

# ±500 kV 极间间隔棒的研制与应用

鄢 艺<sup>1</sup> 徐望圣<sup>2</sup> 陈 飞<sup>2</sup> 梁 明<sup>1</sup>

- (1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;  
2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司贵阳局, 贵州 贵阳 550001)

**摘 要:** ±500 kV 高肇直流线路局部区段导线舞动严重, 舞动产生的导线交变应力造成导线损伤和金具磨损, 为减少导线舞动的损害, 研制了 ±500 kV 极间间隔棒并应用在该线路上提高线路抗风偏、舞动能力。通过对电气、机械性能要求的综合研究和分析, 提出了极间间隔棒的制作要求和技术参数, 属国内首次研制成的 ±500 kV 极间间隔棒。研制的间隔棒已按技术要求通过所需的所有机电综合试验, 并已运用于高肇直流线路, 为工程问题的解决提供了具体方案; 同时也为超、特高压导线舞动、风偏的限制提供了技术条件。

**关键词:** 输电线路; 舞动; 极间间隔棒

**Abstract:** The galloping of transmission lines in some sections of ±500 kV GaoZhao HVDC transmission line is very serious, which causes the damage of the conductor and fitting because of the periodic stresses produced by galloping. In order to decrease the damage produced by the galloping of transmission lines, ±500 kV phase-to-phase composite spacer has been developed and applied in ±500 kV GaoZhao HVDC project, which increases the anti-swing and anti-galloping ability of lines. It is the new phase-to-phase composite spacer developed in China for the first time, which is tested by some electrical and mechanical research and analysis. This kind of composite spacer has passed all the technical tests covered mechanical and electrical requirements and has been used in ±500 kV GaoZhao HVDC project. It not only provides the solution for the galloping of transmission lines in ±500 kV GaoZhao HVDC project, but also provides the technical support to solve the galloping and swing of conductors in EHV and UHV transmission lines.

**Key words:** transmission lines; galloping; pole-to-pole spacer

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)05-0027-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.05.007

## 0 引 言

目前国内外尚无极间间隔棒尺寸与特性的统一标准。安装在两极之间的绝缘间隔棒承受导线所受的风力<sup>[1-3]</sup>和电磁力<sup>[4]</sup>作用而产生拉压力和振动冲击力<sup>[5-7]</sup>, 间隔棒本身的重量为导线集中荷载, 因此要求间隔棒不仅要具有足够的电气绝缘能力<sup>[8]</sup>和机械强度<sup>[9-10]</sup>, 还要求其质量轻并具有一定的韧性以缓解振动冲击力的疲劳作用<sup>[11]</sup>。这里提出了采用优良机械电气性能、优异憎水性和抗氧化性的硅橡胶作为伞套材料, 以及高强度的耐酸芯棒, 并使用当前最先进的整体注射成型工艺进行生产, 采用压接方式连接金具以及采用高温外护套对端部进行密封的方法。

下面根据极间合成间隔棒的技术条件和合成绝

缘子的有关标准<sup>[12-13]</sup>, 进行工频干闪络试验、突然试验卸载、热机试验、水煮试验、陡坡冲击电压试验和工频电压试验等, 并对合成间隔棒端部连接区及界面进行了电气和机械测试。

## 1 极间间隔棒整体型式及技术参数

### 1.1 结构形式

为增大间隔棒的泄漏距离, 使其具有较强的防腐及耐污水平, 经技术和经济比选, 合成绝缘子伞型采用大小伞结构形式<sup>[14]</sup>。该伞型与其他结构相比, 在污秽和雨水环境下放电时不易桥接, 在严重覆冰覆雪情况下能阻滞电弧串接<sup>[4-5]</sup>。

