

高海拔 500 kV 交流线路空气间隙及海拔修正试验研究

罗琦¹ 王强¹ 李力¹ 丁玉剑² 艾鹏¹

(1. 西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要:介绍了在海拔4300 m地区对500 kV直线塔模拟塔头导线-塔身空气间隙的操作冲击放电、雷电冲击放电和工频放电特性试验研究,实验得到了塔头空气间隙不同电压的放电特性曲线。根据海拔0 m和海拔4300 m地区的500 kV塔头间隙的试验结果,采用插值法,计算得到了不同海拔地区的塔头空气间隙的放电电压,同时得到了海拔4000~5500 m地区塔头间隙冲击放电电压的海拔校正系数,推荐了适用的海拔校正方法。最后,给出了海拔4000 m以上500 kV输电线路所需的最小空气间隙距离值。

关键词:高海拔; 500 kV; 空气间隙; 海拔校正; 操作冲击; 雷电冲击; 工频放电

中图分类号: TM852 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)03-0017-08

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.03.005

Research on Air Gap Selection and Altitude Correction of 500 kV AC Transmission Lines in High Altitude Areas

Luo Qi¹, Wang Qiang¹, Li Li¹, Ding Yujian², Ai Peng¹

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In the region with the altitude of 4300 m, the researches on the characteristic tests of switching impulse discharge, lightning impulse discharge and power frequency discharge of line-tower air gaps are carried out on the simulation tower head of 500 kV tangent tower, and the discharge characteristics curves under different voltages are obtained. Based on the experimental data of tower head air gaps at altitude of 0 m and 4300 m, the discharge voltages of tower head air gap at the different altitudes are obtained, and the altitude correction coefficients for discharge voltages of tower head air gap at altitude of 4000~5000 m are also obtained through interpolation method. Finally, the minimum air gap required by 500 kV transmission lines at altitude of 4000 m and above is given and the applicable altitude correction method is recommended.

Key words: high altitude; 500 kV; air gap; altitude correction; switching impulse; lightning impulse; power frequency discharge

近年来,中国先后建设了乡城-水洛、川藏联网等500 kV电压等级的高海拔工程,上述工程中,输电线路塔头空气间隙的取值大都借鉴已有的海拔校正方法,或者在海拔较高的地区开展了少量的试验,所得结果不能完全满足后续西藏等高海拔地区500 kV输电工程建设的需求。为了确保500 kV输电工程在高海拔地区的可靠性,需要对高海拔地区空气间隙放电特性和海拔校正开展研究,通过试验研究获得海拔4000~5500 m地区500 kV输变电工程外绝缘特性的关键设计参数,为工程设计提供依据,确

保工程技术可靠性和经济性^[1-5]。

下面重点对高海拔地区500 kV输电线路空气间隙放电特性和海拔校正进行了研究,开展了高海拔地区500 kV输电线路的典型杆塔边相雷电冲击、操作冲击和工频放电特性试验,通过实验获得了相应的放电特性曲线,研究了海拔4000~5500 m地区的500 kV输电线路海拔校正系数,以此作为参考,探索了适用于此海拔高度下的海拔校正方法,并对海拔4000 m以上500 kV输电线路所需的最小空气间隙距离进行研究。

1 500 kV 输电线路绝缘配合和海拔校正方法分析

1.1 输电线路绝缘配合方法

国家标准 GB/T 50064 - 2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定了绝缘子串风偏后,导线对杆塔的空气间隙应当符合的操作过电压、雷电过电压及工频电压要求^[6]。

1.2 常用海拔校正方法分析

常用的海拔校正方法有 GB/T 16927.1 - 2011 中的海拔校正方法^[7]、IEC 60071 - 2: 1996 中的海拔校正方法^[8]、DL/T 620 - 1997 中的海拔校正方法^[9]、GB/T 2317.2 - 2008 中的海拔校正方法^[10]。

2 试验设备、试品和试验方法

2.1 试验设备

采用的试验装置包括北京昌平特高压直流试验基地的低海拔 7200 kV/480 kJ 冲击电压发生器及分压器、西藏羊八井高海拔试验基地的 4200 kV/200 kJ 冲击电压发生器及分压器等。

2.2 试品

参照高海拔 500 kV 输电线路塔头初设图,在不同海拔地区加工制作了相应的模拟塔头,保证试验布置完全一致。

试验时采用 I 串布置,复合绝缘子串长 5.7 m;均压环环径为 500 mm,管径为 45 mm,对上横担的间隙距离为 6 m;采用四分裂导线,导线线长 9 m,分裂间距为 400 mm。实际布置如图 1 所示。



