

30 mm 重冰区 ± 1100 kV 特高压直流线路设计

林锐^{1*}, 翁兰溪¹, 何园丁², 陈允清¹, 赵晶³

(1. 中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司, 福建省 福州市 350003;

2. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川省 成都市 610041;

3. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏省 南京市 211102)

Design of ± 1100 kV UHVDC Transmission Line at 30 mm Heavy Icing Area

LIN Rui^{1*}, WENG Lanxi¹, HE Yuanding², CHEN Yunqing¹, ZHAO Jing³

(1. POWERCHINA Fujian Electric Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350003, Fujian Province, China;

2. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan Province, China;

3. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu Province, China)

Abstract: The Changji–Guquan ultrahigh-voltage direct current (UHVDC) project is the first $\pm 1,100$ kV UHVDC project in the world. The UHVDC transmission line in this project passes through Qinling mountain at an altitude of 2,500 m through a 30-mm-thick ice coating in the Shaanxi Province of China. However, the design scheme is the key problem in the project construction. In this paper, the primary design principle including the selection of the multi-bundled polar conductor and the ground wire for a 30-mm heavy ice area, and the number of units of insulator strings, insulator set and fittings, the air gap at the tower, lighting protection, type of tower, tower load, and so on, is summarized and discussed in depth based on the successful design experience of the Changji–Guquan UHVDC project. The study results will provide theoretical and experimental experience for other UHVDC projects.

Keywords: $\pm 1,100$ kV UHV; heavy icing area; DC; transmission line design

摘要: 昌吉–古泉特高压工程是世界上首个 ± 1100 kV特高压直流输电工程。线路于陕西省境内翻越秦岭高海拔重冰区, 最高海拔达到2500 m, 设计覆冰厚度达到30 mm, 该区段线路设计方案的可靠性及合理性成为整个工程设计的难点和关键之一。结合昌吉–古泉 ± 1100 kV特高压直流输电工程成功的设计经验, 对30 mm重覆冰区段的导线选型、绝缘子选择及配置、塔头空气间隙、防雷保护、金具及绝缘子串、杆塔型式、杆塔荷载等关键设计方案进行了论证和分析。30 mm重冰区关键设计技术的研究成果可为后续特高压直流重冰区线路工程设计提供参考。

关键词: ± 1100 kV特高压; 重冰区; 直流; 线路设计

0 引言

± 1100 kV直流输电是目前国际上电压等级最高、传输距离最远、输送容量最大、技术最先进的直流输电方式^[1-2], 相较于 ± 800 kV特高压直流输电, 容量由10 000 MW提升到12 000 MW, 输电距离提高到3000 km以上, 进一步提高了特高压直流输电效率及经济性。中国虽然在 ± 800 kV特高压直流线路的设计、建设和运行上积累了丰富的经验^[3-7], 但与现有的 ± 800 kV直流线路相比, ± 1100 kV特高压直流线路电压等级更高、输送容量更大, 其导线选型、绝缘配置、杆塔荷载等主要设计技术原则与 ± 800 kV直流线路有较大差异, 其他国家也没有相关经验可供参考。

昌吉–古泉 ± 1100 kV特高压直流线路工程(± 1100 kV吉泉线)作为准东煤电基地电能外送的重要通道, 线路全长约3293 km, 途径中国多个省(自治区), 沿线气象条件、地形地貌复杂, 特别是线路翻越秦岭东部高海拔无人区段时最高海拔达到2500 m。同时该区域是黄河、长江两大流域的分水岭, 是中国一条重要的自然地理分界线, 北方的冷空气和南方的暖湿空气在此交汇, 极易在迎风坡和分水岭形成严重的覆冰。根据覆冰调查及观冰站覆冰资料频率分析成果, 结合线路所经地区的地形地貌、海拔、植被、气候特征, 翻越秦岭高海拔无人区段设计覆冰厚度确定为30 mm^[8], 是工程全线覆冰最严重地区, 该区段线路设计方案的可靠性及经济性成为制约

整个工程建设的难点和关键。

为保障工程安全和质量、降低工程造价, ±1100 kV 吉泉线在借鉴锦苏、云广、溪浙±800 kV特高压直流线路重覆冰区段设计经验的基础上, 充分结合科研单位最新的研究和试验成果, 完成30 mm重覆冰区段的设计原则和标准的研究与论证, 本文重点对±1100 kV 吉泉线30 mm重覆冰区的关键设计方案进行总结和分析。

1 重冰区导线选择

1.1 导线选择

导线的电气性能、机械特性和经济性是导线选型中需要考虑的问题, 根据±1100 kV电压等级线路轻、中冰区段极导线选型成果, 极导线采用 $8 \times 1250 \text{ mm}^2$ 方案能满足输送容量及电磁环境限值要求, 且全寿命周期经济性较优^[9]。

30 mm重冰区段需重点考虑避免导线在重冰过载和不均匀覆冰条件下发生断线、断股事故^[10], 故应选取强度较大、铝股受力好的导线。铝合金绞线具有优良的机械特性, 选择钢芯中(高)强度铝合金绞线与普通钢芯铝绞线进行比较, 比选导线的技术参数如表1所示。

