

基于正态分布的绝缘子（串）与并联间隙雷电冲击绝缘配合方法研究

在绝缘子（串）旁加装并联的保护间隙是“疏导式”防雷保护的典型措施，而确定保护间隙的间隙距离是其实际应用的关键，采用基于正态分布的绝缘子（串）与并联保护间隙的雷电冲击绝缘配合方法，以准确确定保护间隙距离。该方法用正态概率分布模型对试验数据进行处理，得到对应放电概率的雷电冲击放电电压，按照绝缘子（串）耐受且并联间隙击穿的概率达到99.85%的标准来设计保护间隙的距离。应用该方法确定了PS15/500支柱式绝缘子并联的可调式保护间隙的间隙距离，证明了该方法具有准确、实用和易操作的特点。

魏 明 周 凯 宋雷鸣 于惠慧/国网秦皇岛供电公司
杨 鑫/电力系统安全运行与控制湖南省高校重点实验室（长沙理工大学）

架空电力线路采取的防雷措施可分为堵塞式和疏导式两类^[1-4]。随着电网架构的加强、继电保护和重合闸装置的普遍应用，疏导式防雷保护已成为堵塞式防雷措施的有力补充。加装并联保护间隙是疏导式防雷保护的典型措施，其允许线路具有一定的雷击跳闸率，雷击引起线路绝缘闪络后引导工频续流飘离绝缘子（串）燃烧。这种措施虽然有雷击闪络，但有效保护了绝缘子等设备，提高了重合闸成功的概率^[5]。

绝缘子（串）并联保护间隙在使用前要经过雷电冲击放电试验、热稳定试验和工频电弧试验等检测，以确保可以起到防雷保护的目的^[6-9]。但在实际使用中，最重要的就是测量绝缘子（串）和保护间隙的雷电冲击放电电压，并使其达到最佳的绝缘配合，从而确定并联保护间隙的间隙距离。

由于放电电压具有分散性，工程上通常采用50%冲击放电电压来衡量间隙的雷击闪络特性。国标GB/T16927.1—1997规定，可采用升降法进行30次有效试验来确定50%雷电冲击放电电压^[10]。然而仅通过试验得出绝缘子（串）和保护间隙的50%雷电冲击放电电压，仍不足以确定两者之间的绝缘配合，还需测量得出绝缘子（串）和保护间隙的伏秒特性曲线，以确定其绝缘配合是否满足要求^[11]。文献[12-13]分别在研究10 kV、35 kV和220 kV架空线路防雷用保护间隙时，通过雷电冲击试验测量了绝缘子（串）和保护间隙的50%雷电冲击放电电压和伏秒特性，从而得出了合适的间隙距离。

通过绝缘子（串）和保护间隙的雷电放电伏秒特性曲线，可准确反映能否在较大的击穿概率内使雷电流通过保护间隙泄流，而非经绝缘子（串）闪络。但绘制绝缘子（串）和保护间隙的伏秒特性曲线是一项很复杂的工作，且每个间隙的伏秒特性曲线应具有一个上包线 and 下包线^[14]，绘制完整的伏秒特性曲线将更加困难。根据间隙击穿电压数据的概率分布特征，来确定绝缘子（串）和保护间隙之间的绝缘配合是一种相对简单且实用的方法。

国标GB/T 16927.1—1997对于破坏性放电试验，推荐采用正态分布和二重指数分布来进行数据分析。但对工程用电介质的击穿场强，一般遵从正态分布^[15]。因而，本文提出绝缘子（串）及其保护



魏 明/工程师

关键词/Keywords

并联间隙 ·
间隙距离 ·
绝缘配合 ·
正态分布 ·

湖南省自然科学基金青年基金项目（2015JJ3009）。

间隙的多次放电电压数据按照正态概率分布的方法进行处理,按照绝缘子(串)耐受且并联间隙击穿的概率达到99.85%的标准来设计绝缘配合,从而准确、简便地设计出并联保护间隙的间隙距离。为了方便多次重复的试验数据,用进行正态概率分布的方法进行处理,设计了一套测量雷电冲击放电电压的试验方法。

基于正态分布的绝缘子(串)与并联保护间隙雷电冲击绝缘配合方法

1. 正态概率分布

正态分布(Normal Distribution)又名高斯分布(Gaussian Distribution),是一个在数学、物理和工程等领域都非常重要的概率分布,在统计学的许多方面有着重大的影响力。对绝缘子闪络和间隙击穿的雷电放电电压的统计规律即符合正态分布^[17]。