图1 500 kV 试验布置

2.3 试验方法

试验按照 GB/T 16927.1 - 2011《高电压试验技

术第 1 部分:一般试验要求》和 GB/T 16927.2 - 2013《高电压试验技术第 2 部分:测量系统》规定的试验和测量方法进行。

1) 采用正极性 250/2500 μs 的标准操作冲击波作为操作冲击试验电压波形,采用正极性 1.2/50 μs 的雷电冲击波作为雷电冲击试验的波形。

2) 通过升降法计算 50% 放电电压 $U_{50\%}$,参考公式如式(1)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。

3) 试验的标准偏差 σ 按照式(2)计算。

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

4) 低海拔地区的试验电压数据根据试验时的气象条件修正到标准气象条件下。

5) 高海拔地区试验在 2017 年 8 月份进行,试验温度在 15 ~ 20℃ 间。

3 低海拔 500 kV 输电线路杆塔空气间隙放电特性

在北京昌平的特高压直流试验基地按照图 1 的布置开展了导线 - 塔身间隙工频放电特性、边相和中相空气间隙操作冲击放电特性以及雷电冲击放电特性、绝缘子串雷电冲击放电特性等试验研究。

3.1 操作冲击放电特性

为了对高海拔地区 500 kV 输电线路塔头间隙进行海拔校正,需要参考低海拔地区塔头间隙的冲击电压放电特性曲线。

对 500 kV 线路塔头的边相导线施加极性为正的的标准操作冲击电压,通过调整导线 - 塔身的空气间隙距离,得到不同间隙距离时边相导线 - 塔身的 50% 操作冲击放电电压。低海拔地区边相空气间隙的 50% 操作冲击放电电压与空气间隙距离的关系曲线如图 2 所示,其放电电压的相对标准偏差不大于 5%。塔身到均压环间隙距离为 2 ~ 4.5 m,其操作冲击放电电压为 900 ~ 1 450 kV。

3.2 雷电冲击放电特性

3.2.1 绝缘子串

对不同长度的 I 型绝缘子串实施了雷电冲击放

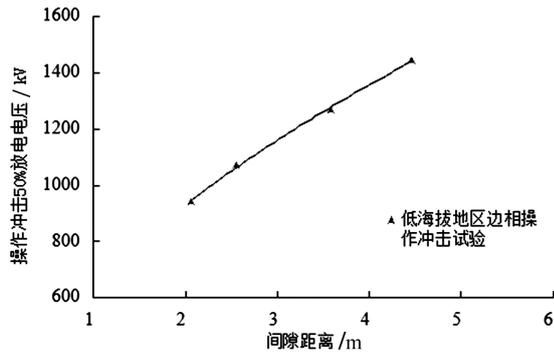


图 2 低海拔地区边相与中相导线 - 塔身操作冲击放电特性曲线

电特性试验。试验的绝缘子串长范围 1.8 ~ 4.80 m, 试验的雷电冲击电压范围为 1300 ~ 2900 kV。得到如图 3 所示低海拔地区 I 型绝缘子串 50% 雷电冲击放电电压与相对应的绝缘子串长的关系曲线。由曲线可以看出, 放电电压与绝缘子串长呈线性关系, 每个绝缘子串长度下放电电压的相对标准偏差不大于 3%。

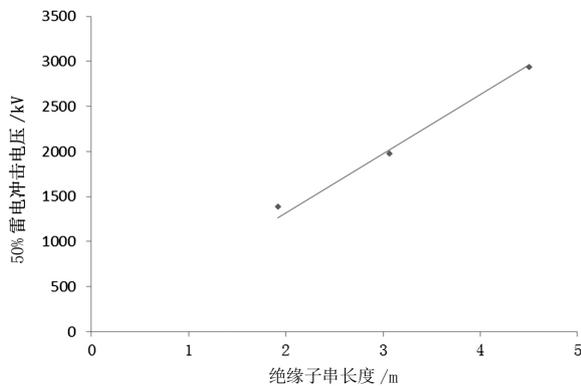


图 3 低海拔地区 I 型绝缘子串雷电冲击放电特性曲线

3.2.2 塔头间隙

在低海拔地区对导线 - 塔身间隙进行雷电冲击放电试验, 试验的间隙距离范围为 2 ~ 3.8 m, 放电电压的范围为 750 ~ 2400 kV, 得到低海拔地区导线 - 塔身空气间隙的 50% 雷电冲击放电电压和间隙距离的关系曲线, 如图 4 所示。可以看出, 在试验的间隙距离范围内, 导线 - 塔身间隙的 50% 雷电冲击放电电压和间隙距离值呈线性关系。

