

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.05.006

高海拔地区变电站外绝缘及空气间隙设计

廖晓宇¹, 樊非之², 肖强晖¹, 曾进辉¹

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南省电力勘探设计院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 针对我国实际应用中西藏高海拔地区的外绝缘水平及空气间隙与平原地区不同的问题, 为得到高海拔设计经验, 通过实地实验获得的图形曲线, 提出了将实际环境与理论公式相结合的方法, 并结合设计规范中的修正公式得到了修正结论。结果表明: 工程应用的爬电比距可通过统一爬电比距和现场污染度的关系经公式修正得到, 且可通过计算得出绝缘子片数在工程中的实际用量, 还可通过结合实验图形和修正公式得出实际应用的外绝缘水平以及空气间隙。

关键词: 超高海拔环境; 外绝缘水平; 爬电距离; 空气间隙

中图分类号: TM854

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)05-0032-07

A New Design of External Insulation and Air Gap Clearance at Ultra-High Altitude

LIAO Xiaoyu¹, FAN Feizhi², XIAO Qianghui¹, ZENG Jinhui¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Hunan Electric Power Design Institute, Changsha 410000, China)

Abstract: In view of the differences between the external insulation level and air gap clearance in practical application at high altitude areas in Tibet and those in plain areas in China, a new method, which combines the actual environment with theoretical formula, has thus been proposed, based on the graphical curves obtained from field experiments, so as to gain high altitude design experience. Combined with the revised formula in the design specification, the revised conclusion is to be obtained subsequently. The results show that the creep ratio distance in engineering application can be obtained by modifying the formula of the relationship between the creep ratio distance and the field pollution degree; a calculation can be achieved of the actual amount of the number of insulator pieces in engineering; the external insulation level and air gap clearance can be obtained by combining experimental graphics and correction formula.

Keywords: ultra-high altitude environment; external insulation level; creepage distance; air gap

1 研究背景

在高海拔地区, 随着海拔高度的不断增加, 空

气密度逐渐降低, 导致相同空气间隙的绝缘水平(放电电压)逐渐降低。由此可见, 设计合理的空气间隙是电网安全和经济运行的关键^[1-6], 而对于高海拔下

收稿日期: 2018-04-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51607064), 湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ5038)

作者简介: 廖晓宇(1992-), 男, 湖南怀化人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力网络自动化技术及应用,
E-mail: 378167880@qq.com

通信作者: 曾进辉(1981-), 男, 湖南永州人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为交直流电能变换与控制,
E-mail: zeng_jinhui@126.com

空气间隙的修正有着重要的现实意义,但是我国当前对于高海拔变电站外绝缘以及空气间隙的修正研究体系尚未成熟。云南电网公司分别在海拔 2 900 m 和 3 500 m 处建立了 500 kV 变电站,其设计经验和对空气间隙的研究方法对往后的高海拔设计有着重要的示范作用。但是,在已有文献中,并未见海拔不低于 3 500 m 的高海拔外绝缘与空气间隙方面的研究,这表明我国在高海拔外绝缘与空气间隙方面的研究仍然存在空缺。

国外在低海拔(高度低于 2 000 m)、气候多变的环境中,针对变电站外绝缘与空气间隙的关系进行了大量实验和理论研究。例如,1970 年,日本分别在海拔 0 m 和 1 850 m 处进行了空气间隙 1~3 m 的棒-棒、棒-板放电对比实验,得知气隙的修正不仅与空气稀薄程度有关,还与空气的相对湿度有很大关系。1985 年,科研工作者们分别在意大利、南非和墨西哥等地区不同高度(海拔高度分别为 0, 1 540, 1 800 m)处进行了空气间隙实验,通过板-棒、板-导线、铁塔-导线、棒-棒、棒-导线实验,得知绝缘水平(放电电压)与空气密度成比例关系。迄今为止,国外将在海拔 2 000 m 内取得的成果,形成了相应的海拔修正规范,但对于海拔高于 3 000 m 甚至是 4 000 m 的情况鲜有研究,也缺乏相应的实验数据和成果。