正态分布概率密度函数为

$$f(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(U-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中, U 为随机变量,该处指闪络电压,kV; μ 为遵从正态分布的随机变量的均值; σ 为标准偏差。

对多次击穿(闪络)的试验数据按照正态概率分布的方法进行处理,用Matlab软件进行计算,可方便地得到任意击穿(闪络)概率的放电电压值。

2. 绝缘子(串)与并联保护间隙的雷电冲击放电试验方法

为了能够准确、方便地用正态概率分布的方法对绝缘子(串)及其并联保护间隙雷电冲击放电电压数据进行处理,设计了如下试验方法。

在各个设定的间隙距离下(或对各种绝缘子(串)),试验电压由低向高施加,测量其闪络(击穿)电压。即开始施加一个较低的电压,如果没有发生闪络(击穿),则增加5 kV电压继续进行测量,直到发生闪络(击穿)为止,并记录雷电冲击闪络(击穿)电压 U_i 。按此步骤,在每种类型的间隙下,重复进行20次,得到一组试验数据。

绝缘子(串)耐受且并联间隙击穿的概率应达到99.85%,即绝缘配合的原则要求绝缘子(串)0.1%闪络概率的雷电冲击放电电压 $U_{i0.1\%}$ 大于并联保护间隙99.9%闪络概率的雷电冲击放电电压 $U_{g99.9\%}$ 。

用正态概率分布的方法对绝缘子(串)雷电冲击闪络电压进行处理,得到50%闪络概率的雷电冲击放电电压 $U_{i50\%}$,0.1%闪络概率的雷电冲击放电电压 $U_{i0.1\%}$,各个间隙距离下,绝缘子加保护间隙后保护间隙50%闪络概率的雷电冲击放电电压 $U_{g50\%}$ 和99.9%闪络概率的雷电冲击放电电压 $U_{g99.9\%}$ 。

首先根据 $U_{i50\%} > U_{g50\%}$ 的原则,选择若干间隙距离;继而根据 $U_{i0.1\%} > U_{g99.9\%}$ 的绝缘配合原则,选择最佳的保护间隙距离。

实例应用

选择10 kV架空配电线路用PS15/500支柱式绝缘子及其并联可调式保护间隙作为试验对象,系统研究保护间隙的最佳距离,完善其绝缘配合。PS15/500支柱式绝缘子与可调式保护间隙并联后的实物图如图1所示。



图1 PS15/500支柱式绝缘子与可调式保护间隙

1. 整体试验装置和试验方法

对PS15/500支柱式绝缘子及其并联的可调式保护间隙进行雷电冲击试验,整体试验装置如图2所示。

图2中,冲击电压发生器提供的波前时间 T_1 、半波峰值时间 T_2 分别为1.2 μ s和50 μ s(误差分别在30%和20%以内),峰值范围为30~1 200 kV的雷电

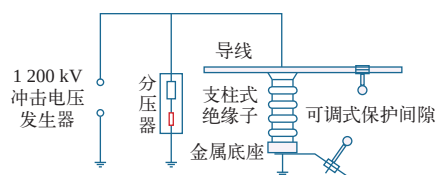
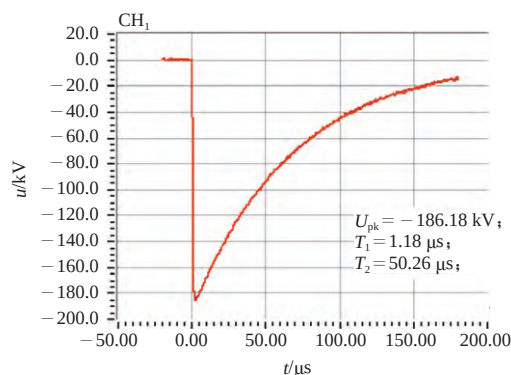
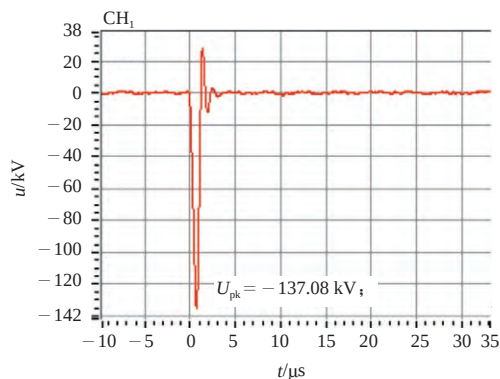


