[调波装置]

调波装置在高压绝缘型式试验中的应用

文/魏长宇[1] 王 坤[2] 杨 左[1] 曲在文[1] 刘世磊[1] 魏俊梅[2]
1. 机械工业高压电器设备质量检测中心；2. 特变电工云集高压开关有限公司

雷电冲击耐受电压试验是高压电气设备绝缘型式试验的重要项目，其电压波形在国家标准中有严格规定。在高压绝缘实验室，雷电冲击电压波由多级冲击电压发生器产生；当试品电容较大时，极易引起电压波形的畸变。应用电磁暂态程序EMTP对不同电容试品的雷电冲击耐受电压试验进行了数值仿真，结果表明：试品电容越大，雷电冲击电压波形畸变越大。在试验回路中接入阻容性质的调波装置，可以有效改善雷电冲击电压波形。对1 100 kV的SF_6断路器雷电冲击耐受电压试验回路进行了数值仿真，优化确定了调波装置等相关试验设备参数，使其雷电冲击电压波形接近标准波形。

高压电气设备是保证电力系统安全可靠运行的关键设备。绝缘性能是高压电气设备的基本性能。绝缘型式试验是验证高压电气设备绝缘性能的重要试验。高压电气设备绝缘型式试验包括短时工频耐受电压、操作冲击耐受电压及雷电冲击耐受电压等试验项目。高压电气设备的绝缘水平通常由其雷电冲击耐受电压值表征。

为了对高压电气设备的雷电冲击耐受能力进行规范的评价和验证，GB/T 16927.1—2011《高电压试验技术》对雷电冲击电压波形（幅值、时间等参数）进行了严格的规定。在高压绝缘实验室，雷电冲击电压波由多级冲击电压发生器产生，具体产生的电压波形与各级的充电电容、波前和波尾电阻及试品电容等参数密切有关。当试品电容较大时，很容易引起电压波形的畸变，且很难单纯通过调整波前电阻和波尾电阻而获得标准的雷电冲击电压波。

通过研究，在雷电冲击电压发生器和试品之间串入由电容和电阻并联组成的调波装置，可有效改善被畸变的电压波形。本文应用电磁暂态程序EMTP对不同等效电容试品的雷电冲击耐受电压试验进行了数值仿真，比较了试品电容对电压波形的影响；以新东北电气的1 100 kV特高压断路器试验极为计算模型，对采用调波装置和不采用调波装置时的雷电冲击耐受电压试验进行了仿真计算，仿真结果为具体试验提供了理论依据，减少了试验过程中的调整次数。