藏中联网工程是 2018 年国家电网的一号工程,其沿线变电站的平均海拔高度为 3 400~4 300 m,因此,针对高海拔地区的绝缘特性研究有着迫切需要。本研究参考了 2 座位于云南的高海拔 500 kV 变电站设计经验,通过实验得到不同空气间隙的操作电压和雷电冲击电压放电曲线,结合修正公式,得到了实际应用中的 3 400 m 到 4 500 m 的空气间隙以及外绝缘水平,以期为国家电网中高海拔变电站的设计与建造提供参考依据。

2 爬电距离及绝缘子片数量

2.1 污秽等级与爬电距离的选择

依据 Q/GDW1152.1—2014《电力系统污区分级与外绝缘选择标准 第 1 部分交流系统》^[7],对污区等级进行划分,并对爬电距离进行选择。

据《西藏污区分布图》显示,本工程所辖 7 座 500 kV 变电站的污秽度均不超过 c 级。考虑各地区今后的发展程度和高海拔地区的特殊环境要求,且为了与川藏联网工程保持一致,本研究中将各变电站的污秽等级统一提高至 d 级污秽度,对绝缘子串片数进行选择。依照国家标准,各污秽等级下的爬电比距值

如表 1 所示^[7]。

表 1 各污秽水平下绝缘子的盐密和爬电比距
Table 1 Parameters of equivalent salt deposit density and creepage distances for insulators of various degrees of contamination

污秽等级	盐密 / ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	额定线电压下爬电 比距 / ($\text{mm} \cdot \text{kV}^{-1}$)	统一爬电比距 / ($\text{mm} \cdot \text{kV}^{-1}$)
a	≤ 0.03	16	25.2
b	0.04~0.06	17~20	25.3~31.5
c	0.07~0.10	21~25	31.6~39.4
d	0.11~0.24	26~32	39.5~50.4
e	≥ 0.25	33~38	50.5~59.8

根据图 1 所示水平轴(现场污秽水平)与垂直轴(统一爬电比距)的关系,确定 7 座变电站统一的爬电比距为 44 mm/kV。

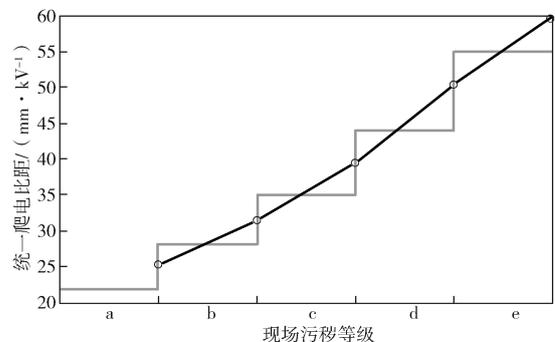


图 1 统一爬电比距和现场污秽水平关系图

Fig. 1 Diagram showing the relationship between the creepage distance and spots of various contamination degrees

根据国家电网公司发布的 Q/GDW13001—2014《高海拔外绝缘配置技术规范》中的要求^[8],一次电气设备在高海拔地区进行有效爬电距离修正时,其最小值 L 可以由式(1)进行整定。

$$L \geq K_d \lambda U_m / \sqrt{3}. \quad (1)$$

式中: L 为通过上式进行高海拔修正后的一次电气设备有效爬电距离的最小值,单位为 mm;

λ 为修正前按国家标准选取的统一爬电比距,单位为 mm/kV;

U_m 为所处电压等级的最高线电压,单位为 kV;

K_d 为户外式一次设备进行高海拔修正时的放大因子。

K_d 值的选取并非是固定不变的,其与外挂瓷件绝缘子的直径 D_m 相关。对于不同的外挂瓷件绝缘子直径,使用相对应的污秽放大因子 K_d :

