

高海拔 500 kV 交流输电线路绝缘子片数选择研究

唐 巍¹ 梁 明¹ 盛道伟¹ 霍 锋² 刘从法¹

(1. 西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021; 2. 国网电力科学研究院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 国内外在海拔 2000 m 以下高海拔地区已建设投运多回 500 kV 输电线路, 具有丰富的设计、运维经验。但在海拔 2000 m 以上的高海拔地区, 500 kV 线路绝缘配置经验及运行数据相对欠缺。伴随澜沧江、怒江、雅鲁藏布江流域水电资源的规划开发以及西藏、川西等高原地区骨干电力网架的规划建设, 海拔 2000 m 以上的高海拔区域将陆续建设多条 500 kV 线路。依据国网电科院模拟高海拔条件下的低气压进行的全尺寸人工污秽闪络特性试验成果, 对污秽条件下绝缘子选择的爬电比距法与污耐压法进行了对比, 对双伞、三伞、钟罩等绝缘子的污耐压性能进行比较, 探讨了低气压对绝缘子污闪特性的影响及污秽绝缘子海拔修正方法, 推荐了高海拔地区 500 kV 线路绝缘配置方案。

关键词: 500 kV 交流; 输电线路; 绝缘子片数; 选择; 超高海拔

中图分类号: TM853 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)05-0077-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.05.015

Research on Selection for Number of Insulators of 500 kV AC Transmission Line in High Altitude Area

Tang Wei¹, Liang Ming¹, Sheng Daowei¹, Huo Feng², Liu Congfa¹

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

2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: There are many 500 kV transmission lines running in high altitude area below 2000 metres above sea level, which has accumulated rich experiences in design, operation and maintenance. However, in the areas over 2000 metres above sea level, there is a lack of experiences in insulation configuration and running data of 500 kV AC transmission lines. With the planning and development of hydropower resources in Lancang river, Nujiang river and Yarlung Zangbo river basin, and the planning and construction of backbone power grid in Tibet or western Sichua, many 500 kV transmission lines will be constructed in high altitude area above 2000 metres above sea level. According to the experiment results of artificial pollution flashover performance executed in low atmospheric pressure under imitated condition of high altitude by State Grid Electric Power Research Institute, the creepage distance method and the pollution withstand voltage method are compared which are often used to choose the insulators under pollution condition, and the pollution flashover performance of double-shed, triple-shed and anti-fog insulators are also compared. The influence of low atmospheric pressure on the pollution flashover performance of insulators and the altitude correction methods for flashover performance contaminative insulator are discussed, and the insulation configurations for 500 kV AC transmission line in high altitude areas are recommended.

Key words: 500 kV AC; transmission line; number of insulators; selection; ultra high altitude

0 前 言

伴随澜沧江、怒江、雅鲁藏布江流域水电资源的规划开发以及西藏、滇西北、川西等高原地区骨干电力网架的规划建设, 海拔 2000 m 以上的高海拔区域将陆续建设多条 500 kV 线路。国内外在海拔 2000 m 以下高海拔地区已建设投运多回 500 kV

输电线路, 具有丰富的设计、运维经验, 但海拔 2000 m 以上投运线路相对较少, 尤其是海拔 3000 m 以上高海拔地区截止目前投入运行的仅有建塘—太安及川藏、藏中联网 500 kV 线路工程, 设计、运维经验相对欠缺。而海拔越高空气更加稀薄, 气压更低, 对电气设备外绝缘影响更大。

目前国内超高压输电线路绝缘配合设计惯用的爬电比距法具有简单、便于计算的优点, 在低海拔、

一般高海拔地区亦经历了大量工程实践的检验,能满足线路安全稳定运行的要求,但在更高海拔地区试验成果、运维数据相对缺乏,设计经验相对不足。

因此结合已建线路绝缘配合研究成果,通过模拟低气压状态下进行全尺寸绝缘子串人工污秽试验,对高海拔地区500 kV线路绝缘配合进行研究,合理选择高海拔地区线路绝缘子片数,对降低线路投资、保证线路长期安全可靠运行意义重大^[1]。