### 1.2 技术参数的确定

根据高肇直流的导线布置情况, 在除去金具结构的长度后, 采用的直流棒性悬式复合绝缘子棒的

结构高度为 12.5 m,绝缘长度为 11.356 m,远远高于电压绝缘水平的要求,绝缘裕度非常大。间隔棒芯棒采用 30 mm 直径高强度耐酸芯棒,其直径是按照间隔棒受拉、压状态的后屈曲大挠度试验而得,伞套材料采用具有优良机械电气性能、有优异憎水性和抗氧化性的甲基乙烯硅橡胶。

极间间隔棒采用整支复合绝缘子,其长度为 12 500 mm,公称爬电距离为 48 000 mm,爬电比距为 48 mm/kV,大于 C 级污区的绝缘水平。

根据合成绝缘子棒的电气和机械性能,制定了高肇直流极间间隔棒技术条件如表 1 所示。

表 1 极间间隔棒技术条件

项 目	整体参数
结构高度/mm	12 500
芯棒直径/mm	30
与金具连接方式	环环
最小公称爬电距离/mm	≥48 000
拉伸破坏负荷/kN	≥100
反复屈曲试验(最大挠度 < 1 250 mm)/次	3 × 10 <sup>5</sup>
大挠度屈曲试验(最大挠度 < 4 800 mm)/次	5
额定电压/kV	±1 000
最高运行电压/kV	±1 100
雷电冲击耐受电压/kV	+4 900
操作冲击湿耐受电压/kV	+2 600
直流 1 min 湿耐受电压/kV	+1 200
无线电干扰水平(+578 kV)/μV	1 000
可见电晕(+578 kV)	无可见电晕
外径	400
均压环/mm 管径	50
屏蔽深度	45

## 2 电气性能试验

### 2.1 人工直流污秽试验

以 0.15 mg/cm<sup>2</sup> 盐密、1.0 mg/cm<sup>2</sup> 灰度的污液将复合绝缘子上下表面均匀污染,阴干后开始试验。受试验基地电源电压限制,试验耐受电压取 240 kV,将试品长度按比例折减,采用裸铜导线短接的方法使试品长度(干弧距离)为 240 mm。将试品安装于雾室至污层电导率达到最大后施以 -240 kV

电压,试验 40 min 内未发生击穿,即认为能耐受住 -240 kV 直流试验电压。

### 2.2 工频电压试验

#### 2.2.1 干雷电冲击耐受电压试验

试验大气条件为:气压  $b = 101.5$  kPa,干球温度  $t_d = 20^\circ\text{C}$ ,湿球温度  $t_w = 18.0^\circ\text{C}$ ,绝缘长度  $L = 11.356$  m,大气校正系数  $K_t = 1.029$ 。

取试品一只,施加 15 次雷电冲击电压未发生闪络,试验结果详见表 2。

表 2 正极性干雷电冲击耐受电压试验结果

试品编号	规定值/kV	校正值/kV	试验值/kV	闪络/耐受(次)	本项结果
No. 7	+4 900	+5 042	+5 045 ~ +5 061	0/15	合格

#### 2.2.2 直流 1 min 湿耐受电压试验

试验大气条件为:气压  $b = 101.5$  kPa,干球温度  $t_d = 20^\circ\text{C}$ ,湿球温度  $t_w = 18.0^\circ\text{C}$ ,绝缘长度  $L = 11.356$  m,大气校正系数  $K_t = 1.003$ 。

试验淋雨条件为:人工雨电阻率  $\rho_{20} = 101.0$  Ω·m,人工雨淋雨率水平分量为 1.4 mm/min、垂直分量为 1.5 mm/min。

取试品一只,进行湿工频耐受电压试验,未发生闪络击穿,结果详见表 3。

表 3 直流 1 min 湿耐受电压试验

试品编号	规定值/kV	校正值/kV	试验值/kV	耐受时间/min	试验结果	本项结果
No. 7	+1 200	+1 204	+1 204	1	耐受	合格

#### 2.2.3 操作冲击湿耐受电压试验

试验大气条件为:气压  $b = 101.5$  kPa,干球温度  $t_d = 20^\circ\text{C}$ ,湿球温度  $t_w = 18.0^\circ\text{C}$ ,绝缘长度  $L = 11.356$  m,大气校正系数  $K_t = 1.005$ 。