表1 比选导线技术参数

Table 1 Parameters of selected conductors

导线型号	8×JL1/ G2A- 1250/100 普通钢芯铝 绞线	8×JLHA4/ G2A- 1250/100 钢芯中强度 铝合金绞线	8×JLHA1/ G2A- 1250/100 钢芯高强度 铝合金绞线
铝(铝合金)股数	84×4.35	84×4.35	84×4.35
钢股数	19×2.61	19×2.61	19×2.61
总截面/mm ²	1 350.03	1 350.03	1 350.03
直径/mm	47.85	47.85	47.85
线重/(kg·km ⁻¹)	4 252.3	4 252.3	4 252.3
20℃直流电阻 /(Ω·km ⁻¹)	0.023	0.024 81	0.026 94
计算拉断力/kN	329.85	448.45	523.35
弹性模量/GPa	65.2	65.2	65.2
热膨胀系数 /(×10 ⁻⁶ ℃)	20.5	20.5	20.5

表2为比选导线在30 mm冰区的覆冰过载能力及铝部安全系数。

表2 导线覆冰过载能力及铝部安全系数

Table 2 Ability of ice overload and aluminium safety factor of selected conductors

导线型号	JL1/G2A- 1250/100	JLHA4/G2A- 1250/100	JLHA1/G2A- 1250/100
导线安全系数	2.5	3.4	4.0
覆冰 过载 能力 /mm	$L_p=300 \text{ m}$	50.61	70.10
	$L_p=500 \text{ m}$	48.59	65.87
	$L_p=700 \text{ m}$	47.59	63.71
铝部 应力 及安 全系 数	最大应力 /MPa	81.45	81.42
	安全系数	1.96	3.62
	年均应力 /MPa	35.49	35.48
	安全系数	4.51	8.32

根据计算结果, 各导线的抗冰能力均满足要求。

不同电价、年损耗小时数条件下比选导线的本体投资及年费用对比见表3。

表3 导线本体投资及年费用对比表(折现率8%)

Table 3 Initial investment and annual cost comparison of selected conductors(discount rate 8%)

导线型号	8×JL1/G2A- 1250/100	8×JLHA4/ G2A- 1250/100	8×JLHA1/ G2A- 1250/100
本体投资 /(万元·km ⁻¹)	2 133.6	2 161.1	2 157.9
电价/(元·kWh ⁻¹)	0.4	0.5	0.4
能耗费 用/(万 元·km ⁻¹)	3500 h	24.6	32.9
	4000 h	29.9	39.9
	4500 h	35.2	47.0
年费用 /(万 元·km ⁻¹)	3500 h	318.4	323.8
	4000 h	323.7	329.5
	4500 h	329.0	335.2

从经济性角度, 采取JL1/G2A-1250/100导线最优, 但JLHA4/G2A-1250/100导线覆冰过载能力、安全储备高, 考虑工程的重要性, 推荐30 mm重冰区段导线采用8×JLHA4/G2A-1250/100型钢芯中强度铝合金绞线以提高线路抗冰能力。

1.2 地线选择

铝包钢绞线具有导电性能好、质量轻、耐腐蚀性能好的优点, 普通地线采用铝包钢绞线。随着线路电

压等级由±800 kV提升至±1100 kV, 地线电晕导致的电晕损失、可听噪声和无线电干扰问题更加突出。根据溪浙、灵绍等特高压直流线路现场测试结果, 地线表面场强应按不大于18 kV/cm控制, 按此计算地线满足场强要求的最小直径为20 mm。

考虑重冰区线路对地线机械性能、满足导线不均匀覆冰时静态接近和导线脱冰跳跃时动态接近的要求, 30 mm重冰区地线采用JLB20B-240铝包钢绞线, 相应的架空光缆选用OPGW-240。

2 高海拔重冰区绝缘配合

2.1 污区划分及绝缘子型式

重冰区位于秦岭高海拔山区, 海拔高度达到2500 m, 线路附近无直流线路运行经验和直流盐密测试数据供参考, 根据交流盐密及直交流积污比预测直流盐密。采用文献[11]方法计算线路绝缘子的直交流积污比:

$$k = 199d^{-2.06}, V < 1.5 \text{ m/s} \quad (1)$$

$$k = 3.66(V \cdot d)^{-0.173}, V \geq 1.5 \text{ m/s} \quad (2)$$

式中: k 为盘型绝缘子直交流积污比; d 为累积概率为50%的污秽颗粒的粒径, μm ; V 为冬季地面平均风速, m/s 。

秦岭重冰区植被覆盖良好, 无工业污染和生活污染, 线路交流绝缘子年度等值盐密确定为 0.02 mg/cm^2 。冬季平均风速为 1.79 m/s 、累积概率50%的污秽颗粒粒径为 $16.7 \mu\text{m}$, 则直交流积污比为2.0, 确定直流年度盐密为 0.04 mg/cm^2 , 为直流轻污区。

根据中国特高压直流线路设计经验^[12], 重冰区均采用盘式绝缘子。外伞形绝缘子具有良好防覆冰桥接能力, 推荐重冰区悬垂串采用外伞形绝缘子; 耐张串绝缘子呈水平排列, 不同结构绝缘子防污、防冰性能差异较小, 可采用钟罩或外伞形绝缘子。