3.3 工频放电特性

采用实际尺寸模拟塔头和 3 分裂导线, 进行低海拔地区导线 - 塔身空气间隙的工频放电特性试验。试验的间隙距离范围为 0.5 ~ 2.0 m, 工频放电电压的范围为 250 ~ 700 kV。得到了如图 5 所示的放电特性曲线。可以看出, 在试验的电压和间隙距离范围内, 塔身工频放电电压和导线 - 塔身的间隙

距离基本呈线性关系。

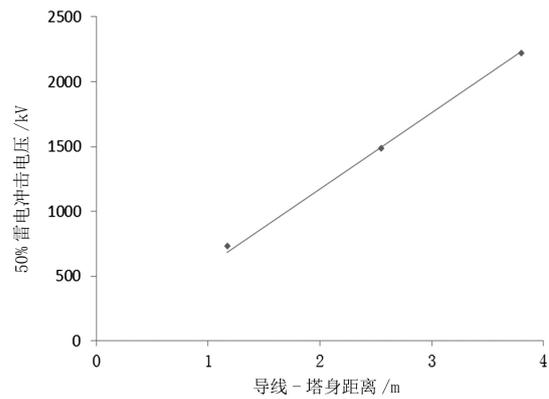


图 4 低海拔地区导线 - 塔身雷电冲击放电特性曲线

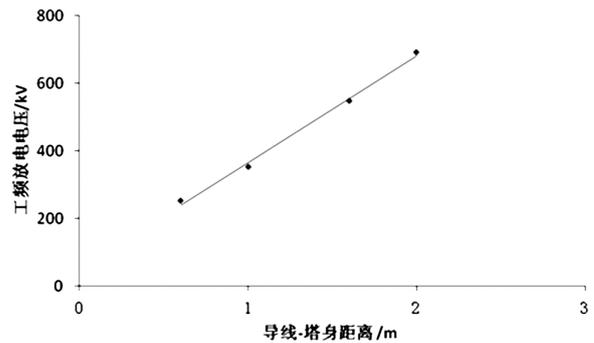


图 5 低海拔地区导线 - 塔身工频放电特性曲线

4 高海拔 500 kV 输电线路杆塔空气间隙放电特性

在西藏高海拔试验基地(羊八井, 海拔 4300 m)选用和低海拔地区尺寸完全一致的模拟塔头, 进行了边相导线 - 塔身间隙的操作冲击、雷电冲击及工频放电特性实验。

4.1 边相操作冲击放电特性

对边相施加正极性标准操作冲击电压, 得到图 6 所示的塔头空气间隙的 50% 操作冲击放电电压与间隙距离的关系曲线。图 7 为试验时边相操作冲击放电照片。

4.2 雷电冲击放电特性

4.2.1 绝缘子串

试验的绝缘子串长范围为 1.6 ~ 4.1 m, 试验的雷电冲击电压范围为 500 ~ 1400 kV。得到图 8 所示的高海拔地区 I 型绝缘子串 50% 雷电冲击放电电压与绝缘子串长度的关系曲线。可以看出, 在高海拔地区同低海拔地区一样, 放电电压与绝缘子串长度呈线性关系。图 9 为边相绝缘子串雷电冲击放电照片。

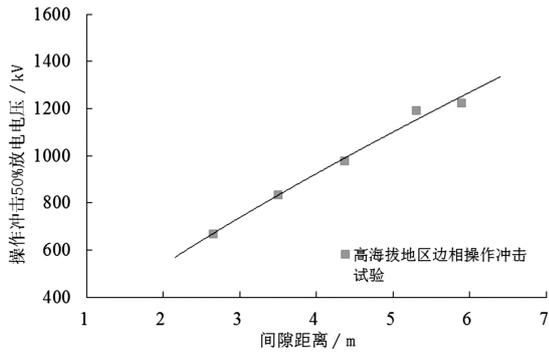


图6 高海拔地区相导线-塔身操作冲击放电特性曲线



图7 高海拔地区边相导线-塔身操作冲击放电

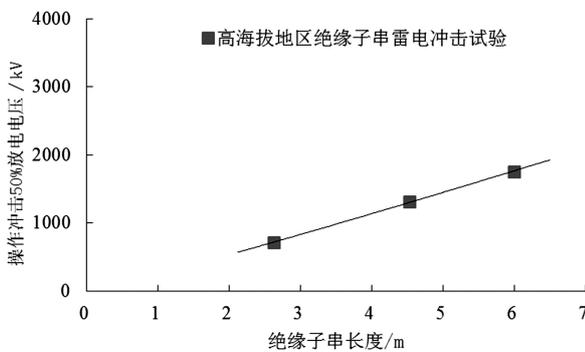


图8 高海拔地区绝缘子串雷电冲击放电特性曲线



图9 高海拔地区边相绝缘子串雷电冲击放电

4.2.2 空气间隙

对高海拔地区导线-塔身空气间隙进行雷电冲击放电特性试验。试验的导线-塔身空气间隙范围为2.0~5.0 m,试验的雷电冲击电压范围为600~1800 kV。得到图10所示的塔头空气间隙的50%