试验淋雨条件为:人工雨电阻率  $\rho_{20} = 101.0$  Ω·m,人工雨淋雨率水平分量为 1.4 mm/min、垂直分量为 1.5 mm/min。

取试品一只,进行正极性湿操作冲击耐受电压试验未发生闪络,结果详见表 4。

表 4 正极性湿操作冲击耐受电压试验

试品编号	规定值/kV	校正值/kV	试验值/kV	闪络/耐受(次)	本项结果
No. 7	+2 500	+2 613	+2 617 ~ +2 633	0/15	合格

### 2.3 陡波前冲击耐受电压试验

将试品置于 0.1% 的 NaCl 去离子水中,保持沸

表5 陡波前冲击耐受试验结果

试品编号	试品分段/段	正极性			负极性			本项结果
		冲击电压陡度 / (kV · μs <sup>-1</sup> )	每段冲击次数 / 次	闪络或击穿	冲击电压陡度 / (kV · μs <sup>-1</sup> )	每段冲击次数 / 次	闪络或击穿	
No. 1	32	1 042 ~ 1 401	25	闪络	1 123 ~ 1 379	25	闪络	合格
No. 2	32	1 042 ~ 1 401	25	闪络	1 123 ~ 1 379	25	闪络	合格
No. 3	32	1 042 ~ 1 401	25	闪络	1 123 ~ 1 379	25	闪络	合格
No. 4	32	1 042 ~ 1 401	25	闪络	1 123 ~ 1 379	25	闪络	合格

腾42 h。沸腾结束后将试品保留在容器中至水温冷却到大约50℃。在容器中维持此温度,检查外观无开裂和脱落。

将检查后的4支复合绝缘子,编号为No. 1 ~ No. 4,每支分为32段,用厚0.5 mm、宽20 mm的窄铜条缠绕在伞裙间的护套上作为电极,进行陡波前冲击耐受电压试验。每段连续施加陡度为1 000 ~ 1 500 kV/μs的正、负冲击电压各25次。每次冲击都应使电极间的空气间隙闪络,而绝缘子不应产生击穿。

试验结果如表5所示。试验中试品均未被击穿,说明试品的机械疲劳对电气性能无影响。

### 3 机械性能试验

#### 3.1 大扰度曲屈试验



图1 大扰度曲屈试验

由于所用的极间间隔棒整支长度为12.5 m,参照相关导则<sup>[15]</sup>,φ30直径芯体长度超过8 m的可不对整支进行大扰度曲屈试验,本试验仅截取6 m复合绝缘子进行试验,如图1所示。

大扰度曲屈试验中,施压后纵向剩余压缩距离

和侧向弯曲情况见表6。

表6 大扰度屈曲试验情况

试验次序	施加负荷 /N	纵向剩余压缩距离/mm	侧向弯曲量 /mm
1	875	4 600	1 730
2	870	4 600	1 730
3	870	4 600	1 720

#### 3.2 30万次微风振动试验

30万次微风振动试验中试品采用水平布置,如图2所示。



图2 微风震动试验布置

试验中以扫频得到的系统振动频率为振动台频率,输出振幅满足式(1)要求。

$$A_{req} \geq 1\ 000/f^{1.8} \quad (1)$$

式中:  $A_{req}$  为振动幅值, mm;  $f$  为振动频率, Hz。

经30万次振动后,绝缘子试品完好,金属附件无松动。

### 4 结论

所研制的±500 kV线路极间间隔棒的试验结果表明:该间隔棒的机械性能和电气性能都满足现场应用需求,属首次成功研制的±500 kV线路极间间隔棒;其后屈曲性能及30万次曲屈疲劳试验为当前先进水平,具有很高的韧性、弹性,是研制极间间隔棒的关键,为工程的实施解决了技术难题。

