

# 特高压直流输电线路大截面导线 极间距取值深化研究

周唯, 周刚, 吴子怡

(西南电力设计院, 四川成都 610021)

**摘要:** 在特高压直流输电线路中, 极导线间距离直接影响杆塔塔头尺寸、杆塔高度和输电线路电磁环境指标, 进而影响工程建设投资和环保水平, 具有重要的经济和社会效益。通过对影响极间距取值的各种因素进行研究分析, 提出了采用大截面钢芯铝绞线的极间距控制因素、优化研究和经济效益等成果。

**关键词:** 特高压; 直流输电线路; 极间距; 大截面

**Abstract:** The electrode spacing has important economic and social benefits, and it also affects the towerhead size, tower height, electromagnetic environment, investment and environmental protection. Based on the research and analysis on various factors for the electrode spacing values, the achievements of control factors, optimization research and economic results etc are proposed.

**Key words:** ultra high voltage (UHV); DC transmission line; electrode spacing; large cross-section

中图分类号: TM723 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0014-05

## 0 引言

随着中国电力系统全国联网、西电东送、南北互供工程的实施, 以及国家特高压骨干电网的建设, 中国电网将形成大容量交直流并列运行的格局。由于输电线路走廊资源的紧缺, 有效控制  $\pm 800$  kV 特高压直流线路极间距, 减小直流线路走廊宽度势在必行。这在经济发达地区尤为突出, 输送距离长达上百千米的特高压直流线路, 有效控制极间距减小走廊宽度非常重要。工程设计和建设中必须进行认真研究, 在保证安全运行的基础上, 严格控制空气间隙、杆塔高度和电磁环境指标, 能有效节省输电直流输电线路工程投资<sup>[1]</sup>。

## 1 边界条件

研究的基本计算条件如下: 额定电压为  $\pm 800$  kV; 系统最高运行电压为  $\pm 816$  kV; 系统输送功率为 8 000 MW; 操作过电压倍数为 1.6。在各种计算中, 大截面导线采用双极水平排列, 绝缘子串为 V 串布置; 直线塔塔身宽度取为 3.6 m, 耐张塔塔身宽度取为 4.6 m; 10 mm 冰区, 27 m/s 风区; 极导线和

地线布置尺寸详见图 1。

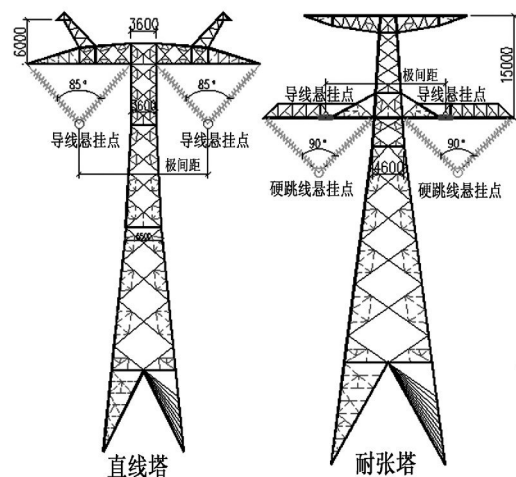


图1 铁塔布置图

研究的特高压直流线路, 参考正在设计的灵州—绍兴和酒泉—湖南线路工程, 每极大截面导线, 采用 6 分裂 JL/G2A-1250/70 钢芯铝绞线, 参数见表 1<sup>[2]</sup>。

## 2 主要控制因素

### 2.1 电磁环境限值

随着全球经济的不断发展和民众环境意识的增

表1 导线基本参数表

项 目	导线型号
	JL/G2A-1250/70
截面积 /mm <sup>2</sup>	1 320.43
直径 /mm	47.34
弹性模量 / (N · mm <sup>-2</sup> )	62 000
热膨胀系数 1 /°C × 10 <sup>-6</sup>	21.2
计算重量 / (kg · m <sup>-1</sup> )	3.9 994
额定拉断力 /kN	289.86
直流电阻 / (Ω · km <sup>-1</sup> )	0.02 291

强 输电工程的电磁环境影响越来越受到人们的关注 输电工程也受到环保的严厉制约 输电工程的电磁环境成为决定输电线路结构和影响建设费用等的重要因素。输电线路的电磁环境主要包括电场效应、可听噪声、无线电干扰及生态效应等方面。这些都是输电线路工程建设中必须考虑的重大技术课题。所研究的控制条件依据《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(GB 50790-2013)对电磁环境限值的规定<sup>[3]</sup>。

