[输电线路]

220 kV带串联间隙避雷器直线塔的带电作业安全性评估方法研究

文/国网金华供电公司　李有春　秦威南　汤春俊
中国电力科学研究院有限公司　雷兴列　余光凯

通过试验、仿真分析和安全距离校核等手段，综合分析了220 kV避雷器对直线塔带电作业的影响。开展绝缘子或导线带电检修工作时，除需保证最小安全距离和采取常规防护措施外，进出电场路径应选择远离避雷器的一侧，作业人员的站位应位于避雷器的对侧或下方。为220 kV带避雷器线路带电作业的开展和评估提供依据。

根据输电线路运行经验和统计来看，雷击引发的跳闸数占各类跳闸总数的35%～40%，在局部落雷密集地区，占比甚至达70%以上。通过加装避雷器来降低雷击故障率，是电网防雷的主要措施。目前，部分供电公司已完成超高压等级线路避雷器防雷的全覆盖，并正在实现低电压等级线路重要区段的避雷器全覆盖。所安装避雷器中，由于带外串联间隙型避雷器（EGLA）大大提高了金属氧化物避雷器承受电网电压的能力，具有更好的保护水平，且安装方便，因此，EGLA得到了广泛应用。

目前，对于避雷器的电气性能、结构和安装方式等已有大量研究，技术也非常成熟。

带电作业是避免停电检修、保证线路正常供电的有效手段，目前已得到了大规模推广应用。对于安装避雷器后的输电线路，避雷器在一定程度上短接了绝缘子串的有效长度，带电作业时潜在的放电路径和安全距离将发生变化。同时，避雷器的结构会使绝缘子串周围的电场分布发生改变。这些原因使得在带避雷器线路开展带电作业前，需重新对绝缘子的有效绝缘长度进行校核，这方面的研究目前较少。对于耐张塔线路，由于避雷器大多安装在跳线和横担之间，对于采用“跨二短三”进出电场开展带电作业并无影响（若经校核无法开展带电作业，则加装避雷器后更无开展可能）。对于直线塔，则需进一步分析。

本文以220 kV线路为例，通过三方面研究，对带避雷器直线塔带电作业的安全影响和可行性进行了分析。主要包括：①通过冲击放电试验，获得带避雷器线路的放电特性曲线，进行计算校核确定带电作业组合间隙等关键技术参数；②与常规塔型进行差异对比，分析提出带避雷器线路的带电作业方式和等电作业人员进出高压导线的方法；③建立含有避雷器的输电线路的带电作业电场分析模型，获取等电位作业人员体表及对作业区域的电场的畸变。本文的研究结果可为220 kV带避雷器线路带电作业的开展和评估提供依据。

直线塔带外串联间隙型避雷器结构

220 kV线路一般选用纯空气间隙避雷器。外串纯空气间隙线路避雷器由处于高压端的电极组成的纯空气间隙和处于接地侧的避雷器相串联组成，外串间隙的一个电极接于避雷器本体的一端，另一个电极则固定在线路导线上，结构示意如图1所示。

根据GB/T 28547—2012《交流金属氧化物避雷

基金项目：国网浙江省电力有限公司科技项目（5211JH210039）。

器选择和使用导则》，必须验证绝缘子的闪络特性与EGLA波前放电电压、标准雷电冲击放电电压以及标称放电电流下残压之间的配合。因此，EGLA的整体尺寸和空气间隙的距离均需满足一定条件。本文根据标准推荐值和现场实际情况，选取长度为（1690±10）mm、空气间隙距离为（840±30）mm的220 kV EGLA为例进行分析。220 kV架空线路最小空气间隔距离为1.9 m，避雷器本体高压端各金属件距离接地体的绝缘距离大于1.9 m，避雷器及间隙与绝缘子串的距离大于1.9m，现场安装图如2所示。