图2 雷电冲击试验装置

冲击波。分压器为BHT 1 200 kV弱阻尼电容式分压器，电压比为1 380 : 1。TektronixTDS3012C型示波器接于分压器的低压侧，设置自动触发用于捕捉波形。试验的空载波形和典型击穿波形如图3所示。



(a) 空载波形



(b) 并联保护间隙的典型击穿波形

图3 试验波形记录

试验方法为：首先测量PS15/500支柱式绝缘子（不加保护间隙）的雷电冲击闪络电压，重复20次；然后在绝缘子旁并联可调式保护间隙后，设置若干间隙距离，分别测量20次间隙雷电冲击击穿电压，间隙距离一般小于绝缘子绝缘结构长度的95%；最后，用正态概率分布的方法对各个间隙的20次雷电冲击闪络（击穿）电压进行处理，选

择出最佳的间隙距离。

2. PS15/500支柱式绝缘子及其并联保护间隙雷电冲击特性试验结果

PS15/500支柱式绝缘子及其并联可调式保护间隙试验后，20次雷电冲击闪络（击穿）电压结果如图4所示。

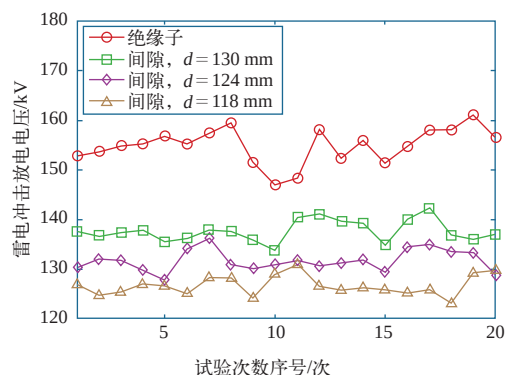


图4 绝缘子及其并联保护间隙的20次击穿试验结果

用Matlab软件对各个间隙下的20次雷电冲击放电电压按照正态概率分布的方法进行处理，可计算出对应概率的雷电冲击放电电压，如表1所示。

表1 PS15/500支柱式绝缘子及其并联保护间隙服从正态分布的闪络电压值

试品	$U_{50\%}/\text{kV}$	$U_{50.1\%}/\text{kV}$
PS15/500支柱式绝缘子	155.388 3	137.242 7
试品	$U_{50\%}/\text{kV}$	$U_{99.9\%}/\text{kV}$
绝缘子并联130 mm 间隙	137.968 6	143.056 4
绝缘子并联124 mm 间隙	131.968 0	137.058 3
绝缘子并联118 mm 间隙	126.931 1	131.611 9

仅从50%雷电冲击放电电压的角度来判断，保护间隙的3个距离下的 $U_{50\%}$ 均小于PS15/500支柱式绝缘子的 $U_{50\%}$ 。

但根据 $U_{50.1\%} > U_{99.9\%}$ 的绝缘配合原则，分析表1中的数据，可以得出：绝缘子并联130 mm保护间隙不满足绝缘配合的要求；绝缘子并联124 mm保护间隙和绝缘子并联118 mm保护间隙均满足绝缘配合的要求。

试验验证

绝缘子（串）与并联保护间隙的闪络路径是

并联保护间隙对于绝缘子（串）保护性能最直观的体现。同时也是绝缘子（串）与并联保护间隙绝缘配合的重要参考依据。

图5a中，放电电弧的路径是从保护间隙经过的，说明当雷击闪络时，保护间隙能够成功保护绝缘子；图5b中，放电电弧的路径是从绝缘子表面经过的，说明保护间隙保护绝缘子失败。

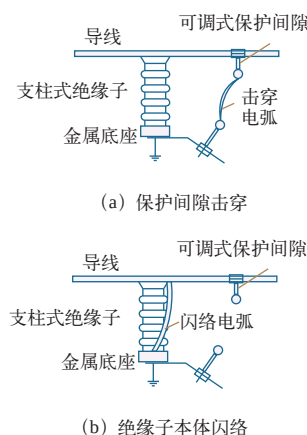


图5 放电电弧路径

为了验证不同间隙距离的保护间隙对绝缘子的保护效果，对PS15/500支柱式绝缘子并联的3个间距下的保护间隙在施加特定电压等级下的闪络路径进行观察，以验证基于正态分布的绝缘配合方法的准确性。

绝缘子和间隙从0.01%放电概率到99.9%放电概率的放电电压区间一旦有交集，即说明并联间隙无法全面保护绝缘子。而在其绝缘子和并联间隙的伏秒特性曲线上也表现为两条曲线必然出现交点，因此，选择两个较高的电压等级进行测量，观察其闪络路径。表2 给出了在特定电压等级