### 2.2 空气间隙

直流线路极导线间距除受电磁环境限值制约外 还需满足塔头空气间隙要求。可用式(1)表达。

$$S \geq (\delta + R) \times 2 + D \quad (1)$$

式中  $S$  为极间距;  $\delta$  为空气间隙;  $R$  为均压环至分裂导线中心距离;  $D$  为塔身宽度。

### 2.3 绝缘子串长和 V 串夹角

直流线路极导线间距受绝缘子串长和 V 串夹角的控制 具体控制条件如式(2)。

$$S \geq ((L + d) \times \sin\alpha / 2) \times 2 + D \quad (2)$$

式中  $S$  为极间距;  $L$  为绝缘子串长;  $d$  为联板悬挂点至联板中心距离;  $\alpha$  为 V 串夹角;  $D$  为塔身宽度。

## 3 极间距与电磁环境的变化关系

### 3.1 导线表面电场强度

导线表面电场强度是导线选择计算中的最基本条件 导线表面电场强度过高将会引起导线全面电晕 不但电晕损耗急剧增加 而且环境影响问题也更严重 所以在特高压线路设计中必须选择合理的导线表面电场强度<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.1 导线起始电晕电场强度

电晕是高压线附近产生的微弱的辉光 当导线

表面的电场强度超过了空气电气击穿强度时所产生局部放电就形成了电晕。通过科研单位多次试验证明 导线的起始电晕电场强度与极性的关系较小 一般认为直流线路导线起晕场强和交流线路起晕场强的峰值相同 直流线路导线的起晕场强较交流线路低得多 不影响导线极间距布置。

#### 3.1.2 导线表面最大电场强度

导线表面电场强度决定于运行电压、子导线直径、子导线分裂数、子导线分裂间距、极导线高度以及相间距离等因素。导线表面最大场强随极导线间距增加而减小 但降低的幅度不是很明显 从 16 m 增加到 24 m 表面场强降低了约 9~10%。导线表面最大场强随极导线截面的增大而减小 最大截面导线比最小截面的导线表面场强减小约 14~15%。

### 3.2 地面标称场强、合成场强和离子流密度

对直流线路而言 决定地面电场效应危害程度的主要因素是线路下合成场强和地面离子流密度。合成电场为标称场强和由空间电荷产生的电场的合成。通过多种导线的组合计算 研究发现极间距对最大合成场强和地面离子流密度的影响很小。不同极导线间距时的地面最大标称场强随着极导线间距的增加而增加 地面最大离子流密度随极导线间距的变化不大 地面最大合成场强随极导线间距的增大而减小<sup>[4,5]</sup>。不同极间距时的地面最大标称场强、地面最大合成场强、最大离子流密度计算结果详见图 2、图 3、图 4。

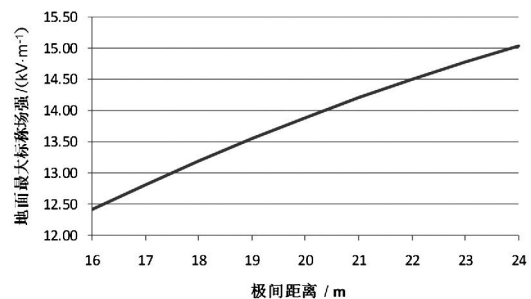


图2 不同极间距时的地面最大标称场强

### 3.3 无线电干扰分析

直流线路电晕形成的电流脉冲注入导线 并沿导线向注入点两边流动 从而在导线周围产生电磁场 即无线电干扰场。坏天气条件下的无线电干扰水平低于好天气 这是直流不同于交流线路的最大特点。正极性导线电晕放电 放电点在导线表面的分布随机性大 持续的放电点大多数出现在导线表