标准雷电冲击电压波形

GB/T 16927.1—2011《高电压试验技术》标准中对高压电气设备的雷电冲击耐受电压波形作了明确规定，标准雷电冲击波形如图1所示。

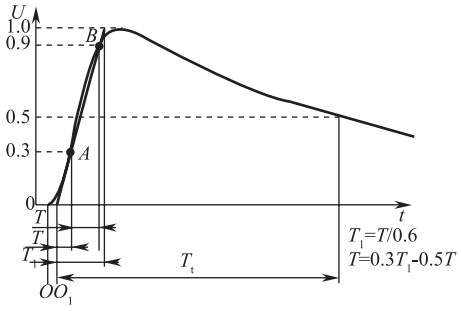


图1 标准雷电冲击波形

具体时间参数要求为：

1）波前时间T_1为1.2 μs，允许偏差±30%。

2）半波峰时间T_2为50 μs，允许偏差±20%。

对某些试验回路，在冲击的峰值处可能会有振荡或过冲，如果振荡频率≥0.5 MHz或过冲的持续时间≤1 μs，应做平均曲线，视平均曲线的峰值为试验电压峰值。

多级冲击电压发生器原理及等效回路

多级冲击电压发生器结构外形如图2所示，每级由充电电容、波前电阻、波尾电阻和放电球隙等主要元件组成。

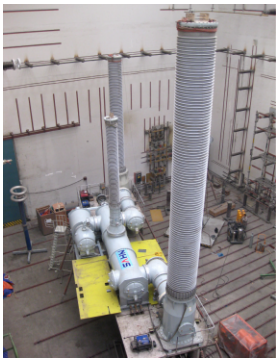


图2　多级冲击电压发生器结构外形

多级冲击电压发生器的等效回路如图3所示。在进行雷电冲击耐受电压试验时，先给各级充电电容充电；当第一级电容上的电压超过第一级点火球隙能够耐受的电压时，第一级上的电容通过波前电阻和波尾电阻放电，然后电压累积到第二级，致使第二级中的球隙放电；以此类推，直到设定的最后一级中的球隙放电，从而将产生的冲击电压波施加到试品上。

图3　多级冲击电压发生器等效回路

试品电容对雷电冲击电压波形的影响研究

高压电气设备的雷电冲击耐受电压试验回路如图4所示。

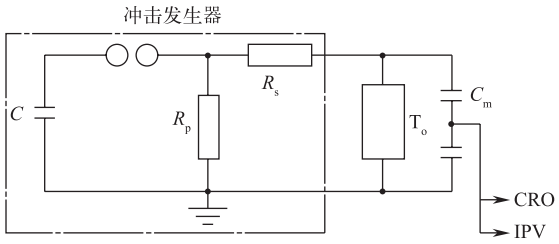


图4　雷电冲击耐受电压试验回路

五种试验回路参数值见表1，对应试品电容分别为1 000 pF、2 000 pF、3 000 pF及不同的波头电阻和波尾电阻。

表1　五种试验回路参数值

试品电容/pF	波尾电阻/Ω	波头电阻/Ω	波前时间/半波峰时间/μs	备注
1 000	837	350	1.1/50.23	试验回路1
2 000	837	350	2.1/52.31	试验回路2
	837	150	1.25/51.25	试验回路3
3 000	837	350	3.2/53.49	试验回路4
	837	120	1.35/52.07	试验回路5

应用电磁暂态程序EMTP对表1中五种试验回路进行仿真，其仿真电路如图5所示。不同仿真回路雷电冲击电压波形如图6所示，其中图6b是图6a的局部放大图，不同试验回路的波前时间和半波峰时间见表1。

由图6可知，对应试验回路1，当试品电容为1 000 pF，波尾电阻为837 Ω，波头电阻为350 Ω时，加在试品上的雷电冲击电压波形（蓝色曲线）波前时间为1.1 μs，满足GB/T 16927.1—2011要求。而对应试验回路2和试验回路4，当试品电容分别为2 000 pF和3 000 pF时，其波前时间分别为2.1 μs和3.2 μs，不满足GB/T 16927.1—2011《高电压试验技术》中关于波前时间的要求。若为了缩短波前时间而减小波头电阻（对应试验回路3和试验回路5），峰值电压附近均出现了一定程度的振荡和过冲，即发生了畸变，不满足GB/T 16927.1—2011《高电压试验技术》要求。