2.2 绝缘子片数选择

重冰区段线路绝缘子片数选择时除需满足工作电压下污秽条件确定的绝缘子片数外, 还需满足严重覆冰情况下绝缘子串不发生闪络。雨淞覆冰条件下, 当冰柱桥接绝缘子后, 绝缘子的耐受电压随之降低。试验表明^[13-15], 绝缘子串冰闪电压与海拔高度、冰厚、绝缘子型式、电压极性、覆冰水电导率、绝缘子串布置方式等因素有关。中国电力科学研究院^[16]采用污耐压法和覆冰耐压法得到的悬垂串绝缘子配置见表4。

表4 悬垂串外伞型绝缘子配置 (海拔2500 m)

Table 4 Configuration of suspension string (at an altitude of 2500 m)

污区	参数	污耐压法 /片	冰耐压法 /片	推荐值 /片
	210 kN (170 mm)	109	122	122
轻污区	420 kN (205 mm)	90	101	101
	550 kN (240 mm)	79	86	86

可见, 覆冰耐压为高海拔重冰轻污区线路悬垂串绝缘子片数的控制条件。

耐张绝缘子串呈水平布置, 不易发生覆冰桥接, 自清洁及抗冰闪能力均优于悬垂串, 绝缘子片数可与污耐压法一致, 配置情况见表5。

表5 耐张串推荐配置 (海拔2500 m)

Table 5 Recommended configuration of tension string (at an altitude of 2500 m)

污区	参数	污耐压法/片
轻污区	550 kN钟罩型	88
	550 kN三伞型	79

2.3 塔头间隙的绝缘配合

1) 直流工作电压下的空气间隙^[11,17-19]

绝缘子串风偏后导线对杆塔空气间隙的直流50%放电电压 $U_{50\%}$ 计算式:

$$U_{50\%} = \frac{K_2 \cdot K_3}{(1 - 3\sigma_N) \cdot K_1} U_e \quad (3)$$

式中: U_e 为额定电压, 取1100 kV; K_1 、 K_2 分别为直流电压下的空气密度、湿度校正系数; K_3 为安全系数, 取1.15; σ_N 为空气间隙直流放电电压的变异系数, 取0.9%。

2) 操作过电压下的空气间隙

风偏后导线对杆塔的空气间隙正极性50%操作冲击放电电压 $U'_{50\%}$ 计算式:

$$U'_{50\%} = \frac{K'_2 \cdot K'_3}{(1 - 2\sigma_s) \cdot K'_1} U_m \quad (4)$$

式中: U_m 为最高运行电压, 取1122 kV; K'_1 、 K'_2 分别为操作冲击电压下的空气密度、湿度校正系数; K'_3 为操作过电压倍数; σ_s 为空气间隙操作冲击电压放电电压的变异系数, 取5%^[11,19]。