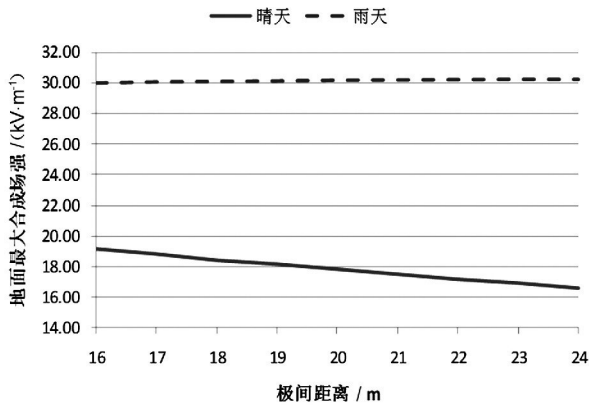


图3 不同极间距时的地面最大合成场强

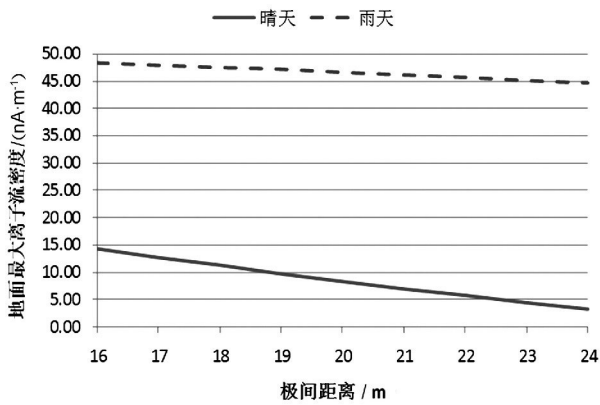


图4 不同极间距时的最大离子流密度

面有缺陷处,放电脉冲幅值大,且很不规则,是无线电干扰的主要来源。对于双极性直流输电线路,正极导线产生无线电干扰一般要比负极性大6 dB。

采用《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(GB 50790-2013)推荐的无线电干扰的经验公式进行无线电干扰场强的预估计算。对JL/G2A-1250/70导线按平均高度23 m的不同极间距进行组合计算。考虑海拔高度的影响,按海拔每增加300 m,无线电干扰场强增加1 dB(μV/m)进行修正。无线电干扰计算结果如表2所示,变化趋势详见图5。

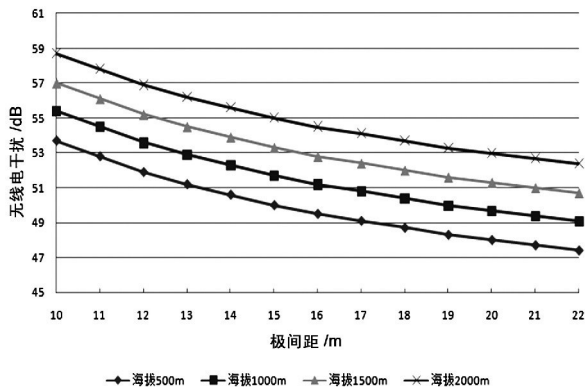


图5 无线电干扰影响的计算结果

表2 不同极间距下无线电干扰

序号	极间距 /m	无线电干扰/dB			
		海拔 500 m	海拔 1 000 m	海拔 1 500 m	海拔 2 000 m
1	10	53.7	55.4	57	58.7
2	11	52.8	54.5	56.1	57.8
3	12	51.9	53.6	55.2	56.9
4	13	51.2	52.9	54.5	56.2
5	14	50.6	52.3	53.9	55.6
6	15	50	51.7	53.3	55
7	16	49.5	51.2	52.8	54.5
8	17	49.1	50.8	52.4	54.1
9	18	48.7	50.4	52	53.7
10	19	48.3	50	51.6	53.3
11	20	48	49.7	51.3	53
12	21	47.7	49.4	51	52.7
13	22	47.4	49.1	50.7	52.4

注:导线最小对地距离取23 m。表2为好天气,距正极性导线对地投影外20 m处,80%时间,80%置信度,0.5 MHz频率的无线电干扰场强。

无线电干扰随极间距离的增大而减小,平均变化陡度约-0.38 dB/m。因此,为降低无线电干扰,可采取加大极间距离的措施。

### 3.4 可听噪声分析

《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(GB 50790-2013)推荐采用EPRI和BPA的计算公式。这里采用EPRI推荐公式计算可听噪声。JL/G2A-1250/70导线在不同极间距下,距正极导线对地投影外20 m处的可听噪声计算结果如表3所示,可听噪声变化趋势详见图6。