雷电冲击放电电压和间隙距离的关系曲线。

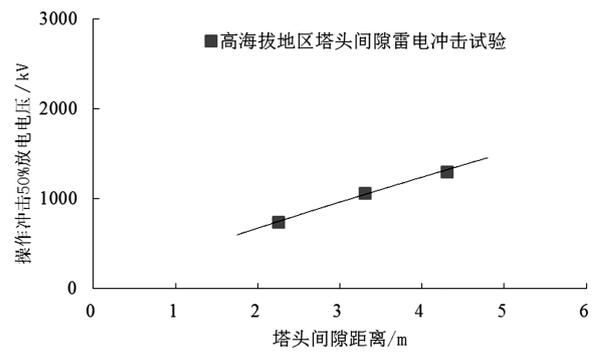


图10 高海拔地区导线-塔身雷电冲击放电特性曲线

4.3 工频放电特性

高海拔地区的导线-塔身的工频放电特性试验间隙距离范围为0.5~2.0 m,间隙的工频闪络电压范围为150~500 kV,得到图11所示的高海拔地区塔身-导线工频放电电压与间隙距离的关系曲线。

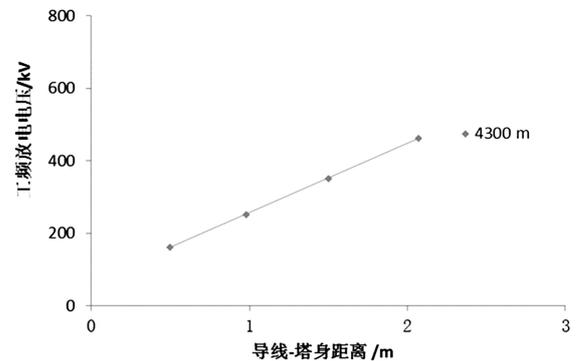


图11 高海拔地区导线-塔身工频间隙放电特性曲线

5 500 kV 输电线路杆塔空气间隙放电电压的海拔校正

为分析在海拔4300 m地区现有的海拔校正方法的适用性,需要将前述4种标准推荐的大气校正方法外推用于海拔4300 m地区,并通过计算得到导线-塔身空气间隙的工频冲击放电电压、操作冲击放电电压和雷电冲击放电电压的海拔校正系数,并和试验值进行比较。海拔校正系数试验值为低海拔地区的试验数据校正到标准气象条件后与海拔4300 m地区的试验数据的比值。

5.1 塔头间隙操作冲击电压海拔校正系数

采用不同海拔校正方法得到的导线-塔身间隙操作冲击放电电压的海拔校正系数如表1所示,图12为不同间隙距离时操作冲击放电电压的海拔校正系数的曲线。

表1 不同海拔校正方法的导线-塔身空气间隙
操作冲击放电电压的校正系数

校正方法	GB/T 16927.1-2011	IEC 60071-2:1996	DL/T 620-1997	GB/T 2317.2-2008	试验值
海拔校正系数	1.52 ~ 1.25	1.61 ~ 1.47	1.56 ~ 1.30	1.65	1.73 ~ 1.39

从表1和图12可以看出:在间隙距离小于2.5 m时,试验得到的海拔校正系数大于GB/T 16927.1-2011、IEC 60071-2:1996、DL/T 620-1997和GB/T 2317.2-2008的校正系数;随着间隙距离的增大,试验值趋近于IEC 60071-2:1996的校正系数。

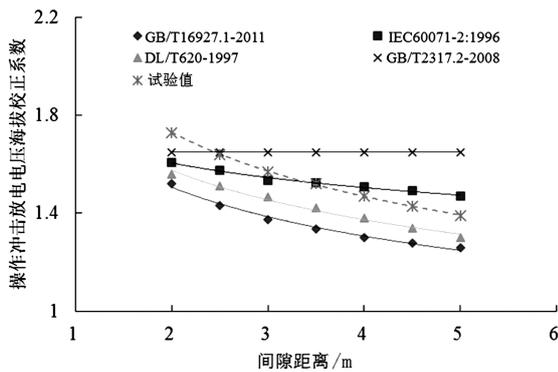


图12 导线-塔身空气间隙操作冲击放电电压海拔校正系数的曲线

综合来看,对于海拔4300 m地区500 kV导线-塔身空气间隙的操作冲击放电电压的海拔校正,间隙距离在2.0~5.0 m时,可按IEC 60071-2:1996的方法来选取,但是间隙距离越大需要保留的裕度也要越大。因此,对于高海拔、长气隙操作冲击放电电压的海拔校正,选用相同试品在不同海拔高度开展实际试验,经过对比分析得到的海拔校正系数较为可靠。