(下转第68页)

式在平地、丘陵地形情况下比索道运输费用节省,因此当混凝土工程量与铁塔重量之比大于1时,规律与上述一致。此外,运输方式应结合工程实际情况、运输方式的难易程度、对环境的影响程度、施工工期、修路费用以及赔偿费用等来综合选定。在输电线路工程中,线路往往经过不同的地形区,索道运输与人力运输可以结合应用,发挥各自的优势。

### 3 结 语

对输电线路工程建设中常见的人力运输、汽车运输和索道运输费用进行了计算分析,结果可供电力工程建设参考。通过对3种运输方式的比较,汽车运输费用最省,人力运输在平地、丘陵等地形下比索道运输费用节省,但在山地、高山、峻岭等地形下,需要根据两种方式的运输距离和运输重量来确定。

(上接第29页)



图3 极间间隔棒在高耸直流的挂网情况

大小伞布置使得绝缘间隔棒极不容易积污,同时该间隔棒耐污性强,原则上不需要清扫维护。

该极间间隔棒目前已用于高耸±500 kV直流线路,见图3。对限制导线舞动与风偏摆动具有很好的效果,运行状况良好。

#### 参考文献

[1] 程志军. 架空输电线路静动力特性及风振研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.

[2] 陈晓明. 大跨越输电线路舞动及其控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.

[3] 徐中年, 赵作利. 气流干扰线抑制导线舞动的机理与实验[J]. 线路通讯, 2002(1): 57-59.

[4] 王黎明, 孙保强, 张楚岩, 等. 750 kV紧凑型线路相间间隔棒力学分析与计算[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2551-2556.

#### 参考文献

[1] 国家能源局. 电网工程建设预算编制与计算规定[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[2] 国家能源局. 电力建设工程预算定额[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[3] 缪谦. 我国电网建设工程施工货运索道运输方式的研究[J]. 华北电力技术, 2010(12): 12-15.

[4] 孙竹森, 缪谦, 江明. 输电线路工程货运架空索道标准化施工方案[J]. 电力建设, 2011, 32(3): 117-120.

[5] 肖宇. 输电线路工程索道运输方式费用探讨[J]. 电力勘测设计, 2015(4): 76-80.

#### 作者简介:

肖宇(1980), 高级工程师, 主要从事输电线路工程设计及技术经济等方面的工作。

(收稿日期: 2017-06-27)

[5] 王少华, 蒋兴良, 孙才新. 输电线路导线舞动的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 11-14.

[6] 丁锡广, 陶文秋. 减轻送电线路导线舞动灾害的措施[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 54-55.

[7] 朱宽军, 刘彬, 刘超群, 等. 特高压输电线路防舞动研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 12-20.

[8] 王黎明, 薛家麟, 范钦珊. 220 kV紧凑型输电线路相间合成绝缘间隔棒的研制[J]. 高电压技术, 1995, 21(1): 3-7.

[9] 薄学微, 王黎明, 孙保强, 等. 500 kV紧凑型线路复合相间间隔棒机电性能研究[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 43-48.

[10] Keutgen R, Lilien J L. Benchmark Cases for Galloping with Results Obtained from Wind Tunnel Facilities Validation of A Finite Element Mode 1[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 367-374.

[11] Gupta S, Wipf T. Structural Failure Analysis of 345 kV Transmissionline [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1994, 9(2): 894-903.

[12] DL/T 810-2012, ±500 kV及以上电压等级直流棒形悬式复合绝缘子技术条件[S].

[13] GB/T 775.2-2003, 绝缘子试验方法 第2部分电气试验方法[S].

[14] 及荣军. 330 kV柔性相间复合绝缘间隔棒的研制[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 112-115.

[15] DL/T 1058-2016, 交流架空线路用复合相间间隔棒技术条件[S].

#### 作者简介:

鄢艺(1987), 工程师, 主要从事输电线路设计工作。

(收稿日期: 2017-05-13)