

棒极结构对棒-板间隙操作冲击 放电特性影响的试验研究

谷琛¹, 张文亮², 范建斌², 宿志一¹, 王晰¹, 廖蔚明¹, 李庆峰¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京市海淀区 100192; 2. 国家电网公司, 北京市西城区 100031)

Influence of Rod electrode Structure on Switching Impulse Discharge Characteristics of Rod-plane Air Gap

GU Chen¹, ZHANG Wenliang², FAN Jianbin², SU Zhiyi¹, WANG Xi¹, LIAO Weiming¹, LI Qingfeng¹

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: Rod-plane air gap is the most typical gap in the research of air gap discharge, and its switching impulse characteristic is a very important factor for dimension of air gaps in the project design of transmission lines and converter stations/substations in transmission project. To study switching impulse characteristic of rod-plane air gap deeply, positive switching impulse discharge tests were carried out using rod electrodes with different diameters, hemisphere and cone shape in their heads. The influence of shape and diameter of rod electrode on 50% flashover voltage was concluded. To obtain the critical radius at different altitudes, comparison tests were carried out in Beijing, Xining and Yangbajing, and the critical radius corresponding to different gap distances were obtained through changing the radius of sphere connecting rod electrode. It is shown that when radius of rod electrode is less than critical radius, the change of radius and shape of rod electrode will not affect 50% flashover voltage of air gap; The critical radius will increase when gap distance increases, and the critical radius corresponding to a certain gap distance will increase at high altitude.

KEY WORDS: rod-plane air gap; switching impulse; 50% flashover voltage; critical radius; high altitude

摘要: 棒-板间隙是研究空气间隙放电的最典型间隙, 其操作冲击放电特性是输电工程线路和换流站/变电站空气间隙选择的重要依据之一。为了更深入地研究棒-板间隙的操作

冲击放电特性, 选择不同直径的棒电极, 以及半球形和圆锥形 2 种棒电极端部形状, 在 2~5 m 间隙距离下进行了正极性操作冲击放电特性的试验, 得到了棒电极端部形状和棒电极直径的改变对棒-板间隙正极性操作冲击 50% 放电电压造成的影响。另外, 在北京、西宁和羊八井等几个不同海拔地区进行了临界半径的对比试验。通过改变棒电极端部连接球面的半径, 得到了不同间隙距离对应的临界半径。由试验可以得出, 当棒电极结构的半径小于临界半径时, 棒电极半径和端部形状的改变不会对间隙的 50% 放电电压产生明显影响; 临界半径随间隙距离的增加而增加, 且随着海拔高度的增加, 同一间隙对应的临界半径也随之增加。

关键词: 棒-板间隙; 操作冲击; 50% 放电电压; 临界半径; 高海拔

0 引言

典型空气间隙的操作冲击放电特性是特高压交直流输变电工程设计的重要依据之一, 工程中的很多典型间隙, 都是由操作冲击放电特性来决定它的最小间隙距离^[1-7]。换流站/变电站管母线与设备连接处经常采用均压球或均压环来连接, 这些均压环或均压球与地或墙或其它设备, 构成了变电站和换流站的典型空气间隙。随着工程电压等级的增加, 均压球或均压环的尺寸也相应增加。通过改进电极形状、增大电极曲率半径, 以改善电场的分布, 能够避免工作电压下可见电晕的发生, 同时也可以提高间隙的操作冲击放电电压。

在输电工程中, 线路和换流站/变电站中使用的间隙结构多种多样, 其操作冲击放电特性也不尽相

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGKJJSKF20080452)。

Project Supported by S&T Program of SGCC (SGKJJSKF20080452).