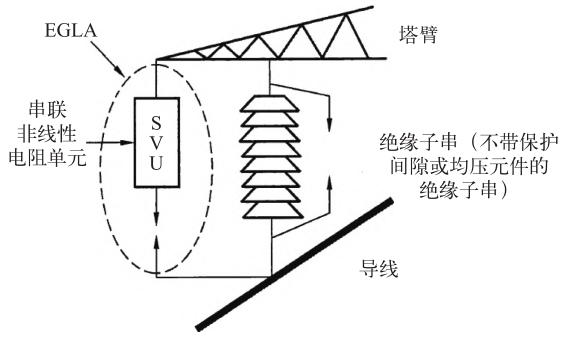

图1　带有绝缘子和保护间隙的EGLA典型结构

图2　现场安装图

避雷器对电场影响分析

加装避雷器后，输电线路塔头和绝缘子串电场分布将与常规不带避雷器的杆塔有较大区别，因而有必要分析典型等电位作业工况下人员体表的电场分布特点，校核现有的防护措施是否满足要求。针对实际的220 kV典型杆塔、绝缘子串、导线和避雷器的参数，采用ANSYS有限元软件建立仿真模型。模型建立时，对避雷器、绝缘子串进行精细化建模，对计算准确度影响不大的杆塔等进行简化处理以减少计算量。

1. 模型参数

选取典型的220 kV直线塔进行建模，塔型为2E2-SJG1型，导线采用4×LGJ-400/35钢芯铝绞线；地线采用JLB 40-150；子导线的间距为400 mm，绝缘子串的长度为1.87 m，相导线中心距横担悬挂点的高度为2.98 m；避雷器结构高度为1 695 mm，高压端距离导线空气间隙为850 mm，如图3所示。

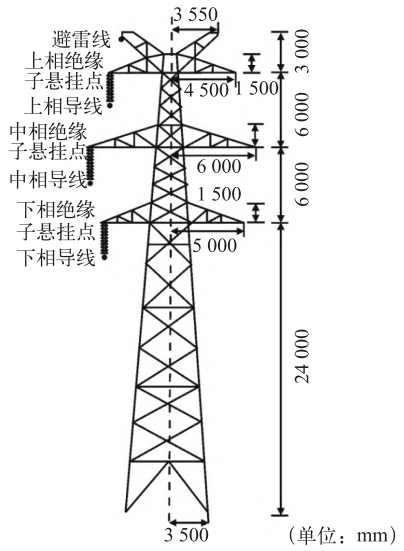

图3　杆塔模型

2. 电场分析

通过仿真计算，得到带避雷器的电场分布结果如图4所示。

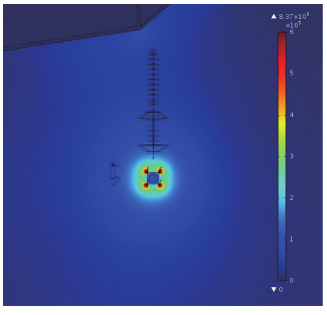

图4　空间电场分布（单位：V/m）

从计算结果可以看出，避雷器的安装，引起了导线-绝缘子-上横担这个空气间隙中电场分布的改变，在避雷器本体高压端连接金具处，由于金具的引入，造成了局部电场的畸变加剧，这些变化无疑会对作业人员处于地电位、等电位和悬浮电位下带电作业间隙的放电特性产生影响。

含EGLA的220 kV输电线路带电作业间隙放电试验

1. 含EGLA带电作业间隙操作冲击放电特性

为了获得含EGLA对典型的模拟直线塔塔头间隙放电特性的影响，本文开展了标准波前时间为250 μs操作冲击电压下间隙的放电特性试验。基于间隙操作冲击电压放电的分散性，对于每一间隙距离采用升降法开展30次加压试验，计算得到的U_{50}按照GB/T 16927.1—2011《高电压试验技术第1部分：一般定义及试验要求》修正至标准气象条件下。对于间隙距离小于1 m的棒-板间隙操作冲击放电电压，依据GB/T 19185—2003《交流线路带电作业安全距离计算方法》中推荐公式为

$$U_{50}=KU_{50\mathrm{RP}} \tag{1}$$

$$U_{50\mathrm{RP}}=1\,080\,L_{\mathrm{n}}(0.46d+1) \tag{2}$$

式中，U_{50}为空气间隙在操作冲击电压下50%概率放电电压，单位为kV；$U_{50\mathrm{RP}}$为棒-板间隙在操作冲击电压下50%概率放电电压，单位为kV；d为空气间隙的长度，单位为m；K为间隙系数。