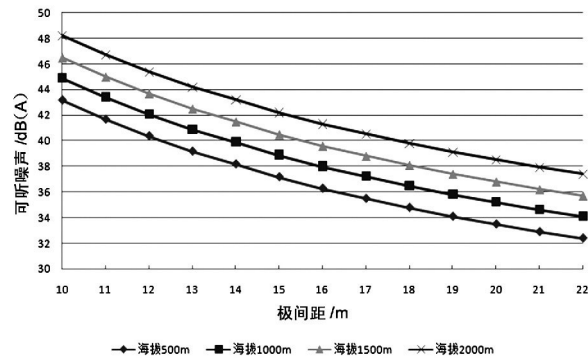


图6 可听噪声影响的计算结果

从以上计算结果可知,可听噪声随极间距离的增大而逐渐减小,平均变化陡度约-0.5 dB/m。为降低可听噪声,可采取加大极间距离、增大导线截面

等措施。

表3 不同极间距下可听噪声

序号	极间距 /m	可听噪声 /dB(A)			
		海拔 500 m	海拔 1 000 m	海拔 1 500 m	海拔 2 000 m
1	10	43.2	44.9	46.5	48.2
2	11	41.7	43.4	45	46.7
3	12	40.4	42.1	43.7	45.4
4	13	39.2	40.9	42.5	44.2
5	14	38.2	39.9	41.5	43.2
6	15	37.2	38.9	40.5	42.2
7	16	36.3	38	39.6	41.3
8	17	35.5	37.2	38.8	40.5
9	18	34.8	36.5	38.1	39.8
10	19	34.1	35.8	37.4	39.1
11	20	33.5	35.2	36.8	38.5
12	21	32.9	34.6	36.2	37.9
13	22	32.4	34.1	35.7	37.4

注:导线最小对地距离取23 m。表3为好天气,距正极性导线对地投影外20 m处。

## 4 极间距离控制值

### 4.1 电磁环境限值要求的最小极间距

直流线路的离子流密度、合成电场强度、可听噪声和无线电干扰都与极导线间距有关,地面离子流密度和地面合成电场强度一般靠合理选择极导线高度加以控制,而控制可听噪声和无线电干扰首先需考虑选择合理的极导线间距。采用大截面导线,取平均对地高度23 m时,在不同海拔满足可听噪声不超过45 dB(A),无线电干扰不超过58 dB( $\mu\text{V}/\text{m}$ )的最小极间距离,见表4。

表4 不同海拔下直线塔电磁环境要求的最小极间距离

海拔 /m	可听噪声按美国 EPRI 推荐方法海拔修正	可听噪声按中国电科院 推荐方法海拔修正
500	11	10
1 000	12	11
1 500	13	12
2 000	15	13

### 4.2 空气间隙需要的最小极间距

特高压直流线路采用V串,塔头空气间隙距离由操作过电压控制。操作过电压倍数取1.6 p.u.。考虑均压环到分裂导线中心的距离为1.3 m,导线

对应处塔身宽度3.6 m,并考虑最小空气间隙距离,汇总表如表5所示。

表5 空气间隙要求的最小极间距

海拔高度 /m	0	500	1 000	1 500	2 000
极导线间距 /m	15.2	16.0	16.8	17.4	18.0

### 4.3 绝缘子串长要求的最小极间距

根据目前 $\pm 800$  kV特高压直流线路绝缘配合研究结论,并结合绝缘子金具组装型式及塔身宽度的研究成果,计算得出绝缘子串长所要求的最小极间距。考虑金具的长度0.9 m,联板悬挂点到联板中心0.25 m,端部塔身宽度3.6 m,绝缘子V串角度为 $90^\circ$ 时,最小极间距见表6。

表6 绝缘子串长要求的最小极间距离

海拔 /m	极间距离/m	
	中污区 $0.08 \text{ mg}/\text{cm}^2$	重污区 $0.15 \text{ mg}/\text{cm}^2$
500	18.9	20.4
1 000	18.9	20.4
1 500	19.4	20.9
2 000	20.4	22.1

## 5 结论

通过对极间距离与电磁环境、空气间隙、绝缘子串长及V串夹角的关系的研究,发现直线塔极间距离主要由电磁环境、最小空气间隙和绝缘子串长及V串夹角控制。每极导线采用6分裂JL/G2A-1250/70钢芯铝绞线时,直线塔极间距离主要受绝缘子串长及V串夹角控制;电磁环境及空气间隙要求不控制极间距离。一般线路轻冰区的最小极间距离取值结论,按以上方式分析计算,汇总结论如表7所示。直线塔设计过程中,根据线路经过的不同海拔和污区分布,可对直线塔的极间距取值进行取整简化。