同。为了研究不同间隙结构对放电特性的影响, 引入了间隙系数的概念^[8-10], 认为棒-板间隙的放电电压为 1, 则其它间隙结构的放电电压与其相比可得到该间隙结构的间隙系数。目前间隙系数已被广泛应用于常规输电线路及换流站/变电站空气外绝缘的设计中, 其它间隙结构是以棒-板间隙的放电特性曲线为依据乘以间隙系数得到的, 因此确定棒-板间隙的放电特性曲线就显得尤为重要, 它的准确与否直接关系到其它间隙的选取是否合理。

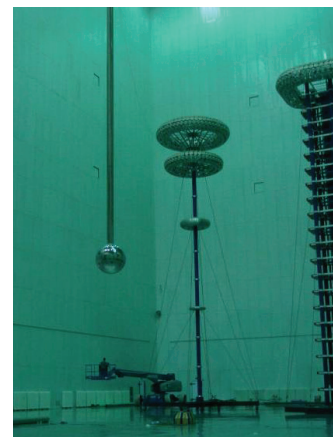
即使是对于最简单的棒-板间隙, 也存在不同的棒电极尖端和长度等不同情况。当棒端部直径不断增大, 棒-板间隙也就转变为球-板间隙。针对不同的棒极形状, 国外已经进行过一些研究^[11]。1971 年, 来自欧洲的电力公司、试验室以及高校的科学家和工程师组成 Les Renardieres 工作组, 在法国电力公司特高压试验室进行了不同尖端的棒-板间隙操作冲击试验^[12]。棒-板间隙选择 5 和 10m 的长度, 板电极为 10 m² 的铝板, 使用了 3 种棒电极结构, 即半球、双曲面和圆锥形尖端, 直径均为 0.6m。棒电极作为正极性电极, 施加双指数冲击电压。主要使用了 3 种波前时间, 分别为 130、260 和 500 μ s。对 3 个间隙结构分别施加给定波头时间的操作冲击电压, 且间隙长度相同, 圆锥形尖端通常具有最低的 50%放电电压 U_{50} , 双曲面次之, 半球面最高, 对于 10m 间隙最大差别可达 7%, 对于 5m 间隙最大差别为 11%。文献[13]也介绍过类似试验, 试验在长度为 3m 的棒-板间隙中进行, 一个尖端是直径为 30cm 的球面, 另一个尖端是 35°的圆锥面。对于给定波头时间的操作冲击电压, 球面的 U_{50} 比圆锥的高 6%~8%。由 G.Carrara 和 L.Thione^[14]提出的临界半径的概念可知, 当球-板间隙中的球半径 R 小于临界半径 R_c 时, 半径 R 的变化对棒-板间隙的正极性操作冲击的放电电压(以下简称放电电压)影响较小; 当球半径 R 大于临界半径 R_c 时, 放电电压随球半径的增大而明显提高。随着间隙距离的增大, 对应的临界半径也逐渐增大。这对于解释均压球半径变化时可能出现的异常情况具有重要的意义。

为了深入研究在不同海拔地区棒-板间隙的放电特性, 本文在北京(海拔 50m)、西宁(海拔 2254m)和羊八井(海拔 4 300 m)3 地分别进行了不同端部半径的棒-板间隙试验, 通过改变端部半径, 得到了

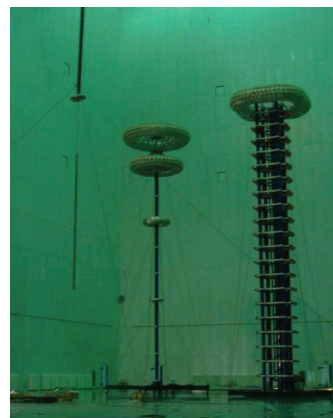
不同间隙下对应的临界半径, 并分析了海拔对临界半径的影响。

1 试验布置

北京和西宁的棒-板间隙试验均在高压大厅内进行, 羊八井的试验在户外试验场进行。地面铺设面积为 20m×20m 的不锈钢板作为板电极, 板电极接地。棒电极采用 2 类形状, 一类为长 10m、直径为 220mm 的不锈钢管, 棒端安装半径为 125、225、375 和 475 mm 的不锈钢球, 球与棒之间用锡箔平滑连接。该试验主要是为了得到给定间隙距离对应的临界半径, 试验布置如图 1(a)所示。另一类为长 10 m, 直径为 38、102 和 220 mm 的不锈钢管, 管的端部焊接有半圆形和圆锥形 2 种结构, 如图 2 所示。该试验主要是为了讨论棒极半径小于临界半径情况下棒-板间隙的操作冲击放电特性, 试验布置如图 1(b)所示。改变棒-板间隙的距离, 选择 4 个间隙距离(2、3、4 和 5m)进行操作冲击放电特性的