1 国内外研究现状

目前国内外研究普遍认为,随着海拔升高,气压降低,染污绝缘的直流和交流闪络电压都会降低^[2-10],污闪电压与气压P之间呈非线性关系,可以表示为

$$U = U_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^n \quad (1)$$

式中:U₀为常压P₀下的污闪电压;U表示气压为P时的污闪电压;n为气象影响特征指数。

虽然国内外对高海拔条件下绝缘放电特性进行了大量试验研究,但试验大多数是建立在模型或短串绝缘子的试验条件上,得到的试验成果差别也非常大。因此有必要对高海拔低气压环境下绝缘闪络特性进行长串绝缘子或是全电压、全尺寸试验研究。

2 绝缘子片数选择

目前500 kV输电线路采用的绝缘子型式主要分为玻璃、瓷、合成3种型式,考虑到高海拔地区多为人烟稀少、工业不发达地区,污秽不重,污秽等级多在C级及以下,因此选择采用盘型绝缘子。目前绝缘子片数选择有两种方法:一是根据运行经验按爬电比距计算绝缘子片数;二是通过人工污秽的闪络特性及污耐压法计算绝缘子片数。前者按绝缘子几何泄漏距离计算,该方法在理论上虽不够严密(未考虑绝缘子造型差异对泄漏距离有效性的影响),但简单易行^[11-12];后者需要通过试验得到绝缘子闪络特性,但容易受上下裙边污秽分布的均匀性、污秽成分等因素影响,该方法比较复杂。这里应用人工污秽试验数据,采用污耐压法确定绝缘子串的片数。

2.1 人工污秽试验方法

依托建塘—太安500 kV线路工程,对高海拔(海拔2000 m、3000 m、4000 m)低气压下染污绝缘子污闪特性进行了全尺寸(32片)人工污秽闪络特性试验研究。试验在国网特高压实验基地人工气候实验室进行,试验罐体净空尺寸为直径20 m,高25 m;高压穿墙套管额定工频电压800 kV电源;罐体内最低气压可达0.05 MPa(模拟海拔5500 m),最低气温可降至-19℃;再配合实验室辅助设施可进行模拟高海拔条件下的低气压人工污秽试验研究。试验采用人工污秽试验的固体涂层法,不溶物采用硅藻土,导电物质选用NaCl。试验采用恒压升降法。试验试品选用160 kN悬式绝缘子,试验绝缘子参数见表2。

表2 试验绝缘子参数

| 型号 | 强度 /kN | 结构高度 /mm | 盘径 /mm | 爬距 /mm | 备注 |
|-----------------------|--------|----------|--------|--------|-----|
| XWP ₂ -160 | 160 | 155 | 300 | 450 | 双伞型 |
| CA872-EZ | 160 | 155 | 325 | 545 | 三伞型 |
| FC-160P/155 | 160 | 155 | 330 | 550 | 钟罩型 |

2.2 单片绝缘子最大耐受电压的确定

2.2.1 通过U_{50%}计算

绝缘子串污秽闪络电压服从标准正态函数分布,当分布幅度取3σ时,线路闪络概率约为0.14%,其可靠度认为是可以接受的,则绝缘子污秽情况耐受电压下可按式(2)计算。

$$U_w = U_{50\%} (1 - 3\sigma) \quad (2)$$

式中:U_w为污秽绝缘子耐受电压,kV;U_{50%}为污秽绝缘子串50%闪络电压,kV;σ为标准偏差,取7%。

通过试验得到的不同型式绝缘子的50%污秽闪络电压,50%污秽耐受电压与绝缘子片数基本呈线性关系,因此依据式(2)求得标准大气压下单片绝缘子最大耐受电压如表3所示。

表3 单片绝缘子最大耐受电压U_{max1}

| 污秽等级 | 等值盐密 / (mg·cm ⁻²) | 最大耐受电压 /kV | | |
|------|-------------------------------|-----------------------|----------|-------------|
| | | XWP ₂ -160 | CA872-EZ | FC-160P/155 |
| C | 0.1 | 6.94 | 7.65 | 8.08 |