操作过电压的沿线分布情况如图1所示。可见, 操作过电压分布呈现中间高、两端低的趋势, 全线最高操作过电压倍数为1.58 pu, 以往特高压直流工程由

于线路相对较短，全线均按统一过电压倍数进行绝缘配置。本线路30 mm重冰区段实际对应的操作过电压倍数为1.47 pu左右，可按1.5 pu取值。

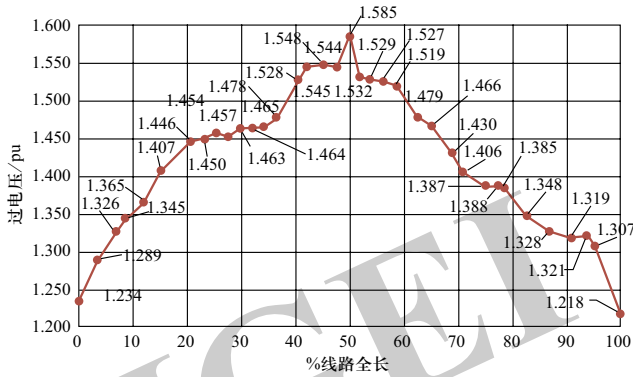


图1 操作过电压沿线分布图

Fig. 1 Distribution of switching overvoltage

中国电力科学研究院在北京和西藏试验基地采用真型模拟杆塔进行了空气间隙放电试验，获得了操作冲击、直流放电电压以及相应海拔校正系数^[19]，如图2、图3所示。

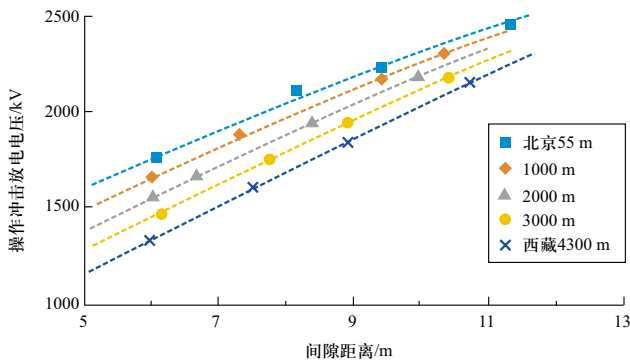


图2 不同海拔下操作冲击放电特性曲线

Fig. 2 Switching impulse discharge characteristics at different altitudes

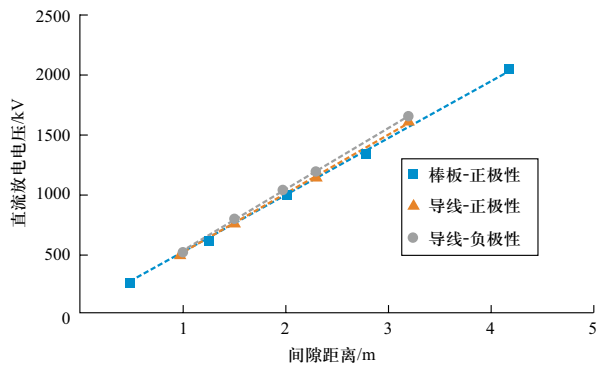


图3 导线-杆塔间隙的直流放电特性曲线

Fig. 3 DC discharge characteristics for conductor-tower gap

表6为重冰区直流电压及不同过电压倍数操作冲击下塔头所需的最小空气间隙距离。

表6 2500 m海拔的直流电压及操作冲击下杆塔所需最小空气间隙

Table 6 Minimum tower gap distance under DC voltage and switching impulse voltage at an altitude of 2500 m

条件	海拔校正因素	最小空气间隙/m
直流电压	1.43	4.0
操作过电压 (1.5 pu)	1.08	9.0
操作过电压 (1.58 pu)	1.08	9.6

可见，操作过电压倍数1.5 pu要求的空气间隙值比1.58 pu要求的空气间隙值减小约0.6 m，有利于减小塔头尺寸及塔重。

2.4 防雷保护

30 mm重冰区段地形主要为山地、高山，沿线雷暴日为30 d/a。分别采用电气几何模型和行波法进行绕击和反击闪络率计算，得到重冰区段的反击耐雷水平、反击和绕击闪络率如表7、表8所示。

表7 杆塔反击耐雷水平和反击闪络率

Table 7 Back striking lighting withstand level and flashover rates

土壤电阻率/($\Omega \cdot m$)	500~1000	1000~2000	2000以上
工频接地电阻/ Ω	20	25	30
反击耐雷水平/kA	213	192	181
反击闪络率/(次·(100 km·a) ⁻¹)	0.050	0.086	0.115

表8 不同保护角下杆塔绕击闪络率

Table 8 Shielding failure flashover rates under various shielding angles

保护角/($^\circ$)	-10		-15	
地形	一般山地	高山	一般山地	高山
绕击闪络率/(次·(100 km·a) ⁻¹)	0.503	0.891	0.322	0.570

可见，由于±1100 kV线路绝缘子串较长、空气间隙较大，反击耐雷水平较大，防雷保护角的减小对绕击闪络率指标影响显著。

结合工程全线平均雷暴日、工频接地电阻、塔头设计及杆塔呼高等参数，确定地线保护角采用山地不大于 -15° ，全线雷击跳闸率为0.058次/(100 km·a)，满足文献[20]中雷击跳闸率控制参考值0.1次/(100 km·a)的要求。

3 重冰区主要绝缘子串型选择

3.1 绝缘子串的联间距

为避免导线脱冰跳跃导致联间绝缘子相互碰撞、裙边受损,在重冰区适当加大联间距离,悬垂串联间距取1000 mm、耐张串联间距取1200 mm。

3.2 绝缘子串强度及串型

根据重冰区实际的荷载条件,确定导线V型绝缘子串强度配置为单肢双联550 kN及单肢三联420 kN、550 kN等级。为避免重冰区杆塔前后侧档距因覆冰率不同导致绝缘子串顺线偏移而出现一联卸载情况,V串的单肢绝缘子设计成单挂点方式。图4为典型悬垂串示意图。