(a) 棒电极端部为圆球



(b) 棒电极端部为半球或圆锥

图 1 棒-板间隙操作冲击试验的布置

Fig. 1 Switching impulse test layout of rod-plane air gap

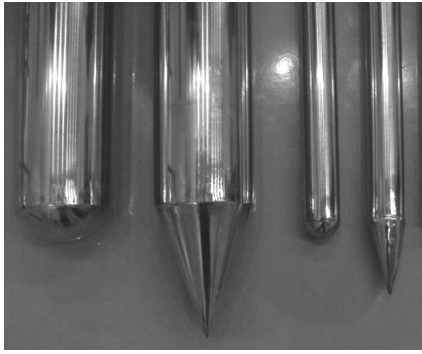


图2 棒-板间隙棒电极的端部形状

Fig. 2 Shapes of rod head used in rod-plane air gap

试验, 施加的电压均为正极性标准操作波, 波形为 250/2 500 μs 。

试验采用升降法, 每组试验施加 40 次电压。试验按照 GB/T 16927.1—1997《高电压试验技术第一部分: 一般试验要求》^[15]和 GB/T 16927.2—1997《高电压试验技术第二部分: 测量系统》^[16]规定的试验和测量方法进行。采用升降法求取 50%放电电压 U_{50} , 如下所示:

$$U_{50} = \frac{\sum n_i \times U_i}{n} \quad (1)$$

式中: U_i 为施加的电压, kV; n_i 为相同的施加电压 U_i 下试验的次数; n 为有效试验的总次数。

试验的标准偏差 σ 计算如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n U_i^2 - (\sum_{i=1}^n U_i)^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

2 试验结果分析

2.1 棒端部安装不同直径圆球时的棒-板间隙试验

棒端部安装不同直径的圆球, 当端部球直径不断增大时, 棒-板间隙试验实际即为球-板间隙试验, 此试验用来确定棒-板间隙的临界半径。

试验中对放电路径进行了记录, 如图 3 所示。可以看出, 各次放电的路径并不相同, 放电可能从球下端的不同位置发展出来。放电较多地集中在接近板电极的位置, 但靠近圆球侧面的部分也会有放电发生。这一方面是因为操作冲击放电本身就具有一定的分散性, 每次放电并不像雷电冲击那样总是沿着放电最小的路径发展; 另一方面, 当圆球直径较大时, 棒-板间隙的电场趋向均匀, 因此放电具有更大的随机性。只要球表面场强大于放电阈值, 放电都有可能在这一点发生, 只是不同点放电的概率