- 1) 当 $D_m < 300 \text{ mm}$ 时,取 $K_d=1.0$;
- 2) 当 $300 \text{ mm} \leq D_m \leq 500 \text{ mm}$ 时,取 $K_d=1.1$;
- 3) 当 $D_m > 500 \text{ mm}$ 时,取 $K_d=1.2$ 。

除了以上整定标准外,按照 Q/GDW13001—

2014《高海拔外绝缘配置技术规范》^[8]中的规定，还应遵循以下2点原则：

1) 对于变电站来说，其户外型一次设备的外绝缘有效爬电距离可以直接采用原来的值，而不用进行修正。

2) 对于缺乏实验数据以及曲线图的地区，有效爬电距离直接按式(1)进行整定。

根据工程实际需要，结合表1与式(1)，给出了不同海拔高度修正后的爬电比距推荐值，见表2。

表2 爬电比距的推荐值

Table 2 Parameters of different creepage ratios at different altitudes

海拔/m	3 400	4 000	4 200	4 500
爬电比距/(mm·kV ⁻¹)	51	52	53	54

2.2 绝缘子串片数选择

本工程所辖的7座变电站，各自的平均海拔高度为3 400~4 300 m。为使工程具备更强的针对性，本文按照3 400, 4 000, 4 200, 4 500 m共4个海拔等级进行修正，本工程各变电站可以根据自身海拔高度进行等级选择，表3给出了不同海拔高度的绝缘子串数量的选择原则。

表3 不同海拔高度的绝缘子串片数选择原则

Table 3 Parameters of the principle of selecting the number of insulator strings at different altitudes

海拔/m	500 kV		220 kV		110 kV	
	耐张绝缘子	悬垂绝缘子	耐张绝缘子	悬垂绝缘子	耐张绝缘子	悬垂绝缘子
3 400	41	40	21	20	12	11
4 000	43	42	21	20	13	12
4 200	44	43	22	21	13	12
4 500	45	44	23	22	13	12

综合比较中华人民共和国住房和城乡建设部与中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局发布的GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》^[9]与四川电网联网输变电工程可行性研究变电部分中的耐压绝缘子串片数修正方法，发现在高海拔地区，需要通过增加绝缘子的数量来增强系统的绝缘能力，即增强其电压耐受水平，修正后的绝缘子串数应如式(2)所示。

$$N_H = N[1 + 0.1(h - 1)] \quad (2)$$

式中： N 为海平面时横向耐张绝缘子串的数量；

N_H 为修正后横向耐张绝缘子串的数量， H 为实际海拔高度，单位为m；

h 为实际海拔高度值/1 000所得的比例系数。

按照国家标准修正绝缘子串的片数时，通常以

泄漏距离为450 mm的单片绝缘子为基准，因此应取2~3片耐张零值绝缘子承受线路的张力，且应取1~2片悬垂零值绝缘子承受线路的重力。

3 500 kV 变电站外绝缘水平计算

3.1 电气设备额定耐受电压

根据国家标准规定^[8]，海拔为1 000 m及以下地区正常气候工作条件下，电气一次设备的额定耐受电压应符合表4的规定。

表4 各个电压等级下设备外绝缘的额定耐受电压

Table 4 Parameters of rated withstand voltage of external insulation of equipment at various voltage levels kV

系统标称电压	设备最高电压	额定雷电冲击耐受电压	额定操作冲击耐受电压	额定短时工频耐受电压(有效值)
500	550	1 675	1 175	740
220	252	1 050	750	460
110	126	550	-	230