试验获得各间隙结构下的操作冲击放电试验数据后，可求得间隙系数K。进一步可绘制出该带电作业间隙结构下的50%操作冲击放电电压公式和拟合曲线。

2. 带电作业危险率的定义及绝缘配合

带电作业绝缘配合时一般通过危险率来衡量作业的安全性，《带电作业工具基本技术要求及设计导则》推荐带电作业危险率不高于1.0×10^{-5}。

对于非自恢复绝缘和220 kV及以下电压等级的系统的带电作业绝缘配合一般采用惯用法，即

$$A=\frac{U_{\mathrm{W}}}{U_{0\cdot\max}} \tag{3}$$

式中，A为安全裕度；U_{W}为绝缘的耐受电压；$U_{0\cdot\max}$为系统最大过电压。

带电作业绝缘配合中常取安全裕度为1.2。耐受电压为

$$U_{\mathrm{W}}=(1-3\sigma)U_{50} \tag{4}$$

式中，σ取0.06。

3. 220 kV线路避雷器带电作业间隙放电试验

试验选取220 kV绝缘子串，按照实际线路结构情况布置横担、模拟塔身、绝缘子串、模拟导线及试验假人，按照标准设计图样布置避雷器，如图5所示。布置的模拟人身穿全套带电作业屏蔽服装处于模拟导线与绝缘子挂点连接部位侧方。试验中通过调节绝缘子串有效长度L，分别施加标准波形的操作冲击电压，现场试验布置如图6所示。

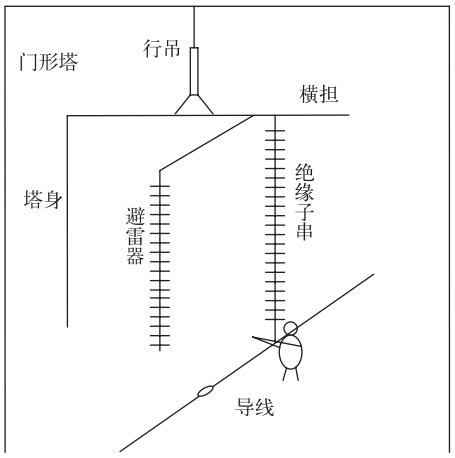

图5　模拟人对上方横担的间隙放电试验布置示意图

图6　等电位作业人员对上方横担安全距离试验照片

试验结果见表1，U_{50}随绝缘子有效长度L的变化曲线如图7所示。

表1　220 kV避雷器线路安全距离试验结果

绝缘子有效长度L/m	U_{50}/kV	变异系数Z（%）
1.8	831.5	3.1
2.2	989.8	2.9
2.5	1 065.2	3.7
2.7	1 125.7	4.4

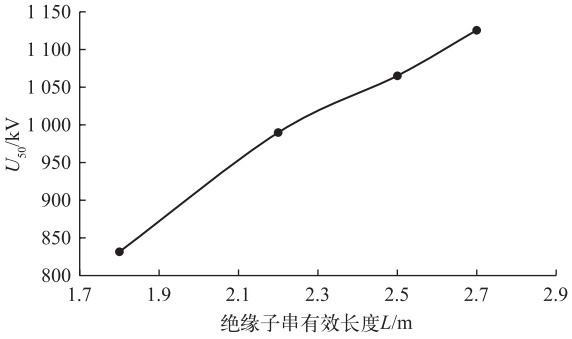

图7　220 kV带避雷器线路安全距离试验放电特性曲线

根据试验数据及计算式（1）、式（2）得出间隙系数K为1.28～1.31，考虑安全裕度，K取1.28，等电位条件下间隙的U_{50}与间隙距离d的关系为

$$U_{50}=1.28\times 1\,080\,L_{n}(0.46\,d+1) \quad (5)$$

避雷器结构下带电作业安全距离

在并联间隙的放电试验中，由于实际作业工况下要求作业人员不超出并联间隙，因此，该试验中放电均是通过“高压端并联-绝缘子表面-低压端并联间隙”的路径，此时带电作业间隙的放电特性即并联间隙的放电特性。由于并联间隙的上下尖端效应，使得该作业工况下的放电电压下降，对带电作业间隙的放电特性也将造成影响。