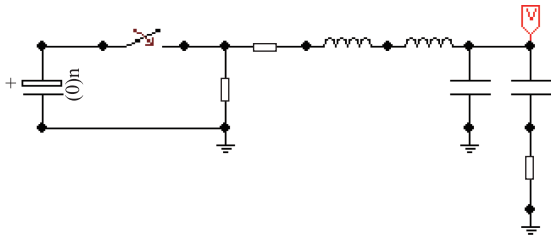
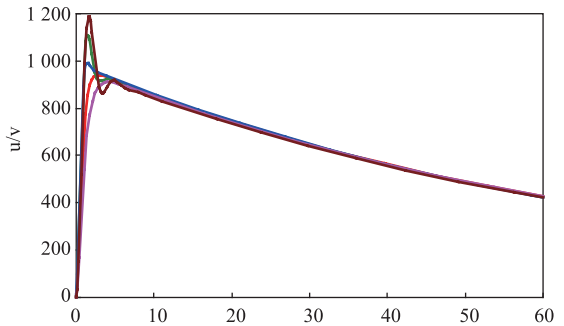
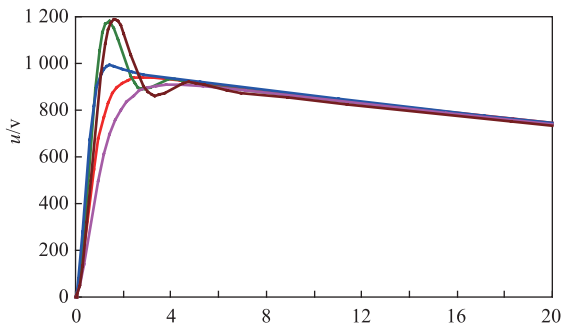


图5　雷电冲击耐受电压试验仿真回路



(a)



(b)

图6　不同仿真回路雷电冲击电压波形

蓝色-试验回路1　红色-试验回路2
绿色-试验回路3　粉色-试验回路4
褐色-试验回路5

1 100 kV断路器雷电冲击耐受电压试验研究

1. 1 100 kV断路器绝缘型式试验样机布置

1 100 kV断路器是保证中国特高压电网建设的重要设备，1 100 kV断路器较高的绝缘水平和较大的等效电容，对高压绝缘实验室提出了较高的要求和挑战。机械工业高压电器设备质量检测中心（简称为质量检测中心）按照GB/Z 24838—2009《1 100 kV高压交流断路器技术规范》和GB/T 16927.1—2011《高电压试验技术》对新东北电气研制的1 100 kV SF_6断路器进行了整套绝缘型式试验验证。

质量检测中心特高压绝缘实验室的冲击电压发生器额定参数为4 800 kV/720 kJ。新东北电气研制的1 100 kV断路器额定雷电冲击耐受电压为2 400 kV，其绝缘试验极布置形态如图7所示，当断路器处于合闸位置时，该绝缘试验极的等效电容约为2 500 pF。

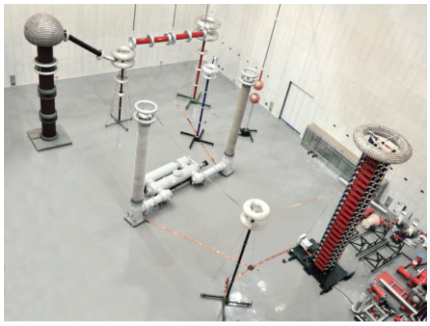


图7　1 100 kV断路器绝缘型式试验样机布置

2. 调波装置

调波装置的等效电路如图8所示。

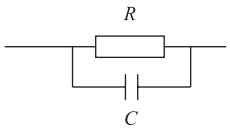


图8　调波装置等效电路

调波装置的工作原理是将不同电阻和不同电容串并联；将其接入雷电冲击耐受电压试验回路，通过调整其电阻值或电容值，达到改善雷电冲击电压波形的目的。

3. 1 100 kV断路器雷电冲击电压试验仿真

应用电磁暂态程序EMTP对1 100 kV断路器合闸位置的雷电冲击耐受电压试验进行数值仿真，考虑不带和带有调波装置，并通过数值仿真优化确定调波装置的电容电阻参数。图9给出了仿真结果，其中9b是9a的局部放大图。

由图9可知，当不带有调波装置时，由于1 100 kV断路器等效电容较大，其入端的电压波形有明显的振荡和过冲现象；而当带有调波装置时，电压波形的振荡和过冲明显减弱，特别是优化确定调波装置的电容为1 000 pF，电阻为120 Ω后，其雷电冲击电压波形波前时间为1.33 μs，半波峰时间为50.45 μs，无振荡和过冲现象，非常接近标准雷电波形，满足国家相关标准要求。