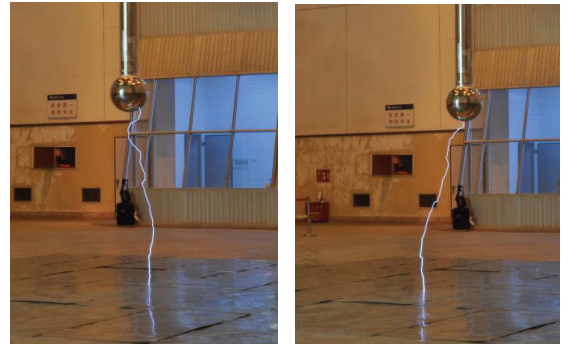


图3 棒-板间隙试验中的放电路径

Fig. 3 Discharge path in rod-plane gap tests

不同。

图 4 为北京试验所得出的棒-板间隙操作冲击 50%放电电压与端部球半径的关系。图中由上而下的 4 条曲线分别是间隙距离为 2、3、4 和 5 m 时棒-板间隙的放电电压随端部球半径的变化关系曲线, 球半径分别为 125、225、375 和 475 mm。为了更清楚地比较端部球半径增加所引起的放电电压变化, 将 2、3、4 和 5 m 间隙距离下, 半径为 19 mm, 端部为半球端部的棒-板间隙放电电压也绘制于图 4 中的 4 条曲线上。可以看出, 存在一个临界半径, 当端部球半径小于该临界半径时, 球半径的变化不会引起间隙 U_{50} 的变化; 而球半径大于临界半径时, 随着球半径的增加, 间隙的 U_{50} 也相应增加。为确定各间隙距离所对应的临界半径, 对试验数据进行曲线拟合。当端部球半径小于临界半径时, 棒-板间隙的 50%放电电压基本上保持不变, 因此将临界半径以下各球半径对应的 50%放电电压的平均值与拟合曲线进行比较, 当拟合曲线放电电压高于该平均值的 $(1+\Delta)$ 时 (Δ 为试验中的变异系数), 即认为放电电压的升高已超过误差范围, 结合曲线的上升趋势, 得到对应的球半径作为该间隙距离下的临界半径。

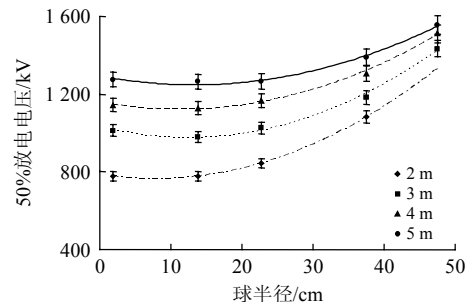


图4 棒-板间隙操作冲击 U_{50} 与球半径的关系(北京)
Fig. 4 Relationship between switching impulse U_{50} of rod-plane gap and radius(Beijing)

将 2~5m 间隙对应的临界半径与之前国内外的研究结果进行了比较。对比多个机构的研究数据可知，本文得到的临界半径值与已有的试验数据基本相符。由图 4 可知，不同间隙距离对应的临界半径也不相同，且随着间隙距离的增加，临界半径也随之增加。另外由图 4 中各曲线也可以看出，间隙距离较小时，球半径的增加会显著增加间隙的放电电压，反映在放电特性曲线上就是球半径大于临界半径后的曲线斜率较大。而间隙距离增大后，曲线的斜率降低。图 4 中球半径为 475 mm、间隙距离为 3 m 时的放电电压已经高于球半径为 375 mm、间隙距离为 5 m 的放电电压。这说明在选择屏蔽结构时，增大曲率半径可以更大程度地增大间隙的绝缘程度，从而减小设备的尺寸。

2.2 典型棒-板间隙的试验

2.2.1 不同端部形状的影响

首先在北京地区进行了棒电极端部形状不同时棒-板间隙操作冲击放电特性的试验，包括直径为 38 和 102 mm 的不锈钢管，管的端部焊接有半圆形和圆锥形 2 种端部结构。试验是在北京的国家电网公司特高压直流试验基地高压试验大厅进行，使用 6 000 kV/450 kJ 的冲击电压发生器。图 5(a)和(b)分别为相同直径、不同端部结构时操作冲击放电电压的比较。

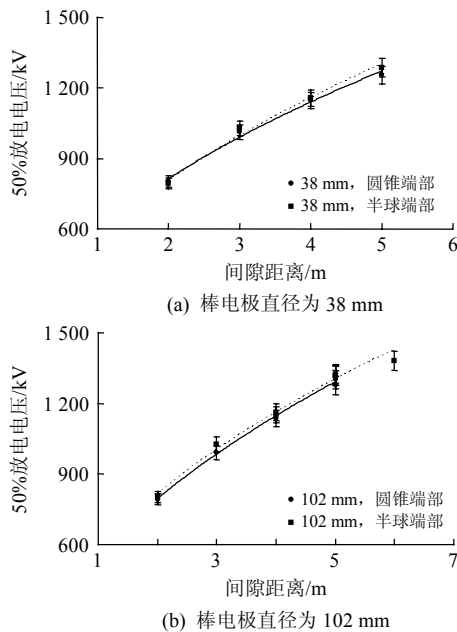


图 5 不同端部形状对棒-板间隙 U_{50} 的影响
Fig. 5 Influences of the shape of rod head on U_{50} of rod-plane

表 1 为 38 mm 棒电极在端部形状不同时，操作冲击 50%放电电压的差别；表 2 为 102 mm 棒电极在端部形状不同时操作冲击 50%放电电压的情况。其中以半球端部的 U_{50} 为 1，圆锥端部与之进行比较。