5.2 雷电冲击电压海拔校正系数

采用不同的海拔校正方法得到的绝缘子串和塔头间隙雷电冲击放电电压的海拔校正系数见表2。

表2 导线-塔身空气间隙雷电冲击放电电压
不同海拔校正方法的校正系数

校正方法	GB/T 16927.1-2011	IEC 60071-2:1996	DL/T 620-1997	GB/T 2317.2-2008	试验值
海拔校正系数	1.52 ~ 1.67	1.69	1.66	1.65	1.78 ~ 1.87

从表2可以看出:GB/T 16927.1-2011、IEC 60071-2:1996、DL/T 620-1997和GB/T 2317.2-2008得出的海拔校正系数较试验值偏低。因此,对

于高海拔、长气隙雷电冲击放电电压的海拔校正,选用相同试品在不同海拔开展实际试验,经过对比分析得出相应的海拔校正系数较为可靠。

5.3 工频电压海拔校正系数

运用不同海拔校正方法获得的导线-塔身间隙工频放电电压的海拔校正系数见表3。图13为试验得到的不同间隙距离时海拔校正系数的曲线。

由表3和图13看出:在海拔4300 m地区,500 kV输电线路塔头空气间隙工频电压试验值的海拔校正系数随着间隙的增大而呈现增大趋势,且增大的速度逐渐变小。

表3 采用不同海拔校正方法时导线-塔身空气
间隙工频放电电压的校正系数

校正方法	GB/T 16927.1-1997	IEC 60071-2:1996	DL/T 620-1997	GB/T 2317.2-2008	试验值
海拔校正系数	1.61 ~ 1.30	1.69	1.78 ~ 1.61	1.65	1.31 ~ 1.50

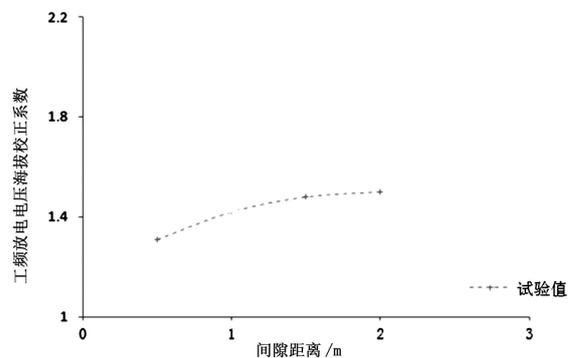


图13 导线-塔身空气间隙工频放电电压的海拔校正系数的曲线

综合来看,对于海拔4300 m地区的500 kV输电线路,间隙距离为0.5~2 m时,上述4种标准推荐方法的校正结果与试验的结果相差较大。因此,对于高海拔、长气隙工频放电电压的海拔校正,选取相同试品在不同海拔开展实际试验,经过对比分析得出相应的海拔校正系数较为可靠。

6 500 kV 输电线路空气间隙距离的选择

6.1 选择原则

6.1.1 不同海拔下500 kV输电线路操作冲击电压的间隙推荐

风偏后导线对杆塔空气间隙在正极性操作冲击

电压波下的 50% 放电电压 $U_{s.l.s}$ 应满足式 (3) 的限制条件:

$$U_{s.l.s} \geq K_3 U_0 \quad (3)$$

式中: K_3 为空气间隙操作过电压统计配合系数, 在 500 kV 输电线路中取 1.1; U_0 为 500 kV 线路相对地统计操作过电压, 取空载线路合闸、单相重合闸和成功的三相重合闸 3 种情况下的较高值, 一般不大于 2.0 p.u.。

根据式 (3) 可计算出 500 kV 输电系统要求的 1.8 p.u.、2.0 p.u. 下的 50% 操作冲击放电电压。根据海拔 4300 m 地区的试验值, 采用线性插值法可分别求得海拔 1000 m、3000 m、4000 m、5000 m、5500 m 地区的操作冲击放电电压和导线-塔身空气间隙关系曲线, 如图 14 所示。由此计算了不同海拔高度下 500 kV 输电线路符合操作冲击放电电压要求的空气间隙, 如表 4 所示。