注:试验灰密(NSDD)取2.0 mg/cm²。

2.2.2 不均匀积污校正

经过对投运的交直流线路取样测试,自然积污时绝缘子上下表面存在不均匀性^[13-15],对不同型式绝缘子进行上下表面不均匀积污,校正系数可按式

(3) 进行计算^[16]。

$$K_0 = \frac{U_{\max 2}}{U_{\max 1}} = 1 - N \times \ln\left(\frac{T}{D}\right) \quad (3)$$

式中: K_0 为绝缘子不均匀积污修正系数; $U_{\max 2}$ 为不均匀积污时绝缘子的耐受电压; $U_{\max 1}$ 为均匀积污时绝缘子的耐受电压; N 为修正常数, 通过试验得到; T/D 为上下表面不均匀积污比。

这里对绝缘子的上下表面不均匀积污比按以往工程经验取 1:3 则可求得非均匀积污系数, 见表 4。进行非均匀积污校正后所得 $U_{\max 2}$ 见表 5。

表 4 不同型式绝缘子非均匀积污系数

| 绝缘子类型 | 修正常数 N | 上下非均匀积污修正系数 K_0 |
|-----------------------|----------|-------------------|
| XWP ₂ -160 | 0.16 | 1.176 |
| CA872-EZ | 0.13 | 1.143 |
| FC-160P/155 | 0.08 | 1.088 |

表 5 积污校正后单片绝缘子最大耐受电压 $U_{\max 2}$

| 污秽等级 | 等值盐密 / $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 最大耐受电压 / kV | | |
|------|---|-----------------------|----------|-------------|
| | | XWP ₂ -160 | CA872-EZ | FC-160P/155 |
| C | 0.1 | 8.16 | 8.75 | 8.79 |

2.2.3 灰密校正

研究表明在相同盐密条件下随着灰密 (non soluble deposite density, NSDD) 的增加, 绝缘子耐受电压水平呈下降趋势。通过人污秽试验得到 3 种盐密 (salt deposite density, SDD) 下 NSDD 对绝缘子耐受电压的校正关系 (见图 1), 将试验结果校正到 NSDD 为 0.5 mg/cm^2 (灰盐比为 5), 单片绝缘子最大耐受电压见表 6。

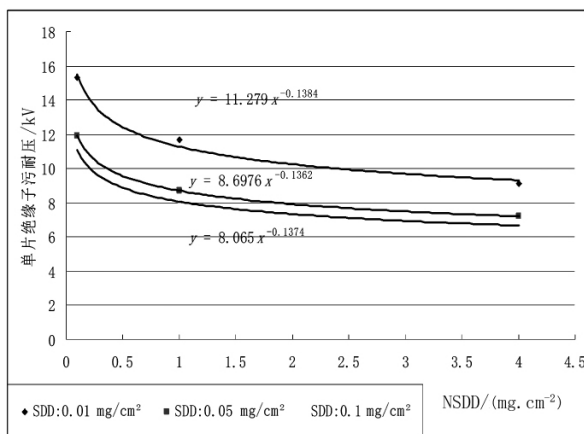


图 1 绝缘子 (XWP₂-160) 不同 NSDD 下的污耐压曲线
表 6 灰密校正后单片绝缘子最大耐受电压

| 污秽等级 | 等值盐密 / $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 最大耐受电压 / kV | | |
|------|---|-----------------------|----------|-------------|
| | | XWP ₂ -160 | CA872-EZ | FC-160P/155 |
| C | 0.1 | 11.96 | 12.34 | 11.87 |