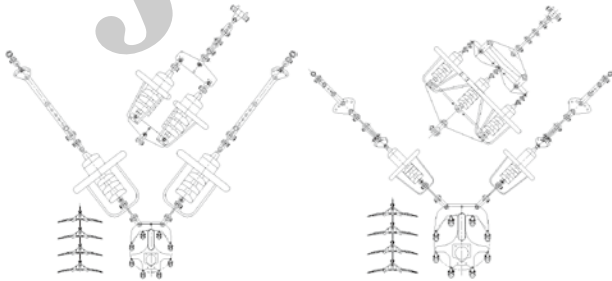


图4 悬垂串示意图

Fig. 4 Schematic of suspension string

30 mm冰区采用的导线截面大、荷载强度大,对耐张串强度提出了更高的要求,推荐采用六联550 kN盘式绝缘子,如图5所示。

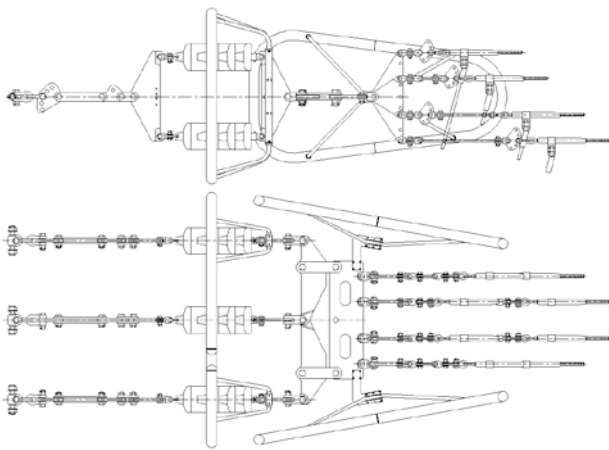


图5 耐张串示意图

Fig. 5 Schematic of tension string

由于 ± 1100 kV耐张塔绝缘子片数多、串长大,常用的跳线方式弧垂和风偏较大。为了有效解决该问

题,重冰区采用210 kN盘型绝缘子组装成双V串笼式硬跳线串,如图6所示。

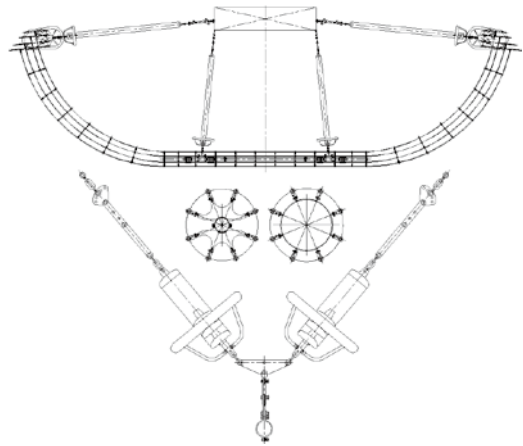


图6 双V笼式跳线示意图

Fig. 6 Schematic of double V-style rigid jumpers

4 重冰区杆塔设计

4.1 杆塔型式研究

4.1.1 悬垂塔

为防止不均匀覆冰及导线脱冰跳跃导致导线极间发生闪络,参考 ± 800 kV线路工程经验^[21],推荐 ± 1100 kV直流重冰区线路导线采用水平排列、“V串”挂线方式。

重冰区自立式直线杆塔型式有干字型塔、单极酒杯塔、门型塔等,塔型示意如图7。

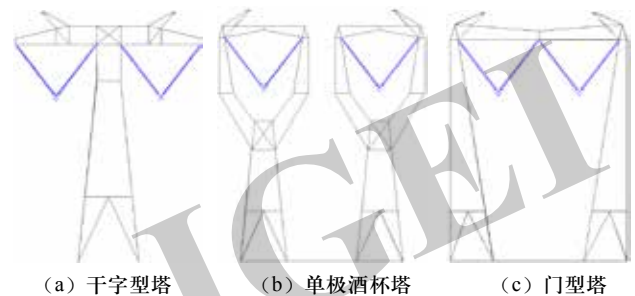


图7 直线塔塔型对比

Fig. 7 Comparison of suspension towers

干字型塔是直流线路最常用的传统塔型,具有型式简洁、传力清晰、塔重较轻、运维方便、综合造价较低等特点。单极酒杯塔塔位选择灵活、施工安装方便,但运维不便,塔重较干字型塔重约15%,适用于采空区立塔。门型塔可缩小极间距、减小扭矩、节约线路走廊,但横担跨度大(40 m以上),荷载集横担正中导致变形大,该塔型占地较大、塔重较干字型塔

增加约30%，适用于走廊拥挤地段。

根据重冰区实际情况，推荐悬垂塔采用水平排列、V型串挂线方式的干字型塔。

4.1.2 耐张塔

将传统整体式干字型耐张塔导线挂点移到塔身上形成分体式耐张塔，则铁塔就没有受扭情况，仅有弯矩组合，可减小塔重。图8为传统式干字型耐张塔和分体式耐张塔的布置图。图9为传统式和分体式耐张塔综合造价比与转角度数的关系。

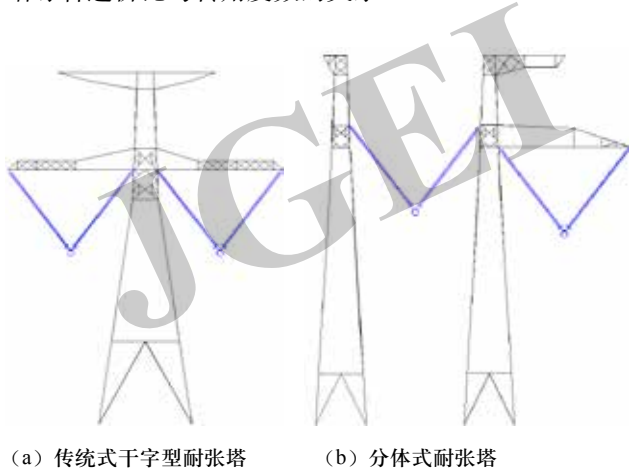


图8 传统式干字型耐张塔和分体式耐张塔布置图

Fig. 8 Arrangement of traditional strain tower and separate strain tower

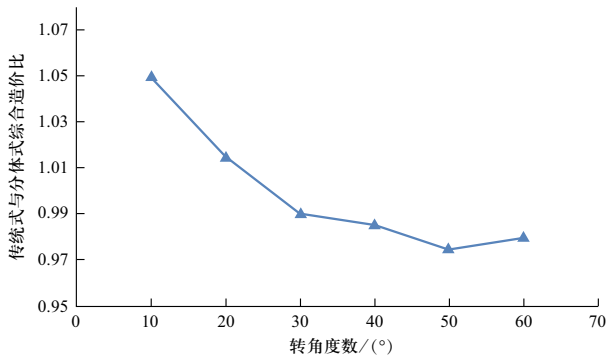


图9 传统式与分体式耐张塔综合造价比与转角度数关系

Fig. 9 Ratio of the comprehensive cost of traditional strain tower and separate strain tower vs strain angle