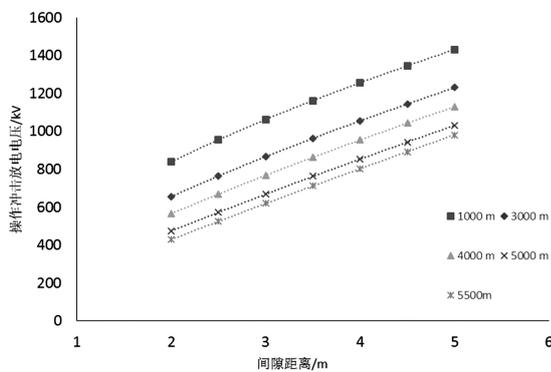


图 14 不同海拔条件下塔头间隙的操作冲击放电电压与间隙距离的关系曲线

表 4 符合操作冲击放电电压要求的不同海拔间隙距离推荐值

过电压倍数	推荐间隙 /m				
	1000 m	3000 m	4000 m	5000 m	5500 m
1.8 (889 kV)	2.30	3.30	3.70	4.20	4.40
2.0 (988 kV)	2.73	3.80	4.30	4.70	5.00

在过电压倍数为 2.0 条件下, 海拔 5500 m 地区操作冲击过电压的间隙距离不应小于 5.0 m。

6.1.2 不同海拔下 500 kV 输电线路雷电冲击放电电压下的间隙推荐

根据海拔 0 m 和 4300 m 地区绝缘子串的雷电放电电压与绝缘子串长的关系, 采用线性插值法分别求得了海拔 1000 m、3000 m、4000 m、5000 m、

5500 m 雷电冲击放电电压与绝缘子串长的关系曲线, 如图 15 所示。

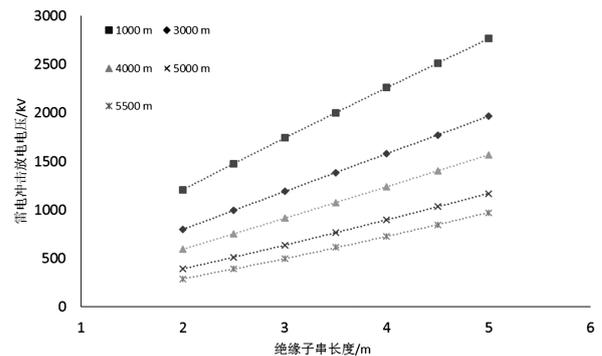


图 15 不同海拔下雷电冲击放电电压与绝缘子串长度的关系曲线

同理, 根据海拔 0 m 和 4300 m 地区雷电放电电压与导线-塔身空气间隙的关系, 采用线性插值法分别求得了海拔 1000 m、3000 m、3500 m、4000 m、4500 m、5000 m 雷电冲击放电电压与导线-塔身间隙的关系曲线, 如图 16 所示。

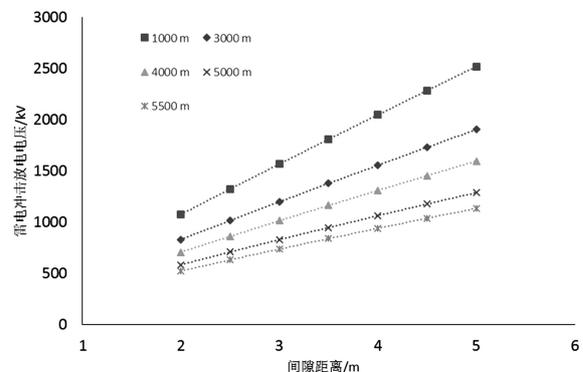


图 16 不同海拔下雷电冲击放电电压与导线-塔身间隙距离的关系曲线

其中, 绝缘子串长度需要根据文献 [1] 中推荐的不同海拔下污秽等级分别为 a、b、c 时的绝缘子串片数及长度来进行计算。

经试验分析, 不同海拔下绝缘子片数和串长关系如表 5 所示。

GB/T 50064-2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定风偏后导线对杆塔空气间隙的正极性雷电冲击电压波 50% 放电电压, 可作为相应绝缘子串电压的 0.85 倍 (此处选择 b 级污秽区的绝缘子串长), 计算得到不同海拔地区的雷电要求的间隙距离取值见表 6。

6.1.3 不同海拔下 500 kV 输电线路工频电压下的间隙推荐

通过计算可得, 500 kV 输电系统要求的工频电

表5 500 kV 绝缘子片数和串长(I串)