3.2 外绝缘放电电压的海拔修正

根据国家标准的规定^[9]，当外绝缘并非处于海平面且存在垂直方向的高度差时，需要通过式(3)和(4)对其放电电压 $U(P_H)$ 进行修正。

$$U(P_H) = KaU(P_0) \quad (3)$$

$$Ka = e^{m(H/8150)} \quad (4)$$

式(3)(4)中： $U(P_H)$ 为基准放电电压，即海平面高度为0 m时的放电电压，单位为kV。

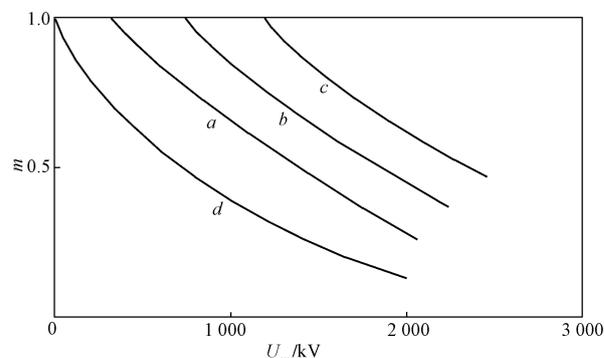
Ka 为海拔校正因数；

m 为放电系数。

另外，放电系数 m 的值应当满足以下2点要求：

1) 在有雷电冲击电压且空气间隙和干净的绝缘子中存在短时工频电压的情况下， m 应取1.0；

2) 对于平常的操作冲击电压， m 应按实验所得曲线图2进行选取。



a—相对地绝缘；b—纵绝缘；c—相间绝缘；d—棒-板间隙

图2 各种作用电压下的 m 值

Fig. 2 Values of m under various applied voltages

3.3 外绝缘耐受电压的海拔修正

根据表4中给出的电气设备在海拔1000 m及以下地区正常气候条件工作时的外绝缘额定耐受电压值, 先将图2中的各种作用电压下的 m 值数值换算到0 m海拔高度的对应值, 再分别计算出海拔高度为3400, 4000, 4200, 4500 m时所对应的数值。

3.3.1 电气设备的雷电冲击耐受电压和工频耐受电压修正

0 m海拔高度的电气设备雷电冲击耐受电压计算式如下:

$$Ka_1 = e^{m_1(1000/8150)}, \quad (5)$$

$$U(P_0) = U(P_{1000}) / Ka_1. \quad (6)$$

当变电站的海拔高度为 H 时, 在雷电冲击的情况下, 对电气设备的耐受电压和工频的耐受电压进行如下校正:

$$Ka_2 = e^{m_2(H/8150)}, \quad (7)$$

$$U(P_H) = Ka_2 \times U(P_0). \quad (8)$$

式(5)和(7)中 m_1 和 m_2 都取值1.0。

3.3.2 电气设备的操作冲击耐受电压修正

根据图2可以得知, $m_1=0.62$, 将其代入式(5)可以得出 $U(P_0)=1088$ kV; 对应地可以查得 $m_2=0.7$, 将其代入式(7)(8), 即可以得到不同海拔操作冲击耐受电压下的计算结果。

按照上面描述的方法, 可以分别计算出系统标称电压为500 kV条件下, 海拔高度为3400, 4000, 4200, 4500 m时, 电气设备雷电冲击的耐受电压, 具体结果如表5所示。

表5 各海拔高度的设备外绝缘水平

Table 5 Parameters of external insulation levels at different altitudes

系统标称电压 / kV	海拔高度 H/m	额定雷电冲击耐受电压 /kV	额定操作冲击耐受电压 /kV	额定短时工频耐受电压 (有效值) /kV
500	3400	2249	1457	994
	4000	2322	1535	1070
	4200	2421	1561	1096
	4500	2574	1672	1137

4 500 kV 变电站外绝缘水平计算

4.1 500 kV 电压等级空气间隙距离计算原理

4.1.1 架构相对地空气间隙的计算原理

500 kV 系统标称电压等级下的每相对地空气间隙距离应符合国家标准 Q/GDW13001—2014^[8]。由相关标准可以得知, 变电站导线的空气间隙设置应符合

