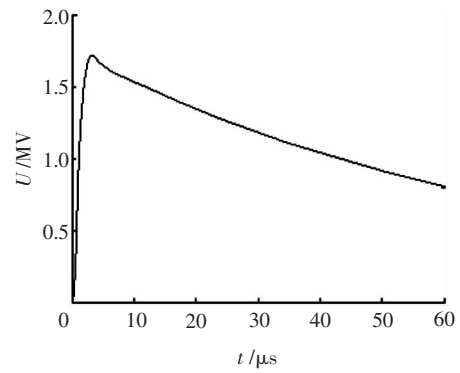
用改进电路的冲击电压发生器对负载电容为 5 000、8 000、11 000 pF 的试品进行试验,仿真输出波形见图 7。从图 7 可看出,随着负载增加,波头峰值的过冲越来越明显。具体的波形参数见表 1。

波形过冲随负载变化的情况见图 8。波头部分在试品电容达到 11 000 pF 时,过冲只有 9.78%,仍能满足新标准不超过 10%的要求。

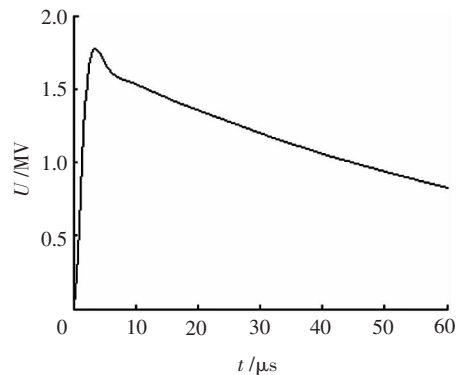
由此可见,在改进电路下,波形有明显的改善。仿真分析表明,这种改进电路后的冲击电压发生器可以满足对负载电容达 11 000 pF 的负载进行雷电冲击试验的要求,其过冲可控制在标准要求的 10%范围内。

### 3 讨论和分析

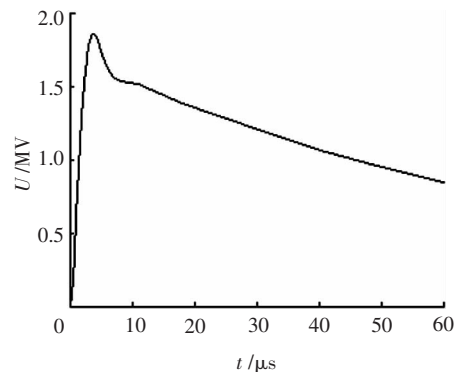
(1) 以上的计算中,图 6 中的  $C_3$  均按 600 pF 取



(a) 负载为 5 000 pF



(b) 负载为 8 000 pF



(c) 负载为 11 000 pF

图 7 不同负载大电容下时的电压输出波形

表 1 大电容负载仿真结果

负载/pF	波头时间/μs	波尾时间/μs	效率/%	过冲/%
5000	1.51	56.80	89.57	2.38
8000	1.56	57.59	86.34	5.81
11000	1.57	58.90	83.75	9.78

值。按照实际的耐压、安装和生产要求, $C_3$  的取值不宜超过 1 000 pF。根据计算模拟发现,若想使负载能力达到 10 000 pF, $C_3$  所能取的最小值约 600 pF。而  $R_3$  会影响波头时间,在  $C_3$  为 600 pF 时,若  $R_3$  取值小于 130  $\Omega$ ,过冲会增大;在取值大于 130  $\Omega$  时,波头时间超过了标准限值,不能满足波形要求。所以  $R_3$  取值 130  $\Omega$ 。而  $L_3$  为电阻  $R_3$  的剩余电感,约为 3  $\mu\text{H}$ 。

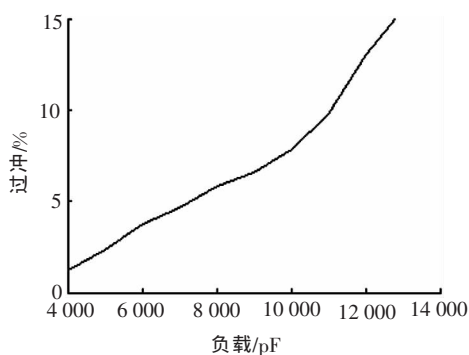


图8 改进电路后过冲随负载的变化

(2) 计算发现,改进电路后,冲击电压发生器的输出效率随负载电容增大而降低。在 11 000 pF 时效率已经接近 80%(见表 1)。

(3)  $L_{11}$  为发生器接至试品和分压器之间的高压引线电感,引线较长时,其电感不可忽略。其值按照实际经验约取  $1 \mu\text{H}/\text{m}^{[9]}$ 。以 15 m 引线为例,考虑到来回引线,  $L_{11}=30 \mu\text{H}$ 。当引线长度增加时,过冲也会更加明显。负载一定时,过冲随引线长度的变化见图 9。