污秽等级	3000 m		4000 m		5000 m		5500 m	
	片数/片	串长/m	片数/片	串长/m	片数/片	串长/m	片数/片	串长/m
b级 (0.05 mg/cm ²)	25	4.25	27	4.59	29	4.93	30	5.10
c级 (0.1 mg/cm ²)	30	5.10	32	5.44	34	5.78	35	5.95

表6 满足雷电冲击放电电压要求的塔头空气间隙推荐值

污秽等级	空气间隙推荐值 /m			
	3000 m	4000 m	5000 m	5500 m
b级 (0.05 mg/cm ²)	3.50	3.80	4.10	4.20
c级 (0.1 mg/cm ²)	4.00	4.40	4.70	4.90

压为445 kV。根据海拔4300 m和海拔0 m地区的试验值,采用插值的方法,可求得不同海拔条件下的工频放电电压和导线-塔身空气间隙关系曲线,如图17所示。由此计算了不同海拔下500 kV输电线路符合工频放电电压要求的空气间隙,如表7所示。

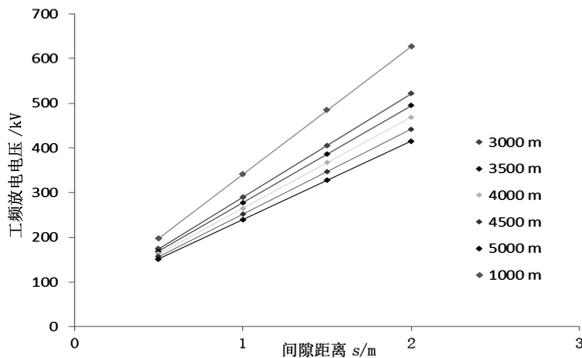


图17 不同海拔下工频放电电压与间隙距离的关系曲线

表7 符合工频电压要求的不同海拔间隙距离推荐值

海拔高度/m	3500	4000	4500	5000
推荐间隙距离/m	1.80	1.90	2.05	2.20

6.2 不同类型电压要求的最小间隙距离取值

海拔3000~5000 m范围内,以过电压为2.0 p.u.为例,500 kV输电线路所需的最小间隙距离值如表8所示。

7 结 语

1) 在海拔4300 m地区,对500 kV直线塔边相

表8 海拔3000~5000 m范围内500 kV输电线路要求的最小空气间隙距离值

电压类型	推荐间隙/m			
	3000 m	4000 m	5000 m	5500 m
操作冲击	3.80	4.30	4.70	5.00
雷电冲击	4.00	4.40	4.70	4.90
工频电压	1.70	1.90	2.20	2.35

进行了间隙冲击放电特性试验,得到了操作冲击放电电压和雷电冲击放电电压特性曲线。

2) 分析了常用海拔校正方法外推到海拔4300 m地区后的海拔校正系数,计算得到的操作冲击放电电压的海拔校正结果与试验所得结果相差较多,而雷电冲击放电电压的海拔校正系数和试验值较为接近。

3) 推荐了海拔3000~5500 m的500 kV输电线路塔头在1.8 p.u.和2.0 p.u.过电压条件下操作冲击放电电压所需的空气间隙距离值,即海拔5000 m时间隙为4.7 m,海拔5500 m时间隙为5.00 m。

4) 推荐了海拔3000~5500 m的500 kV输电线路塔头雷电冲击放电电压要求的空气间隙距离值,海拔5500 m时间隙为4.90 m。

5) 推荐了海拔3000~5500 m的500 kV输电线路塔头工频放电电压所需的空气间隙距离值,海拔5500 m时间隙为2.35 m。

参考文献

- [1] 孙昭英,丁玉剑,廖蔚明,等. 青藏直流联网工程空气间隙的海拔校正[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 8-12.
- [2] 赵宇明,黎小林,吕金壮,等. 高海拔地区外绝缘参数海拔修正方法研究[J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 59-63.
- [3] 方启发,霍锋,谢梁,等. 长空气间隙放电特性研究综述[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2499-2505.
- [4] 谷琛,张文亮,范建斌. 超/特高压输电工程典型间隙操作冲击放电特性试验研究综述[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 11-17.
- [5] 张楚岩,张福增,陈昌龙,等. 高海拔地区直流特高压大尺寸复合外绝缘污闪特性研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 20-28.
- [6] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064-2014[S], 2014.
- [7] 高电压试验技术 第1部分: 一般定义及试验要求: GB/T 16927.1-2011[S], 2012.
- [8] Insulation Coordination, Part 2: Application Guide(3rd

ed.) : IEC 60071 - 2: 1996 [S], 1996.

- [9] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620 - 1997 [S], 1998.
- [10] 电力金具试验方法: GB/T 2317.2 - 2008 [S], 2008.
- [11] 罗强, 罗鸣, 黄瑞平, 等. 高海拔 500 kV 输电线路绝缘子污闪特性试验研究 [J]. 四川电力技术, 2018, 41 (3): 25 - 30.