表 1 38 mm 棒电极端部不同时 U_{50} 的差别

Tab. 1 Differences of U_{50} using different heads with 38 mm rod

棒电极端部形状	间隙距离/m	U_{50} 相对值
半球	2	1
	3	1
	4	1
	5	1
圆锥	2	1.13%
	3	-1.33%
	4	-0.72%
	5	-2.22%

表 2 102 mm 棒电极端部不同时 U_{50} 的差别

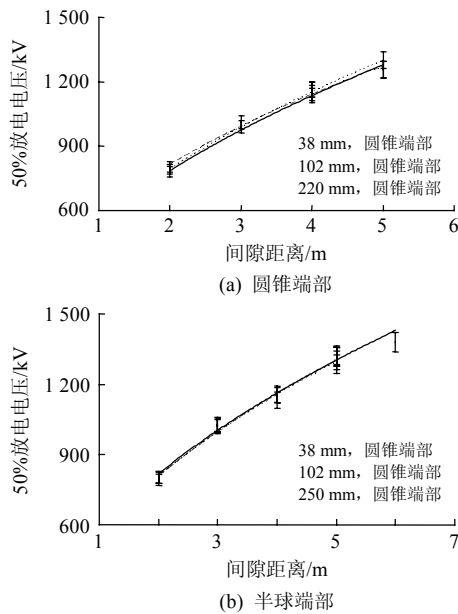
Tab. 2 Difference of U_{50} using different heads with 102 mm rod

棒电极端部形状	间隙距离/m	U_{50} 相对值
半球	2	1
	3	1
	4	1
	5	1
圆锥	2	-1.40%
	3	0.53%
	4	-3.06%
	5	-1.05%

可知，端部形状为半球或圆锥时，38 和 102 mm 棒电极所对应的 U_{50} 差别均小于 3%。考虑到试验中 U_{50} 的变异系数约为 3%~4%，因此可以认为在试验范围内，这 2 种端部形状对棒-板间隙的放电电压没有明显的影响。

2.2.2 不同棒电极直径的影响

在北京还进行了不同棒电极直径对棒-板间隙放电电压的影响研究。其中圆锥端部选择的棒电极直径分别为 38、102 和 220 mm，半球端部选择的棒电极直径分别为 38、102 和 250 mm。图 6(a)和(b)所示分别为端部为圆锥或半球时，改变棒电极的直径操作冲击 50%放电电压的变化情况。表 3 为棒电极端部形状为圆锥时，棒电极直径变化对 50%放电电压的影响；表 4 则为棒电极端部形状为半球时的情况。其中以 38 mm 棒电极的 U_{50} 为 1，其他直径

图6 不同棒电极直径对棒-板间隙 U_{50} 的影响Fig. 6 Influences of rod diameter on U_{50} of rod-plane表3 棒电极端部为圆锥时不同直径棒电极 U_{50} 的差别Tab. 3 Differences of U_{50} using rod electrodes of different radii with cone head

棒极直径/mm	间隙距离/m	U_{50} 相对值
38	2	1
	3	1
	4	1
	5	1
102	2	-2.78%
	3	-2.97%
	4	0.36%
	5	2.83%
220	2	-2.73%
	3	—
	4	1.30%
	5	-0.10%

表4 棒电极端部为半球时不同直径棒电极 U_{50} 的差别Tab. 4 Difference of U_{50} using rod electrodes of different radii with sphere head

棒极直径/mm	间隙距离/m	U_{50} 相对值
38	2	1
	3	1
	4	1
	5	1
102	2	-0.64%
	3	-1.24%
	4	-0.88%
	5	1.98%
250	2	0.10%
	3	-3.22%
	4	-1.49%
	5	-0.81%

棒电极与之进行比较。

可知,在间隙距离为2~5 m,圆锥或半球2种端部结构的棒电极直径变化为38~250 mm时,差值均小于试验中的变异系数,因此可以认为在试验范围内棒电极直径的变化不会对棒-板间隙的操作冲击50%放电电压产生影响。