分体式耐张塔在塔重方面具有优势，但其基础混凝土量及征地面积较大，综合造价优势随转角增大而减小，当转角增大到 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时，两种塔型造价相当，当转角继续增大，传统式塔较分体式塔更具优势。理论上转角度数小于 30° 时，可以采用分体式耐张塔，转角度数大于 30° 时，采用传统式耐张塔更为经济。

由于 ± 1100 kV吉泉线30 mm重冰区相对较短，且

受外部条件限制，转角度数小于 30° 的转角塔较少，分体式耐张塔在工程中未实际应用，但可在后续合适的工程中应用。

4.2 杆塔使用条件规划

根据航片得到的断面数据，利用自动优化排位决策软件进行杆塔优化排位，应用概率统计方法对排位结果进行分析规划，成果见表9。

表9 重冰区杆塔规划成果

Table 9 Tower planning results

塔型	塔高/m	水平档距/m	垂直档距/m	转角度数/ $(^{\circ})$	代表档距/m	Kv值
ZC30301	51~63 (66~72)	420	650		450	0.8
ZC30302	51~69 (72~90)	550	800		450	0.7
JC30301	51~60 (63~72)	500	$\pm 600/300$	0~30	250~500	
JC30302	51~60 (63~72)	500	$\pm 600/300$	30~60	250~500	

注：括号内的数字表示塔高大于计算呼称高时缩小水平档距验算使用。

4.3 重冰区塔头布置控制条件

塔头布置主要控制条件有塔头上的电气间隙、档距中的线间距、防止档距中雷电反击所需的导线线相对布置、地线与相邻导线间的水平偏移。

经计算和校核，重冰区直线塔极间距由绝缘子串长及V串夹角控制，不受电磁环境因素和塔头空气间隙控制。耐张塔极间距离由电磁环境控制，最小极间距为22 m。

由于重冰区档距较小，不均匀覆冰静态接近及脱冰跳跃所要求的导线垂直线间距离对塔头尺寸不起控制作用。导线间最小垂直距离和水平偏移由避免地线表面发生电晕及地线对导线的保护角决定。重冰区直线塔地线支架高度为23 m减等效垂直串长，耐张塔地线支架高度为23 m。