作者简介:

罗琦(1964), 高级工程师, 从事输电线路技术设计;

(上接第5页)

- [7] 熊浩, 孙才新, 廖瑞金, 等. 基于核可能性聚类算法和油中溶解气体分析的电力变压器故障诊断研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 162 - 166.
- [8] 董明, 孟源源, 徐长响, 等. 基于支持向量机及油中溶解气体分析的大型电力变压器故障诊断模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 88 - 92.
- [9] 黄卫春, 刘建林, 熊李艳. 基于样本 - 特征值加权的可能性模糊核聚类算法 [J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(1): 169 - 176.
- [10] 宋志杰, 王健. 模糊聚类和 LM 算法改进 BP 神经网络的变压器故障诊断 [J]. 高压电器, 2013, 49(5): 54 - 59.
- [11] 李俭, 孙才新, 陈伟根, 等. 灰色聚类与模糊聚类集成诊断变压器内部故障的方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 112 - 115.
- [12] 陈灿. 基于粒子群算法的模糊聚类研究 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2005.
- [13] 李超顺, 周建中, 安学利, 等. 基于加权模糊核聚类的发电机组振动故障诊断 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(35): 79 - 83.
- [14] 周开乐, 杨善林, 丁帅, 等. 聚类有效性研究综述 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(9): 2417 - 2431.
- [15] 范九伦, 吴成茂. 可能性划分系数和模糊变差相结合的聚类有效性函数 [J]. 电子与信息学报, 2002, 24(8): 1017 - 1021.
- [16] Xie X L, Beni G. A Validity Measure for Fuzzy Clustering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(8): 841 - 847.
- [17] Yue Shihong, Wang J, Wu T, et al. A New Separation Measure for Improving the Effectiveness of Validity Indices [J]. Information Science, 2010, 180(5): 411 - 423.
- [18] 岳士弘, 黄媿, 王鹏龙. 基于矩阵特征值分析的模糊聚类有效性指标 [J]. 天津大学学报, 2014, 47(8): 689 - 696.
- [19] Watking D S. Fundamentals of Matrix Computation [M]. USA: John Wiley & Sons, 2002.
- [20] 马叶芝, 焦彦军, 王东升, 等. 变压器故障诊断中溶

王强(1965), 硕士、教授级高级工程师, 从事输电线路技术研究及设计工作;

李力(1963), 教授级高级工程师, 从事输电线路技术研究及设计;

丁玉剑(1982), 硕士、高级工程师, 从事超高压输电研究工作;

艾鹏(1991), 硕士、助理工程师, 从事输电线路技术设计。
(收稿日期: 2018 - 01 - 15)

解气体的 PSO - WFCM 算法研究 [J]. 高压电器, 2014, 50(1): 72 - 76.

- [21] 田质广, 张慧芬. 基于遗传聚类算法的油中气体溶解气体分析电力变压器故障诊断 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(2): 15 - 18.
- [22] 雷浩籍, 刘念, 崔东军, 等. 基于 GA 与 PSO 混合优化 FCM 聚类的变压器故障诊断 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 52 - 56.
- [23] 董慧康. 基于人群搜索 - 支持向量机的心脏病多生理参数诊断方法研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [24] 魏立兵, 赵峰, 王思华. 基于人群搜索算法优化参数额支持向量机短期电力负荷预测 [J]. 电测与仪表, 2016, 53(8): 45 - 49.
- [25] 周健, 黄昕, 邹剑, 等. 变压器油中溶解气体故障诊断的改进模糊算法 [J]. 广东电力, 2015, 28(3): 86 - 91.
- [26] 孙才新, 郭俊峰, 廖瑞金, 等. 变压器油中溶解气体分析中的模糊模式多层聚类故障诊断方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 37 - 41.
- [27] 韩富春, 廉建鑫, 高文军, 等. 改进 PSO 与模糊聚类相结合的变压器故障诊断 [J]. 电气技术, 2011, 5(2): 1 - 4.

作者简介:

陶飞达(1986), 高级工程师, 主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

吴杰康(1965), 教授、博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制等;

曾振达(1984), 高级工程师, 主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

梁浩浩(1993), 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制等;

邹志强(1987), 工程师, 主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

张丽平(1977), 工程师, 研究方向为配电系统运行与控制等;

黄智鹏(1988), 助理工程师, 主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

杨夏(1982), 工程师, 主要从事配电网管理及新技术的应用研究。
(收稿日期: 2018 - 03 - 16)