以下3点要求。

1) 变电站相对于零点位点的工频电压, 在无风偏的情况下, 杆塔和变电站导线之间的空气间隙工频的50%放电电压应当满足式(9)的要求:

$$u_{s-v} \geq k_6 U_{p,g} \quad (9)$$

式中: $U_{p,g}$ 为每相对于零点位点的最大工频过电压值, 单位为kV, 此处取标么值的1.4 p.u.;

k_6 为工频过电压配合系数, 取1.15。

2) 变电站的相对于零电位点的空气间隙, 在正极性操作的条件下, 对于冲击电压波50%的放电电压应按照式(10)取值:

$$u_{s,s} \geq k_7 U_{s,p} \quad (10)$$

式中: $U_{s,p}$ 为保护电压水平, 单位为kV, 其值反映了避雷器在面对操作冲击电压下的保护能力;

k_7 为在空气间隙中存在着操作过电压(相对于零电位点)的情况下, 公式的配合系数, 有风偏的情况下取1.10, 无风偏的情况下取1.27。

3) 变电站中每相对零电位点的空气间隙, 在正极性雷电冲击作用下, 电压波50%放电电压应符合式(11):

$$u_{s,1} \geq k_8 U_{1,p} \quad (11)$$

式中: $U_{1,p}$ 为避雷器在雷电冲击的情况下的最大电压保护水平, 单位为kV;

k_8 为在变电站中每相对于零电位点的空气间隙的过电压配合系数, 取1.4。

4.1.2 架构相间空气间隙的计算原理

1) 在工频电压工作环境下, 变电站每相之间的空气间隙的50%放电电压应该依照公式(12)进行计算:

$$u_{s-p,p} \geq k_9 U_{p,p} \quad (12)$$

式中: $U_{p,p}$ 为相与相之间位于母线处可能出现的最大工频过电压, 单位为kV, 本研究中其值取p.u.;

k_9 为相与相之间在工频的工作状态下, 与空气间隙的过电压配合系数, 取1.15。

2) 在变电站里相与相之间的空气间隙发生操作过电压时, 冲击电压波50%的放电电压值应满足式(13):

$$u_{s,s,p} \geq k_{10} U_{s,p} \quad (13)$$

式中: k_{10} 为在变电站里相与相之间的空气间隙操作过电压系数, 取2.0。

4.2 500 kV 电压等级空气间隙放电电压要求

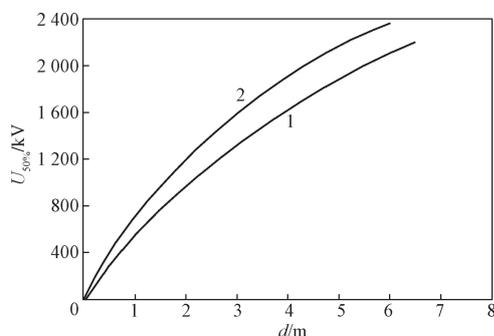
根据式(9)~(13)和(3)~(4)所用 m 值海拔修正系数法, 最终计算得到表6所示不同海拔高度下的500 kV 变电站空气间隙放电电压要求。

表6 不同海拔下的500 kV电压等级空气间隙放电电压值
Table 6 Parameters of 500 kV air gap discharge voltage value at different altitudes

海拔 / m	工频 50% 放电电压 / kV		操作冲击电压波 50% 放电电压 / kV		雷电冲击电压波 50% 放电电压 / kV	
	相对地	相间	相对地	相间	相对地	相间
	3 400	1 097	1 765	1 416	2 283	2 079
4 000	1 181	1 900	1 491	2 418	2 238	2418
4 200	1 210	1 947	1 517	2 465	2 293	2465
4 500	1 255	2 019	1 557	2 536	2 380	2536

4.3 不同海拔下500 kV电压等级相对地空气间隙的计算

1) 对于不同海拔下500 kV变电站工频50%放电电压下相对地空气间隙距离的计算,采用国家标准^[9]中的换算方法,如图3中的曲线1所示。



1—导线对塔柱; 2—导线对导线

图3 气隙的工频50%放电电压

Fig. 3 50% discharge voltage of the air gap

根据表6中所列工频50%放电电压数值及图3中曲线1可得3 400, 4 000, 4 200, 4 500 m海拔所对应的相对地工频50%放电电压下的最小空气间隙,计算结果如表7所示。