图10为按照塔头布置控制条件规划出的30 mm重冰区典型杆塔单线图。

4.4 杆塔荷载取值及荷载组合

目前中国 ± 800 kV重冰区线路已取得成功的设计及运行经验，表明按照文献[22]规定的杆塔荷载设计取值是可靠的。 ± 1100 kV重冰线路的覆冰风荷载、

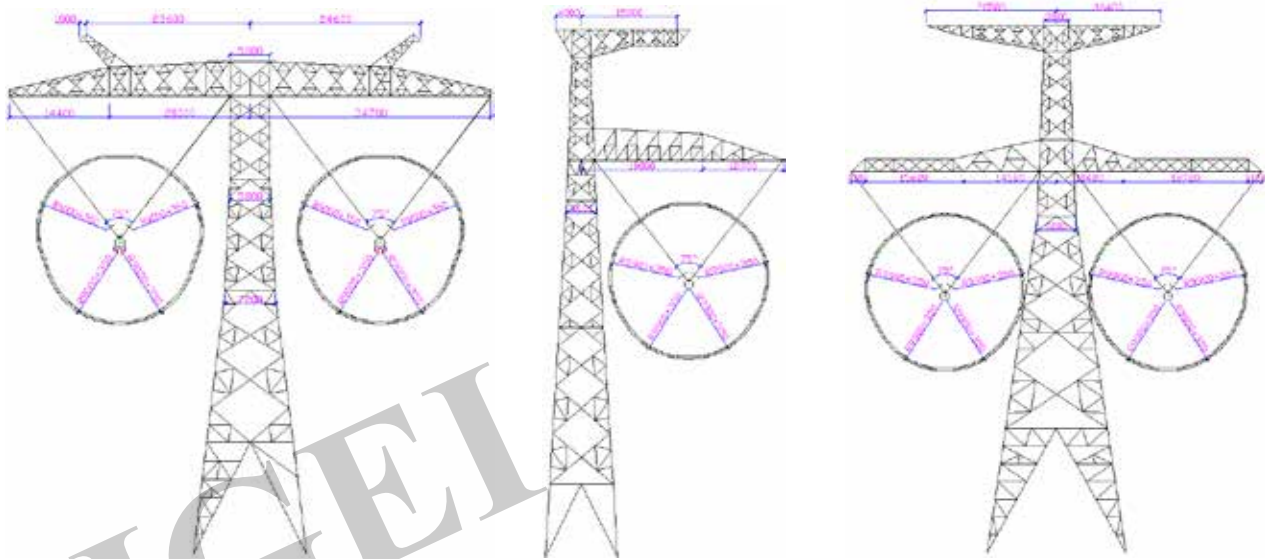


图 10 30 mm重冰区典型杆塔单线图

Fig.10 Single-line diagram of typical towers at 30 mm heavy icing area

覆冰断线荷载、不均匀冰荷载、验算覆冰荷载、脱冰跳跃等荷载取值可按参照规程规定及±800 kV重冰线路的荷载取值。

表10、11分别为工程典型ZC30302（呼高69 m）、JC30302（呼高60 m）塔在不同荷载组合下的塔重。

表 10 不同荷载组合对ZC30302塔重的影响

Table 10 Influence of load combination on the weight of suspension tower

荷载组合形式	塔重/t	塔重占比
基本组合	211.6	86.5%
基本组合+不均匀冰	238.5	97.5%
基本组合+验算冰	214.3	87.6%
全部工况组合	244.6	100%

注: ①基本组合包括大风工况、覆冰工况、安装工况、断线工况; ②验算冰厚取45 mm。

表 11 不同荷载组合对JC30302塔重的影响

Table 11 Influence of load combination on the weight of strain tower

荷载组合形式	塔重/t	塔重占比
基本组合	258.2	89.5%
基本组合与+不均匀冰	278.1	96.4%
基本组合+验算冰	284.7	98.7%
全部工况组合	288.5	100%

注: ①基本组合包括大风工况、覆冰工况、安装工况、断线工况; ②验算冰厚取45 mm。

可见, 对于±1100 kV重冰区直线杆塔, 在全部工况组合中, 基本组合+不均匀冰为主要控制工况, 占有所有工况组合塔重的97.5%。对于耐张塔, 基本组合+验算冰为主要控制工况, 占有所有工况组合塔重的98.7%, 不均匀冰也是影响塔重的关键, 但影响程度较验算冰略小。

4.5 真型塔试验

为检验主要荷载工况下主要杆件受力理论计算值与实测值之间的符合性, 保证塔型的刚度、强度、稳定满足要求, 选取ZC30302塔开展真型试验。

试验工作在中国电力科学研究院霸州特高压杆塔试验基地完成, 该塔进行以下7个工况的试验。

- 工况1: 运行覆冰, 最大垂重, 90° 风;
- 工况2: 检修吊装左极导线(双点), 右侧正常;
- 工况3: 断右地线, 其余未断, 最大垂重;
- 工况4: 断右导线, 其余未断, 最大垂重;
- 工况5: 90° 风向(塔身横向最大弯矩);
- 工况6: 90° 风向(塔身最大扭矩);
- 工况7: 45° 风向(塔身纵向最大弯矩)。

试验塔顺利通过上述主要设计工况的100%荷载试验, 其中45° 风工况超载至115%设计荷载时塔身变坡下主材屈服, 随后被试塔倒塔破坏, 相关试验情况见图11。试验数据与理论计算较吻合, 试验结果表明铁塔设计安全可靠, 经济合理, 满足工程应用要求。



图 11 真型塔试验照片

Fig. 11 Photographs of tower test

5 结论

1) 极导线采用 $8 \times \text{JLHA4/G2A-1250/100}$ 钢芯中强度铝合金绞线、地线采用 JLB20B-240 铝包钢绞线及 OPGW-240 以提高线路抗冰能力。

2) 覆冰耐压为高海拔重冰轻污区线路悬垂串绝缘子片数选择的控制条件。跳线串及悬垂串配置的 210 kN 、 420 kN 、 550 kN 外伞型绝缘子片数分别为 122 、 101 、 86 ；耐张串配置的钟罩型或外伞型绝缘子片数分别为 88 或 79 。

3) 线路操作过电压倍数可采用 1.5 pu ， 2500 m 海拔下操作过电压空气间隙为 9.0 m ，直流电压间隙为 4.0 m 。

4) $\pm 1100 \text{ kV}$ 线路绝缘子串较长、空气间隙较大，反击耐雷水平较高，保护角推荐采用 -15° 。

5) 导线悬垂 V 串采用单肢双联 550 kN 及单肢三联 420 kN 、 550 kN 等级，耐张串采用六联 550 kN 盘式绝缘子，跳线串采用 210 kN 盘型绝缘子组装成双 V 串笼式硬跳线串。

6) 悬垂塔推荐采用 V 型绝缘子串挂线方式的干字型塔。对于转角塔而言，当转角小于 30° 时，分体式耐张塔综合造价较优，当转角大于 30° 时，传统整体式干字型耐张塔更具优势。