2.2.3 结果分析

综合考虑2.2.1和2.2.2两节的试验结果,可以看到,2部分试验棒电极的半径均小于2~5 m间隙距离对应的临界半径。在这种情况下,改变棒电极端部形状和棒电极直径,不会对棒-板间隙的操作冲击50%放电电压产生显著影响。

长间隙放电有流注和先导2种放电形式,先导通道内的场强远低于流注的场强。流注的长度基本与间隙长度无关,而是取决于间隙中的电场不均匀程度和起晕电场。当棒极端部球半径逐渐增加但仍小于间隙的临界半径时,棒极附近的场强极高,但随着与棒极的距离增加,空间场强迅速下降,首次电晕不足以引起先导的发展,因此棒极端部球半径的变化不会引起间隙击穿电压的变化。当棒极端部球半径大于临界半径时,间隙内的平均场强低于流注的平均场强,不能直接击穿,在电晕尚未产生时,也不能借助先导放电完成击穿,只有在电晕开始发展后,击穿才一触即发。因此这种情况下球-板间隙的放电电压会受到端部球的起晕电压影响,即球半径的影响。由电晕试验研究可知,随着球径的增加,均压球的起晕电压会随之增加^[17]。因此球径大于临界半径后,随着球径的增加,间隙的放电电压也随之增加。

2.3 不同海拔地区端部为球形的棒-板间隙试验

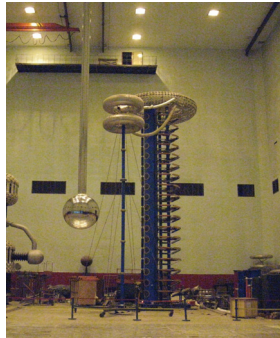
为了与北京的试验数据进行比较,在西宁和羊八井分别进行了端部安装圆球的棒-板间隙的操作冲击放电特性试验。三地试验中的棒电极所用的不锈钢管和端部安装的不同直径不锈钢球与北京试品均为一批产品,以避免试品差异对试验结果造成的影响。

西宁和羊八井进行的棒-板间隙试验布置分别如图7(a)和(b)所示。其中西宁试验的冲击电压发生器标称电压均为3 600 kV,羊八井试验的冲击电压发生器标称电压为4 200 kV。

西宁和羊八井两地试验中棒-板间隙距离与北京试验相同,为2~5 m。两地棒-板间隙的操作冲击

50%放电电压与端部球半径的关系分别如图 8、9 所示。

对北京、西宁和羊八井 3 地不同间隙距离对应



(a) 西宁



(b) 羊八井

图 7 西宁和羊八井试验布置图

Fig. 7 Test Layout in Xining and Yangbajing

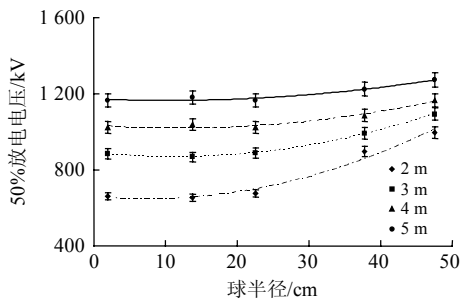


图 8 西宁棒-板间隙操作冲击 U_{50} 与球半径的关系

Fig. 8 Relationship between switching impulse U_{50} of rod-plane gap and radius in Xining

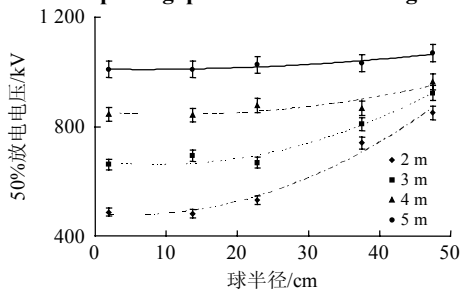


图 9 羊八井棒-板间隙操作冲击 U_{50} 与球半径的关系

Fig. 9 Relationship between switching impulse U_{50} of rod-plane gap and radius in Yangbajing