表7 不同海拔下的500 kV电压等级工频50%放电电压的空气间隙要求

Table 7 Parameters of 500 kV air gap requirements of power frequency discharge at different altitudes

海拔 / m	电气距离 / m	
	相对地	相间
3 400	2.1	3.0
4 000	2.3	3.3
4 200	2.6	4.3
4 500	2.8	4.6

2) 对于不同海拔下的500 kV变电站,相对地正极性操作冲击电压波50%放电电压空气间隙距离的计算,采用GB/T 50064—2014中500 kV变电站二分裂导线对构架空气间隙的计算方法,所得结果如表8所示。

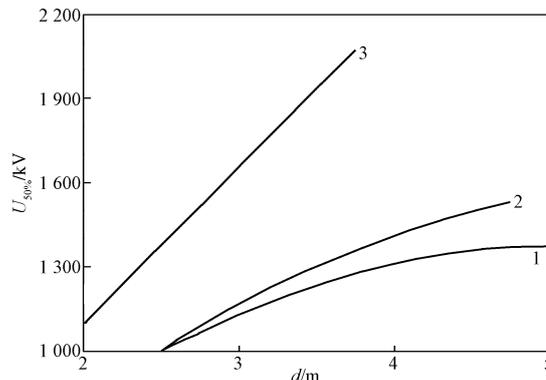
表8 二分裂导线对构架空气间隙的操作冲击50%放电电压

Table 8 50% impact voltage of two split conductors on the frame air gap

高压电极	有无均压环	对接地电极距离 / m		$U_{50\%}/kV$
		对横梁	对人字柱	
导线	无	4.2	5.05~3.65	573

根据表6中相对地正极性操作冲击电压波50%放电电压数值及表8所得结果,可得3 400, 4 000, 4 200, 4 500 m海拔所对应相对地正极性操作冲击电压波50%放电电压下的最小空气间隙。

3) 对于不同海拔高度500 kV电压等级相对地正极性雷电冲击电压波50%放电电压空气间隙距离的计算,参考GB/T 50064—2014中500 kV变电站线路塔头空气间隙雷电冲击电压波50%放电电压计算方法,所得结果如图4所示。



1—中相操作; 2—边相操作; 3—雷电

图4 500 kV电压等级线路塔头空气间隙的雷电冲击50%放电电压

Fig. 4 50% discharge voltage of the lightning impulse of the tower head air gap in circuit of 500 kV voltage

根据表6中的相对地正极性雷电冲击电压波50%放电电压数值及图4中的曲线3,可得海拔分别为3 400, 4 000, 4 200, 4 500 m时,所对应的相对地正极性雷电冲击电压波50%放电电压下的最小空气间隙。

4.4 不同海拔下500 kV电压等级相间空气间隙的计算

1) 对于不同海拔下500 kV变电站相间工频50%放电电压空气间隙距离的计算,采用国家标准的计算方法^[8],见图3。根据表6中的工频50%放电电压数值及图3中的曲线2可以得出海拔分别为3 400, 4 000, 4 200, 4 500 m时,所对应的相间工频50%放电电压下的最小空气间隙,结果如表9所示。

2) 不同海拔高度500 kV变电站相间正极性操作冲击电压波50%放电电压的空气间隙距离,参考文

献 [10] 中的研究成果, 如图 5 所示。

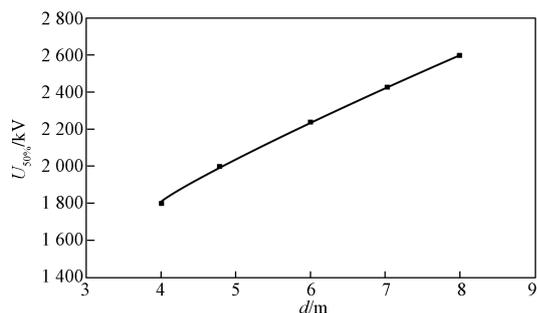


图 5 导线与相间操作冲击放电特性曲线

Fig. 5 Wire and phase operating impulse discharge characteristic curve

根据表 6 中的相间正极性操作冲击电压波 50% 放电电压数值以及图 5 所示放电特性曲线, 可以得出海拔分别为 3 400, 4 000, 4 200, 4 500 m 时, 所对应的相间正极性操作冲击电压波 50% 放电电压下的最小空气间隙。