表7 直线塔最小极间距

海拔 /m	极间距离/m	
	中污区 $0.08 \text{ mg}/\text{cm}^2$	重污区 $0.15 \text{ mg}/\text{cm}^2$
500	18.3	19.6
1 000	18.3	19.6
1 500	19.6	20.2
2 000	19.6	21.3

注:此表采用直线塔绝缘子串V串夹角 $85^\circ$ 。

根据科研单位的试验实测数据,结合大截面导

线对极间距影响的计算分析结论,得出耐张塔的电  
磁环境按照导线表面电场强度增加近百分之三,极  
导线平均对地高度 23 m,在不同极导线间距下( 11  
~ 26 m) 正极性导线对地投影外 20 m 处可听噪声  
50% 值,按中国电科院推荐的方法修正计算耐张塔  
最小极间距。为了均衡挂点布置、方便铁塔加工、简  
化施工组装,耐张塔最小极间距离可考虑统一取值,  
汇总统计值如表 8 所示。

表 8 耐张塔最小极间距离

海拔/m	极间距离/m
500	14
1 000	14
1 500	15
2 000	16

参考文献

[1] 吴桂芳. ±800kV 直流和 1000kV 交流线路同走廊时

的最小接近距离研究[J]. 中国电力, 2007 ( 12 ): 22 - 26.

[2] GB/T 1179 - 2008, 圆线同心绞架空导线[S].

[3] GB 50790 - 2013, ±800kV 直流架空输电线路设计规范[S].

[4] 布春磊, 周海鹰, 江明. 特高压直流输电线路大截面钢芯铝绞线选型研究[J]. 电力建设, 2013, 34( 9 ): 102 - 104.

[5] 万建成, 李健, 陈媛, 等. 铝合金芯铝型绞线在大容量直流线路中的应用[J]. 电力建设, 2013, 34( 8 ): 105 - 106.

作者简介:

周 唯(1982), 硕士, 工程师, 从事输电线路技术设计工作;

周 刚(1964), 本科, 高级工程师, 主要从事输电规划、研究、咨询设计工作;

吴子怡(1981), 硕士, 工程师, 主要从事电网工程咨询设计及造价设计工作。

( 收稿日期: 2014 - 10 - 28)

( 上接第 8 页)

在仿真系统平台上完成的继电保护动作案例, 收集案例的参数设置、动作报告和故障波形, 通过图片和录波图的方式以附件的报告形式完成, 便于进行离线培训, 即该案例库可以在实训站的仿真系统上故障再现, 也可以脱离 110 kV 实训智能变电站离线使用, 培训地点灵活。通过变压器保护、线路保护、备自投装置案例, 使智能变电站继电保护常见的保护动作行为和带负荷测试分析得到了完整的、具体的呈现, 便于学员理解和掌握。

目前该案例库已在国网新员工培训和智能变电站技术培训班中使用, 在实训操作培训之后, 再使用案例具体地分析故障过程, 易于学员理解, 加深印象, 取得了良好的培训效果。后续可以在以下领域发挥更大作用。

(1) 利用数字物理混合仿真系统和 110 kV 实训智能变电站的现场设备, 可以开展变电运行和厂站端自动化专业的培训。

(2) 如果有继电保护故障信息培训系统, 利用仿真案例库, 可以更好地对故障信息系统培训做有益的补充。

(3) 仿真案例库开发建设的建模方法、测试技

术和方法可以为自动化子站、主站仿真案例库的开发积累丰富的经验, 促进这些专业技能培训的能力提升。

参考文献

[1] Q/GDW 383 - 2009, 智能变电站技术导则[S].

[2] Q/GDW 426 - 2010, 智能变电站合并单元技术规范[S].

[3] Q/GDW 428 - 2010, 智能变电站智能终端技术规范[S].

[4] 高亚栋, 朱炳铨, 李慧, 等. 数字化变电站的“虚端子”设计方法应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011 ( 5 ): 120 - 123.

作者简介:

黄忠胜(1982), 硕士, 讲师, 从事继电保护方面研究;

刘 娟(1984), 学士, 助理工程师, 主要研究方向智能用电和配电自动化;

廖小君(1974), 硕士, 副教授, 从事微机继电保护方面研究及信息系统的研究;

王婷婷(1977), 大学, 高级工程师, 从事继电保护方面研究;

韩花荣(1981), 硕士, 讲师, 从事继电保护方面研究。

( 收稿日期: 2014 - 12 - 22)