的临界半径进行比较, 如图 10 所示。

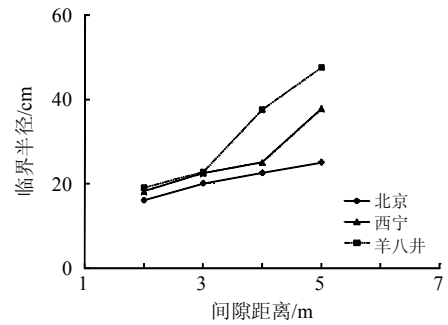


图 10 不同海拔地区临界半径的比较

Fig. 10 Comparison of critical radii in different altitude areas

由图 10 可知, 不同海拔地区的临界半径随着间隙距离的增加都呈增加趋势。对比各地曲线可以看出, 对于较短间隙, 各海拔高度下临界半径比较接近; 随着海拔高度的增加, 同一间隙距离对应的临界半径有所增加, 且这个趋势随着间隙距离的增加而变得更加显著。反映在曲线上就是, 北京的临界半径随间隙距离变化的曲线斜率较小, 西宁和西藏的曲线斜率则逐渐增大。

另外, 对不同海拔地区同样间隙距离下球半径的增加对 U_{50} 提高幅度的影响进行了对比。在北京, 对于 3 和 5 m 的间隙, 当球半径增加到 475 mm 时比球半径为 19 mm 时 U_{50} 分别提高了 42% 和 22%; 而在羊八井, 对于 3 和 5 m 的间隙, 当球半径增加到 475 mm 时, 比球半径为 19 mm 时的 U_{50} 分别提高了 39% 和 6%。可知, 同一间隙下, 北京地区球半径的增加可以显著增加间隙的 50% 放电电压, 而羊八井地区则相对较小, 尤其是在间隙较大时, 通过球半径的增大对放电电压的改变更加有限。

3 结论

1) 为研究棒-板间隙棒电极的端部形状对放电电压的影响, 本文选择了直径为 38 和 102 mm 的棒电极, 其端部为半球和圆锥 2 种形状进行了试验。试验结果表明, 在试验间隙范围(2~5 m)内, 2 种直径棒电极在端部形状为半球或圆锥时所对应的 U_{50} 差别均小于其变异系数。因此可以认为, 当棒极直径小于临界半径时, 端部形状对棒-板间隙的放电电压没有明显影响。

2) 本文还研究了端部形状相同时棒电极直径变化对棒-板间隙放电电压的影响。在间隙距离为 2~5 m, 对圆锥或半球 2 种端部形状选择 3 种棒电

极直径进行了试验。试验结果表明,在试验间隙范围(2~5 m)内,圆锥和半球端部形状在棒电极直径变化时, U_{50} 的差别均小于其变异系数,因此,对不同的端部形状,当直径小于临界半径时,棒极直径的变化不会对棒-板间隙的操作冲击 50%放电电压产生明显影响。

3) 在不同海拔地区,对于给定的间隙距离,棒-板间隙都存在一个临界半径,且不同海拔地区各间隙对应的临界半径也有所不同。随着间隙距离的增加,高海拔地区临界半径增大的幅度要高于低海拔地区。对于较短间隙,各海拔高度下临界半径比较接近;随着海拔高度的增加,同一间隙距离对应的临界半径有所增加,且这个趋势随着间隙距离的增加而变得更加显著。

由于空气间隙的操作冲击放电特性受到气象因素和外界条件等各种因素的影响,本文仅是作者针对目前试验数据的分析和总结。后续将补充进行更多的试验,以对棒极结构对棒-板间隙操作冲击放电特性的影响做更为深入的研究。