DL/T 876—2019《带电作业绝缘配合导则》规定，220 kV直接接地系统线路统计过电压倍数为3.0，电压升高系数为1.15，绝缘配合的安全裕度系数按1.2考虑，则计算系统的绝缘耐受电压为

$$U_{W}=220\ \text{kV}\times 1.15\times 1.2\times 3.0\times\sqrt{2}/\sqrt{3}=743.7\ \text{kV}$$

根据式（4）计算系统的操作过电压为

$$U_{50}=U_{W}/(1-0.18)=906.1\ \text{kV}$$

再根据式（5）确定的操作冲击放电特性，可计算得出220 kV带避雷器线路带电作业安全距离为2.04 m，向上取整后为2.1 m。

常规线路、带避雷器线路带电作业安全距离对比见表2。

表2　带电作业最小安全距离对比

线路结构	最小安全距离/m
常规线路	1.8
带避雷器	2.1

从表2中数据可以看出，避雷器会影响带电作业间隙放电，从而使得带电作业时要求的最小安全距离变大。对于220 kV线路，杆塔尺寸相对超高压、特高压线路较小，空间间隙长度不大，而避雷器对空气间隙放电特性的影响较大，因此推荐带电作业安全距离较常规线路大0.3 m。

根据上述分析，220 kV线路直线串安装避雷器后，除了按照常规线路下带电作业安全距离的控制之外，在绝缘子附近开展地电位检测绝缘子、更换绝缘子，以及等电位更换绝缘子、带电检修金具时，需要进行更严格的带电作业安全距离的控制。

地电位作业人员应采用最下绝缘长度不低于2.3 m的绝缘操作工具进行作业；等电位作业人员在作业过程中，应始终控制头顶与上方横担的距离不小于2.1 m。此外，在进出等电位时，应选择在安装避雷器的绝缘子另外一侧进行规划进出等电位的路径，作业人员进出等电位的组合间隙距离不得小于2.1 m；作业人员进入等电位后，身体整体部位应始终处于安装避雷器的绝缘子另外一侧导线等电位位置，应尽量避免身体越过绝缘子到安装避雷器的一侧进行作业。作业示意图如图8所示。

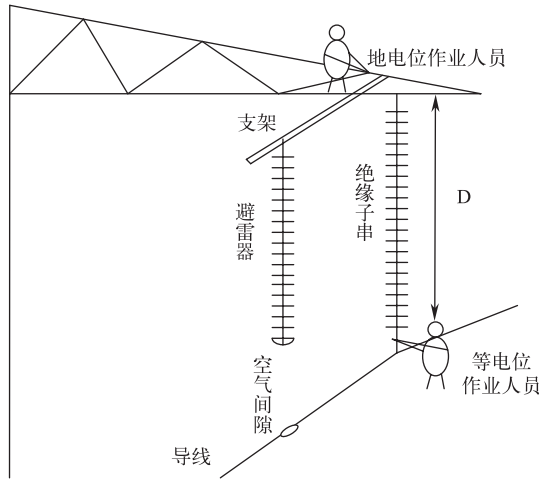

图8　作业示意图

事实上，实际线路的过电压水平并没有设计导则标准那么严格，如确实需要在绝缘子位置开展带电作业，可以根据实际线路的过电压水平重新进行校核，如果满足要求则可以进行作业，按照本文试验获得的放电特性，当线路统计过电压倍数超过2.7时，线路间隙距离不满足要求，则不能在绝缘子串处开展带电作业。

结束语

1）220 kV带避雷器线路带电作业最小安全距离为2.1 m，比常规线路增加0.3 m。

2）受避雷器影响，绝缘子串位置开展带电作业时应保持最小安全距离不得小于2.1 m，当线路过电压倍数超过2.7时，不得在绝缘子串处开展带电作业。

3）在带避雷器线路开展带电作业过程中，等电位作业人员应按照常规线路的要求穿戴I型屏蔽服进行电场防护。**EA**

（收稿日期：2021-06-25）