2.2.4 高海拔校正

通过试验得到了 3 种盘型绝缘子交流闪络电压与气压的关系见图 2 至图 4。

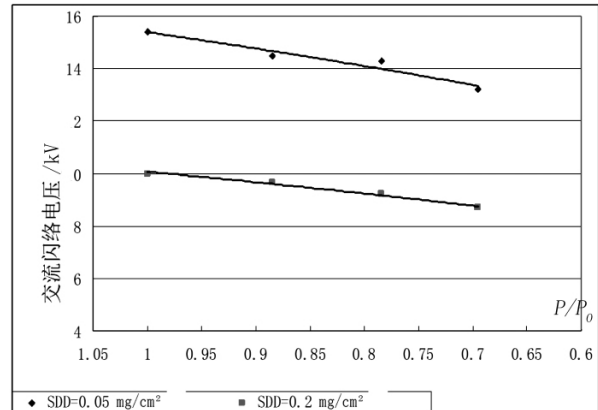


图 2 绝缘子 (XWP₂-160) 交流闪络电压与气压的关系

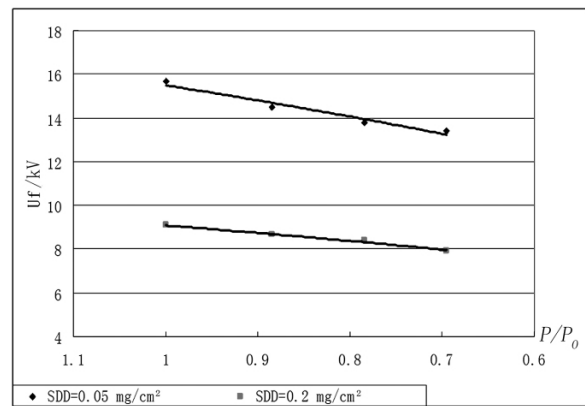


图 3 绝缘子 (CA872-EZ) 交流闪络电压与气压的关系

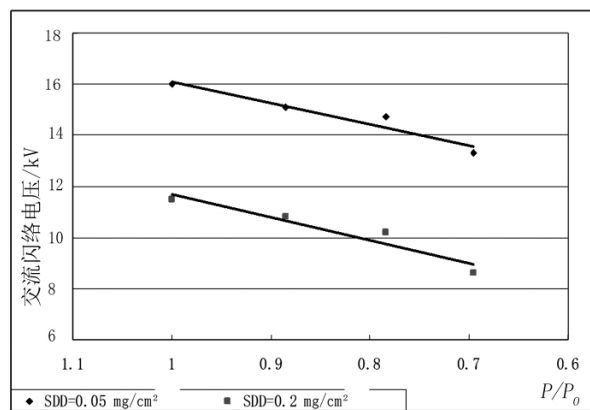


图 4 绝缘子 (FC-160P/155) 交流闪络电压与气压的关系

由图 2 至图 4 可拟合出在 2 种盐密下的气象影响特征指数 n 及其平均值见表 7。

表7 3种盘形悬式绝缘子的n值

| 试样 | n | | 平均值 |
|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------|------|
| | SDD = 0.05 mg/cm ² | SDD = 0.2 mg/cm ² | |
| XWP ₂ -160 | 0.42 | 0.34 | 0.38 |
| CA872-EZ | 0.22 | 0.40 | 0.31 |
| FC-160P/155 | 0.45 | 0.59 | 0.52 |

根据式(1)及表7对单片绝缘子耐受电压进行海拔校正,修正结果见表8。

表8 高海拔下单片绝缘子最大耐受电压U_{max5}

| 海拔/m | 污秽等级 | ESDD/ (mg·cm ⁻²) | 最大耐受电压/kV | | |
|------|------|---------------------------------|-----------------------|----------|-------------|
| | | | XWP ₂ -160 | CA872-EZ | FC-160P/155 |
| 2000 | C | 0.1 | 10.90 | 11.44 | 10.46 |
| 3000 | C | 0.1 | 10.42 | 11.02 | 9.82 |
| 4000 | C | 0.1 | 9.90 | 10.58 | 9.16 |

2.3 绝缘子片数选择结果

对500kV输电线路最大工频相电压有效值U_{smax} = 550/1.732 = 317.5 kV;依据表8得出的高海拔下单片绝缘子最大耐受电压,在高海拔下污秽条件下需要的绝缘子片数见表9。