3) 根据国家标准 [9], 对于不同海拔的 500 kV 变电站, 当存在雷电过电压时, 出于安全裕度的考虑, 相与相之间空气间隙距离应设定为相对地空气间隙的

1.1 倍。

综上所述, 可以得出本工程所辖不同海拔高度 500 kV 电压等级下空气间隙的计算结果, 具体如表 9 所示。

表 9 不同海拔的 500 kV 电压等级空气间隙要求
Table 9 Parameters of 500 kV air gap requirements for different altitudes

海拔 / m	电气距离 / m					
	工频 50% 放电电压		操作冲击电压波 50% 放电电压		雷电冲击电压波 50% 放电电压	
	相对地	相间	相对地	相间	相对地	相间
3 400	2.1	3.0	4.5	6.2	3.7	4.1
4 000	2.3	3.3	4.8	6.7	4.2	4.7
4 200	2.6	4.3	5.0	7.0	4.3	4.8
4 500	2.8	4.6	5.2	7.2	4.5	5.0

5 修正前与修正后外绝缘水平与空气间隙的比较

通过上述分析, 将进行海拔修正前后的数据进行比较, 如表 10 所示。

表 10 修正前后的数据比较

Table 10 Comparison of data before and after correction

电压耐受类型	修正前	修正后			
		3 400 m	4 000 m	4 200 m	4 500 m
爬电比距 / (mm·kV ⁻¹)	39.4~50.4	51	52	53	54
绝缘子片数 (500 kV)	40	41	43	44	45
500 kV 额定雷电冲击耐受电压 /kV	1 675	2 249	2 322	2 421	2 574
500 kV 额定操作冲击耐受电压 /kV	1 175	1 457	1 535	1 561	1 672
500 kV 额定短时工频耐受电压 (有效值) /kV	740	994	1 070	1 096	1 137

分析表 10 所示修正前后的数据, 可发现实验符合国家标准以及实际情况, 可见实验数据经验证合理, 并且已经被应用于我国藏中联网工程。

6 结语

西藏地区海拔较高, 微气候环境复杂多变。本文研究了藏中联网工程 500 kV 变电站外绝缘水平和空气间隙距离, 现将研究结果总结如下:

1) 考虑到工程实际需要, 结合目前的高海拔研究成果, 给出不同海拔高度的爬电比距推荐值, 如表 2 所示。

2) 修正了变电站绝缘子的数量, 具体结果如表 3 所示。

3) 修正了 500 kV 变电站设备外绝缘水平 (放电电压), 结果如表 5 所示。

4) 修正了 500 kV 变电站的空气间隙距离, 结果

如表 9 所示。

以上结果丰富了我国对于海拔为 3 500 m 及以上高海拔外绝缘与空气间隙方面研究的成果, 为国家电网中高海拔变电站的设计与建造提供了一定的参考依据。

参考文献:

[1] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设计 110 (66) ~ 500 kV 变电站分册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 96-98.
LIU Zhenya. General Design of the National Power Grid Corp Power Transmission and Transformation Project 110(66) to 500 kV Substations[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 96-98.