表2 特定电压等级下闪络路径特征的数据统计结果

并联间隙	施加峰值为315 V 的标准雷电波形		施加峰值为330 V 的标准雷电波形		保护 情况
	本体闪络 /试验次数	本体闪络 概率(%)	本体闪络 /试验次数	本体闪络 概率(%)	
绝缘子并联130 mm 保护间隙	2/20	10	3/20	15	不完全
绝缘子并联124 mm 保护间隙	0/20	0	0/20	0	完全
绝缘子并联118 mm 保护间隙	0/20	0	0/20	0	完全

下观察到的闪络路径特征的数据统计结果。

由表2的数据统计结果可得，PS15/500支柱式绝缘子并联130 mm保护间隙时，仍有一定概率出现绝缘子本体闪络，保护间隙保护失效；而PS15/500支柱式绝缘子并联124 mm、118 mm保护间隙时，闪络均发生在保护间隙中，成功地保护了绝缘子。该试验结果与基于正态分布的绝缘子（串）与并联保护间隙的雷电冲击绝缘配合方法的计算结果一致，由此说明，基于正态分布的绝缘子（串）与并联保护间隙的雷电冲击绝缘配合方法是准确、有效的。

结束语

1) 系统分析了基于正态分布的绝缘子（串）与并联保护间隙的雷电冲击绝缘配合方法，并通过实例，验证了由此方法确定的绝缘子（串）与并联保护间隙的间隙距离是准确、可靠的，能够成功对绝缘子进行保护。

2) 该方法具有简单、易实施的特点，可以准确、方便地确定保护间隙的间隙距离。对于架空线路防雷保护具有重要意义。

参考文献

- [1] 谷山强, 何金良, 陈维江, 等. 架空输电线路并联间隙防雷装置电弧磁场力计算研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (7): 140-145.
- [2] 陈维江, 孙昭英, 李国富, 等. 110 kV和220 kV架空线路并联间隙防雷保护研究 [J]. 电网技术, 2006, 30 (13): 70-75.
- [3] 陈维江, 李庆峰, 来小康, 等. 10 kV架空绝缘导线防雷击断线用防弧金具研究 [J]. 电网技术, 2002, 26 (9): 25-28.
- [4] 中国电力科学研究院. 110 kV、220 kV架空线路并联间隙防雷保护研究 [R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [5] 陈维江, 孙昭英, 王献丽, 等. 35 kV架空送电线路防雷用并联间隙研究 [J]. 电网技术, 2007, 31 (2): 61-65.
- [6] Suzuki T, Miyak K. Experimental study of

- breakdown voltage-time characteristics of large air gaps with lightning impulses [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96 (1) : 227-233.
- [7] 秦英杰. 35 kV、110 kV输电线路防雷保护间隙的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- [8] 赵亚平, 李红, 刘健, 等. 35 kV架空送电线路防雷并联间隙的应用 [J]. 电网技术, 2007, 31 (1) : 118-120.
- [9] 葛栋, 冯海全, 袁利红, 等. 绝缘子(串)并联间隙的工频大电流燃弧试验 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (7) : 1499-1503.
- [10] 全国带电作业标准化技术委员会. GB/T 16927.1—1997 高电压试验技术 (第一部分): 一般试验要求 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [11] 马春华. 线路避雷器和绝缘子(串)的伏秒特性配合问题研究 [J]. 高压电器, 2007, 43 (1) : 68-73.
- [12] 陈维江, 孙昭英, 周小波, 等. 防止10 kV架空绝缘导线雷击断线用穿刺型防弧金具的研制 [J]. 电网技术, 2005, 29 (20) : 82-84.
- [13] 司马文霞, 叶轩, 谭威, 等. 高海拔220 kV输电线路绝缘子(串)与并联间隙雷电冲击绝缘配合研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (10) : 168-176.
- [14] 李景禄. 高电压技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [15] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- (收稿日期: 2014-07-07) EA



Weidmüller 

魏德米勒PRO-Eco系列电源 —卓越品质和高性价比的完美结合

魏德米勒PROeco系列电源拥有超薄设计, 工作温度范围宽-25°C...70°C, 其输出电压可通过前面板电位器精确调节, 内置继电器告警, 可远程监测, 同时拥有LED三色指示灯, 便于初步故障诊断。当超过90%额定输出电流时, 提供先进的可视警示并获得国际认证 CE, UL。