表9 高海拔下污秽绝缘子片数选择结论

| 海拔/m | 污秽等级 | ESDD/ (mg·cm ⁻²) | 绝缘子片数/片 | | |
|------|------|---------------------------------|-----------------------|----------|-------------|
| | | | XWP ₂ -160 | CA872-EZ | FC-160P/155 |
| 2000 | C | 0.1 | 30 | 28 | 31 |
| 3000 | C | 0.1 | 31 | 29 | 33 |
| 4000 | C | 0.1 | 32 | 30 | 35 |

3 污耐压法与爬电比距法选择结果对比

根据GB 50545-2010《110kV-750kV架空输电线路设计规范》的规定,采用爬电比距法绝缘子片数应按式(4)计算。

$$N_1 \geq \frac{\lambda U}{K_e L_{ol}} \quad (4)$$

式中: N₁为海拔1000m时每串绝缘子所需片数; λ为爬电比距,cm/kV; U为系统标称电压,kV; L_{ol}为单片悬式绝缘子的几何爬电距离,cm; K_e为绝缘子爬电距离的有效系数,根据DL/T 1122-2009《架空输电线路外绝缘配置技术导则》,双伞型、三伞型绝缘子K_e值取1,钟罩防污型绝缘子在C级污区K_e值取0.9。

按式(4)计算并进行海拔修正后,高海拔污秽

条件下绝缘子片数见表10。

表10 按爬电比距法绝缘子片数选择结果

| 海拔/m | 污秽等级 | 统一爬电比距/ (mm·kV ⁻¹) | 绝缘子片数/片 | | |
|------|------|-----------------------------------|-----------------------|----------|-------------|
| | | | XWP ₂ -160 | CA872-EZ | FC-160P/155 |
| 2000 | C | 39.4 | 30 | 24 | 27 |
| 3000 | C | 39.4 | 31 | 25 | 29 |
| 4000 | C | 39.4 | 33 | 26 | 31 |

通过对表9、表10中的数据进行对比分析,可以发现XWP₂-160绝缘子采用两种方法计算得的结论基本一致,而对于CA872-EZ、FC-160P/155两种绝缘子虽然通过伞型结构优化显著提高了绝缘子的爬电距离,但由于伞间或棱间距离较近,在电弧发展过程中容易在相邻伞间或棱间短接,从而降低了其有效爬电距离,按爬电比距法得到的绝缘子片数较污耐压法减少约15%。因此在采用爬电比距法计算绝缘子片数时,对于大爬距防污绝缘子,确定合适的爬电距离的有效系数K_e是非常重要的^[19]。

4 结语

通过全尺寸(32片)绝缘子串在低气压下人工污秽闪络特性试验,对高海拔环境下输电线路绝缘配合进行了研究,并通过对污耐压、爬电比距法选择绝缘子片数进行对比,得出以下结论:

1) 防污绝缘子通过伞型结构优化显著提高了绝缘子的爬电距离,但牺牲了伞间或棱间距离,在电弧发展过程中容易在相邻伞间或棱间短接,从而降低了其有效爬电距离。按爬电比距法得到的绝缘子片数较污耐压法减少约15%。因此采用爬电比距法配置绝缘,确定合适的爬电距离有效系数是非常关键的。

2) 双伞型、三伞型绝缘子的污耐压性能明显高于钟罩型绝缘子,其污闪电压随海拔高度的升高下降程度也明显小于后者,海拔每增加1000m可较后者少增加约一片绝缘子。

3) 依据在人工环境气候实验室模拟高海拔条件下的低气压进行的人工污秽闪络特性试验结果,计算推导出高海拔条件下的绝缘子片数,详见表9。

根据已投运直流线路盐密测试结果及自然积污站观测数据,外伞型绝缘子表面等值盐密远小于钟罩型绝缘子。因此对500kV输电线路各类绝缘子

积污特性进行对比分析研究,进一步优化绝缘子片数,降低线路投资是今后500 kV输电线路绝缘配合研究应重点关注的方面。

参考文献

[1] 廖永力,张福增,李锐海,等. 特高压直流输电线路外绝缘设计若干问题研究[J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 39-43.