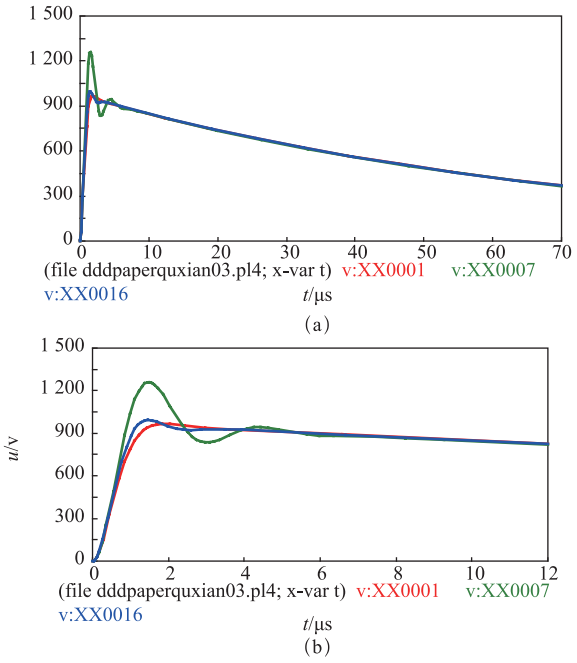


图9 1 100 kV断路器雷电冲击耐受电压仿真结果

绿色-不带调波装置 红色-优化确定的调波参数
蓝色-优化过程中的一种调波参数

4. 1 100 kV断路器雷电冲击电压试验验证

根据本文仿真优化得到的相关参数，确定了1 100 kV断路器雷电冲击耐受电压试验回路相关设备参数，得到的实际试验电压波形如图10所示，该电压波形完全满足国家相关标准要求。

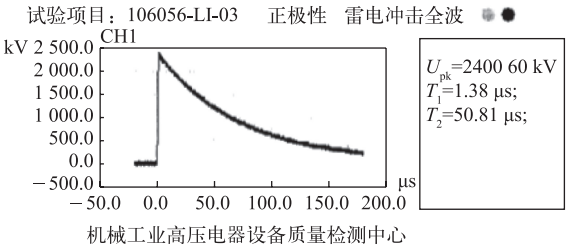


图10 1 100 kV断路器雷电冲击耐受电压波形

结束语

雷电冲击耐受电压试验是验证高压电气设备绝缘可靠性的重要绝缘型式试验项目，雷电冲击电压波形畸变是绝缘实验室对高压电气设备进行绝缘试验时经常遇到的问题。本文应用电磁暂态程序EMTP对高压电气设备雷电冲击耐受电压试验的相关研究表明：

1）试品电容大小是影响雷电冲击电压波形的重要参数，试品电容越大，波形畸变越严重。

2）当试品电容较大时，在试验回路中串入一个原理上由电容和电阻串并联形成的调波装置，可有效改善雷电冲击电压波形的畸变程度。

3）对1 100 kV SF_6断路器雷电冲击耐受电压试验的数值仿真优化为具体试验提供了理论依据，减少了试验过程中的调整次数。EA

参考文献

[1] 高电压试验技术：GB/T 16927.1—2011[S].
[2] 特高压断路器技术规范，GB/Z 24838—2009[S].
[3] 王昱婷，郑馨怡，马斌．110 kV断路器控制回路存在问题分析及改造[J]．电气应用，2021，40(11)：50-55.
[4] 石峰，王淼，叶德武，等．一起分闸掣子缺陷引起的断路器合后即分故障分析[J]．电气应用，2020，39(10)：89-94.
[5] 冯迎春，杨晓滨，任众楷．基于故障录波的交流断路器燃弧故障检测方法有效性评估[J]．电气应用，2021，40(7)：93-97.
[6] 杨光．真空断路器动热稳定试验分析及电动斥力仿真计算[J]．电气应用，2020，39(5)：44-47.