参考文献

- [1] 张文亮,于永清,李光范,等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.
Zhang Wenliang, Yu Yongqing, Li Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7(in Chinese).
- [2] 张文亮,廖蔚明,丁玉剑,等. 不同海拔地区同塔双回±660 kV 直流线路杆塔空气间隙距离的选择[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 1-6.
Zhang Wenliang, Liao Weiming, Ding Yujian, et al. Selection of the minimum air clearance for ±660 kV double-circuit DC transmission line tower in different altitude areas[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 1-6(in Chinese).
- [3] 孙昭英,廖蔚明,丁玉剑,等. ±800 kV 直流输电工程空气间隙放电特性试验及间隙距离选择[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 8-12.
Sun Zhaoying, Liao Weiming, Ding Yujian, et al. Air gap flashover characteristics and selection of gap distances for ±800 kV UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 8-12(in Chinese).
- [4] 孙昭英,李庆峰,宿志一,等. ±800 kV 直流输电空气间隙外绝缘特性研究[J]. 中国电力, 2006, 39(10): 47-51.
Sun Zhaoying, Li Qingfeng, Su Zhiyi, et al. Study on external insulation of air gap of ±800 kV DC system [J]. Electric Power, 2006, 39(10): 47-51(in Chinese).
- [5] 陈勇,万启发,孟刚,等. 750 kV 输电线路杆塔间隙和塔宽对操作冲击放电电压的影响[J]. 电网与水力发电进展, 2007, 23(8): 8-11.
Chen Yong, Wan Qifa, Meng Gang, et al. Influences of tower gap and tower leg width on switching impulse discharge voltage of 750 kV transmission line [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2007, 23(8): 8-11(in Chinese).
- [6] 陈勇,孟刚,谢梁,等. 750 kV 同塔双回路输电线路空气间隙放电特性研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2118-2123.
Chen Yong, Meng Gang, Xie Liang, et al. Research on air-gap discharge characteristics of 750 kV one tower double-circuit transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2118-2123(in Chinese).
- [7] 张文亮,谷琛,廖蔚明,等. 超/特高压直流输电线路塔头间隙冲击放电特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 1-5.
Zhang Wenliang, Gu Chen, Liao Weiming, et al. Impulse voltage flashover characteristic of air gap in EHV/UHV DC transmission tower[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 1-5(in Chinese).
- [8] Taniguchi S, Okabe S, Asakawa A, et al. Flashover characteristics of long air gaps with negative switching impulses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 399-406.
- [9] Cortina R, Garbagnatienel E, Pignini A, et al. Switching impulse strength of phase-to-earth UHV external insulation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(11): 3161-3168.
- [10] Rizk F A M. Critical switching impulse strength of phase-to-phase air insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1492-1506.
- [11] Lings R. EPRI AC transmission line reference book: 200 kV and above[R]. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 2004.
- [12] The Les Renardieres Group. Breakdown phenomena of 5 m and 10 m rod-plane gaps in air with positive switching impulses[R]. France: CIGRE SC33, 1972.
- [13] Menemenlis C, Mcghllis D. Switching impulse breakdown of air gaps with application to the design of EHV/UHV external insulation[C]//International Conference on Large High Voltage Electric Systems. Boulevard Haussmann, Paris: CIGRE, 1974: 1-12.

- [14] Carrara G, Thione L. Switching surge strength of large air gaps: A physical approach[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(2): 512-524.
- [15] 全国高压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会. GB/T 16927. 1 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.
National High-voltage Test Techniques and Insulation Coordination Standardization Technical Committee. GB/T 16927. 1 High-voltage test techniques part 1: general test requirements[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997(in Chinese).
- [16] 全国高压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会. GB/T 16927. 2 高电压试验技术第二部分: 测量系统[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
National High-voltage Test Techniques and Insulation Coordination Standardization Technical Committee. GB/T 16927. 2 High-voltage test techniques: part 2: measuring systems[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997(in Chinese).
- [17] 范建斌, 谷琛, 殷禹, 等. ± 800 kV 管母线的电晕起始特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 47-52.
Fan Jianbin, Gu Chen, Yin Yu, et al. Research on corona onset performance of ± 800 kV busbar[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 47-52(in Chinese).



谷琛

收稿日期: 2011-03-16。

作者简介:

谷琛(1981), 女, 博士研究生, 工程师, 从事高电压与外绝缘技术等方面的研究, guchen@epri.sgcc.com.cn;

张文亮(1954), 男, 博士生导师, 教授级高级工程师, 主要从事高电压技术和电磁环境的研究, wlzhang@epri.sgcc.com.cn;

范建斌(1967), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事高电压与外绝缘技术方面的研究, Jianbin-fan@sgcc.com.cn。

(编辑 胡琳琳)