[2] 张搏宇,殷禹,张翠霞,等. 高海拔线路避雷器的绝缘配合研究[J]. 电磁避雷器, 2017(4): 23-27.

[3] 罗强,王强,罗鸣,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.

[4] 唐巍,梁明. 重冰区±800 kV特高压直流线路绝缘配合研究[J]. 新型工业化, 2016, 6(11): 93-99.

[5] 张福增,李锐海,王国利,等. 高海拔特高压线路绝缘子的直流污闪特性[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1): 29-32.

[6] 周刚,李字明. 高海拔地区架空输电线路的绝缘配置[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 205-207.

[7] 周安春,李字明,何长华. 高海拔地区架空输电线路外绝缘和塔头空气间隙计算[J]. 电力建设, 2011, 32(1): 38-40.

[8] 孙才新,舒立春,蒋兴良,等. 高海拔、污秽、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 115-120.

[9] 周军,关志成,王黎明,等. 高海拔条件下大吨位线路绝缘子污闪特性研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 1-3.

[10] Raji Sundararajan, Robert W Nowlin. Effect of Altitude on the Flashover Voltage of Contaminated Insulators [C]. Proceedings of CEIDP, San Francisco, USA: University of

California at San Francisco, 1996: 433-436.

[11] 张福增,赵锋,杨皓麟,等. 高海拔地区直流输电线路外绝缘特性研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2113-2117.

[12] 吴光亚,蔡炜,卢燕龙,等. 交流输电线路绝缘子串片数的选择[J]. 高电压技术, 2002, 28(2): 21-23.

[13] 南敬,徐涛,万小东,等. 人工模拟自然横风条件下绝缘子快速积污特性[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3323-3330.

[14] 吕玉坤,赵伟萍,庞广陆,等. 典型伞型瓷及复合绝缘子积污特性模拟研究[J]. 电工技术学报, 2017, 33(1): 209-216.

[15] 杨帅,周文俊,李涵,等. ±800 kV 楚穗特高压直流线路复合绝缘子自然积污特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 952-958.

[16] 张志劲,刘小欢,蒋兴良,等. 污秽不均匀度对XP-160绝缘子串交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 280-286.

作者简介:

唐巍(1979),高级工程师,从事架空输电线路设计和研究工作;

梁明(1973),教授级高级工程师,从事架空输电线路设计和研究工作;

盛道伟(1982),硕士,高级工程师,从事架空输电线路设计和研究工作;

霍锋(1979),博士,高级工程师,从事超高压输变电外绝缘技术、高压试验技术的研究工作;

刘从法(1979),硕士,高级工程师,从事架空输电线路设计和研究工作。

(收稿日期: 2019-06-12)

(上接第76页)

充分利用主站监控系统信号,分析存储历史数据规律,多维数据相互印证,更大程度发掘系统组合分析优势,将本侧、对侧信号相结合,形成发散型信息关联,将局域信息转化成为广域事件,逐步完善信息-事件匹配规程,提高信息事件推演准确性。

实践证明,通过监控信息事件化可以帮助监控人员第一时间判断出电网故障情况并给出事件预警,部署该功能只需采集现有的监控信息,结合核心算法推演出事件,便于监控人员实时掌握现场情况,极大方便电网事件监视与分析,提高电网安全运行水平。

参考文献

[1] 李田. 数据挖掘技术及其在电力行业过程监控中的应用[J]. 科技与创新, 2019(2): 144-145.

[2] 许振飞,邵明锋,张梅,等. 对电力信息通信系统监控模型设计及应用的探讨[J]. 电子世界, 2018(24): 177-178.

[3] 张金荣,刘孝旭,虞国元,等. 变电站后台监控信息的分层分类监视[J]. 农村电气化, 2011(6): 44-45.

[4] 李海燕. 电力系统调度监控一体化运行探究[J]. 通信电源技术, 2018, 35(10): 271-272.

作者简介:

代宇涵(1989),硕士研究生,现从事调度自动化技术支持工作。

(收稿日期: 2019-04-08)