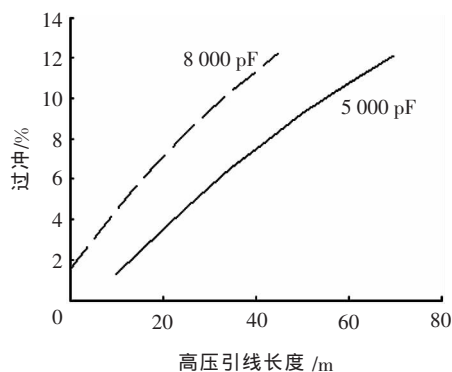


图9 负载一定时过冲随引线长度的变化

引线长度一定时,过冲随负载电容的变化见图 10。由此可见,引线长度增加引起的电感值增大对于输出波形的过冲有着较大的影响。在考虑冲击电压发生器的输出能力时,必须将引线长度考虑在内。

#### 4 结论

笔者按新试验标准的波形要求,通过仿真计算,

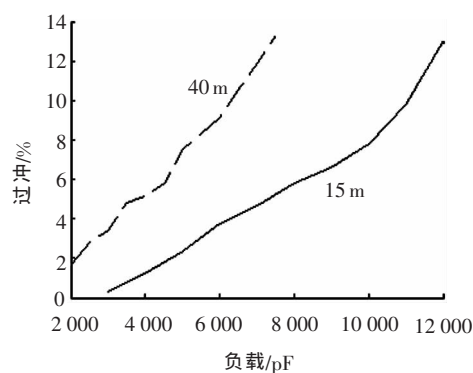


图10 引线长度一定时过冲随负载电容的变化

分析负载对冲击电压发生器输出能力的影响。采取改进回路方法后,对现有的按未考虑大电容试品设计的冲击电压发生器,可将其负载能力从约 4 000 pF 提高到 11 000 pF。但发生器的输出效率会随着负载电容的增大而降低。高压引线的加长会增加相对过冲幅值,在考虑负载能力时,应注意对高压引线长度的限制。

#### 参考文献:

- [1] GB/T 16927.1-1997.高电压试验技术 第一部分:一般定义及试验要求[S].
- [2] IEC 60060-1 Ed. 3.0.High-voltage Test Techniques.Part 1: General Definitions and Test Requirements[S].
- [3] 赵有斌,晁学贤.提高冲击电压发生器负荷能力的措施[J].高压电器,1997(1):17-19.
- [4] 赵有斌,李政,王建生,等.冲击电压发生器雷电波的负载特性及其波形分析和改善[J].高压电器,1999(1):19-23.
- [5] 臧绪运,赵刚,孙伟,等.3 600 kV 冲击电压发生器大负载输出特性[J].高电压技术,2002(8):14-16.
- [6] 华中工学院,上海交通大学.高电压试验技术[M].北京:水利电力出版社,1982.
- [7] 张仁豫,陈昌渔,王昌长.高电压试验技术[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [8] 朱士全.大型冲击电压发生器及其试验回路电感的估算与实例[J].变压器,1994(3):27-29.
- [9] 朱士全.冲击试验回路杂散电容的估算与实测[J].变压器,1994(10):21-24.

(上接第 91 页)

- [5] 张海峰,庞其昌,李洪,等.基于 DSP 的紫外可见双光谱图像融合系统[J].哈尔滨工业大学学报,2006(12):2 206-2 207.
- [6] ARBUSOV R S,OVSYANNIKOV A G.UV-Instpection of HV Equipment [C]//Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering,Beijing,Tsinghua University,2005:25-29.
- [7] 程养春,李成榕,沈小军,等.几种合成绝缘子带电检测方法的比较[J].高电压技术,2004,30(6):35-37.
- [8] 寇晓适,陈守聚,夏中原.紫外放电检测在电力系统设备状态检修的应用[C]//输电线路紫外检测技术交流会,武汉,2007(9):58-65.
- [9] 刘云鹏,马国明,律方成.基于紫外成像技术的电气设备放电故障定位[J].高电压技术,2007,33(5):79-82.
- [10] 江华.俄罗斯紫外探伤仪分析及在我国的应用[C]//输电线路紫外检测技术交流会,武汉,2007(9):175-202.