[2] 黄振喜, 徐光彬, 周秋鹏, 等. 山区变电站总平面设计优化研究 [J]. 湖北电力, 2015, 39(10): 53-55, 58.
HUANG Zhenxi, XU Guangbin, ZHOU Qiupeng,

- et al. General Plan Optimization for Substation in Mountainous Areas[J]. Hubei Electric Power, 2015, 39(10): 53-55, 58.
- [3] 刘 然. 变电站平面布置设计的一些优化[J]. 电气技术, 2016, 17(4): 142-145.
LIU Ran. Optimization of Substation Layout Design[J]. Electrical Engineering, 2016, 17(4): 142-145.
- [4] 胡新怡. ± 800 kV 特高压直流输电线路的塔头空气间隙和绝缘配合计算[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
HU Xinyi. ± 800 kV Calculation of Tower Head Air Gap and Insulation Coordination of UHVDC Transmission Lines[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [5] 杨 洋, 李翔飞, 王 星. 株洲茶陵城关 110 kV 变电站优化设计[J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(3): 37-42.
YANG Yang, LI Xiangfei, WANG Xing. Optimized Design of 110 kV Substations in Chengguan District of Chaling Country[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(3): 37-42.
- [6] 吕诗如, 李 勇. 常宁 110 kV 新一代智能变电站优化设计[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(5): 59-64.
LÜ Shiru, LI Yong. Design of an Optimized 110 kV Intelligent Substations in Changning City[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(5): 59-64.
- [7] 国家电网公司. 电力系统污区分级与外绝缘选择标准第 1 部分交流系统: Q/GDW1152.1—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 1-6.
State Grid Corporation of China. Pollution Classification and External Insulation Selection for Electric Power System Part 1: A. C. System: Q/GDW1152.1—2014[S]. Beijing: China Standard Press, 2014: 1-6.
- [8] 国家电网公司. 高海拔外绝缘配置技术规范: Q/GDW 13001—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 1-9.
State Grid Corporation of China. High Altitude Outer Insulation Configuration Specifications: Q/GDW13001—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 1-9.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: GB/T 50064—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 4-53.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China, State General Administration of the People's Republic of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine. Code for Design of Over-Voltage Protection and Insulation Coordination for AC Electrical Installations: GB/T 50064—2014[S]. Beijing: China Standard Press, 2014: 4-53.
- [10] 李 三, 曹 晶, 陈 勇, 等. 高海拔地区 750 kV 开关站空气间隙选择研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 206-208, 212.
LI San, CAO Jing, CHEN Yong, et al. Research on Air Gaps Selection of 750 kV Switching Station in High Altitude Area[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(6): 206-208, 212.

(责任编辑: 廖友媛)

(上接第 31 页)

- [20] LI J, XIE H Q, LIU Y H, et al. Au-F127 Strawberry-Like Nanospheres as an Electrochemical Interface for Sensitive Detection of Carcinoembryonic Antigen in Real Sample[J]. Talanta, 2015, 144(11): 404-410.
- [21] LIN Zhenyu, ZHANG Guiyun, YANG Weiqiang, et al. CEA Fluorescence Biosensor Based on FRET Between Polymer Dots and Au Nanoparticles[J]. Chemical Communications, 2012, 48: 9918-9920.
- [22] LAI Guosong, CHENG Hui, XIN Dinghong, et al. Amplified Inhibition of the Electrochemical Signal of Ferrocene by Enzyme-Functionalized Graphene Oxide Nanoprobe for Ultrasensitive Immunoassay[J]. Analytica Chimica Acta, 2016, 902(1): 189-195.
- [23] LIU Zhimin, MA Zhanfang. Fabrication of an Ultrasensitive Electrochemical Immunosensor for CEA Based on Conducting Long-Chain Polythiols[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2013, 46(8): 1-7.
- [24] CAO Xia, WANG Ning, JIA Shu, et al. Bimetallic AuPt Nanochains: Synthesis and Their Application in Electro-Chemical Immunosensor for the Detection of Carcinoem-Bryonic Antigen[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2013, 39(1): 226-230.
- [25] YANG Zhanjun, LAN Qingchun, LI Juan, et al. Efficient Streptavidin-Functionalized Nitrogen-Doped Graphene for the Development of Highly Sensitive Electrochemical Immun-Osensor[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2017, 89(1): 312-318.

(责任编辑: 申 剑)