7) 对于重冰区直线杆塔，基本组合+不均匀冰为主要控制工况；对于耐张塔，基本组合+验算冰为主要控制工况。

8) 通过真型塔试验验证了铁塔结构布置的合理性和安全性。

参考文献

- [1] 刘泽洪, 郭贤珊, 乐波, 等. $\pm 1100 \text{ kV}/12000 \text{ MW}$ 特高压直流输电工程成套设计研究[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1023-1031.
LIU Zehong, GUO Xianshan, YUE Bo, et al. System design of $\pm 1100 \text{ kV}/12000 \text{ MW}$ UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1023-1031(in Chinese).
- [2] 余军, 蓝磊, 孙泽中, 等. 考虑地面倾角下 $\pm 1100 \text{ kV}$ 重要输电通道内邻近线路间雷电屏蔽效应仿真计算[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 366-373.
YU Jun, LAN Lei, SUN Zezhong, et al. Simulation of lightning shielding between adjacent lines considering ground slope angle in important $\pm 1100 \text{ kV}$ DC transmission channel[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 366-373(in Chinese).
- [3] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [4] 李勇伟, 周康, 李力, 等. $\pm 800 \text{ kV}$ 直流特高压输电线路的设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1518-1525.
LI Yongwei, ZHOU Kang, LI Li, et al. Design of $\pm 800 \text{ kV}$ DC UHV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1518-1525(in Chinese).
- [5] 舒印彪, 张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 1-6.
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 1-6(in Chinese).
- [6] 张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, LI Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7(in Chinese).
- [7] 吕建红, 李国勇, 何智强, 等. 基于Deutsch假设法同塔高压/特高压直流输电线路地面合成场强研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(2): 156-161.
LYU Jianhong, LI Guoyong, HE Zhiqiang, et al. Research on total electric field at the ground level under HV/UHV double-circuit DC transmission lines on the same tower based on Deutsch assumption[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(2): 156-161(in Chinese).
- [8] 国家电网公司. 准东—华东 $\pm 1100 \text{ kV}$ 特高压直流线路工程初步设计[R]. 北京: 国家电网公司, 2016.
- [9] 李先志, 梁明, 李澄宇, 等. $\pm 1100 \text{ kV}$ 特高压直流输电线路按电磁环境条件的导线设计[J]. 高电压技术, 2012,

- 38(12): 3284-3291.
LI Xianzhi, LIANG Ming, LI Chengyu, et al. Conductor design of ± 1100 kV UHVDC transmission lines based on electromagnetic environment conditions[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3284-3291(in Chinese).
- [10] 易海蓉, 王婷婷, 李育兵, 等. 钢芯中强度铝合金绞线在特高压直流输电线路30 mm冰区中的应用[J]. 四川电力技术, 2017, 40(5): 34-38.
YI Hairong, WANG Tingting, LI Yubing, et al. Application of aluminum-alloy conductor medium-strength steel reinforced to 30 mm heavy icing area of UHVDC transmission lines[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2017, 40(5): 34-38(in Chinese).
- [11] 中华人民共和国发展和改革委员会. 高压直流架空送线路技术导则: DL/T 436—2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [12] 田亮. ± 1100 kV特高压直流输电线路污秽分区及绝缘配置研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
TIAN Liang. Study on pollution classification and insulation configuration of ± 1100 kV UHV DC transmission line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016(in Chinese).
- [13] 张海平, 张驰, 王江涛, 等. 20 mm重冰区500 kV同塔双回输电线路设计[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 123-131.
ZHANG Haiping, ZHANG Chi, WANG Jiangtao, et al. Design of 500 kV AC double-circuit transmission line on the same tower located at 20 mm heavy icing area[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 123-131(in Chinese).
- [14] 胡建林. 低气压下覆冰绝缘子(长)串闪络特性及直流放电模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
HU Jianlin. Study on flashover performance and DC discharge model of ice-covered insulator string at low air pressure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [15] 于昕哲, 周军, 刘博, 等. ± 1100 kV线路长串盘形绝缘子污闪特性研究[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 393-399.
YU Xinzhe, ZHOU Jun, LIU Bo, et al. Research on pollution flashover performance of ± 1100 kV long line disc insulator string[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 393-399(in Chinese).
- [16] 黄瑞平, 周军. 准东—华东 ± 1100 kV特高压直流输电线路过电压沿线污秽调研与测量及绝缘配置研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2015.
- [17] 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. ± 800 kV直流架空线路设计规范: GB 50790—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [18] 陈秀娟, 张翠霞, 时卫东, 等. ± 800 kV特高压直流输电线路绝缘配合的差异化[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1726-1731.
CHEN Xiujuan, ZHANG Cuixia, SHI Weidong, et al. Insulation coordination differentiation for ± 800 kV UHVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1726-1731(in Chinese).
- [19] 丁玉剑, 律方成, 李鹏, 等. ± 1100 kV特高压直流杆塔间隙放电特性[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1032-1038.
DING Yujian, LÜ Fangcheng, LI Peng, et al. Discharge characteristics of ± 1100 kV UHV DC tower air gaps[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1032-1038(in Chinese).
- [20] 国家电网公司. 架空输电线路防雷导则: Q/GDW 11452—2015[S]. 北京: 国家电网公司, 2015.
- [21] 赵远涛, 吕健双, 李健, 等. 重冰区特高压输电线路脱冰跳跃及塔头设计研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(2): 150-155.
ZHAO Yuantao, LYU Jianshuang, LI Jian, et al. Research on ice-shedding and tower head design for UHV overhead transmission lines in heavy icing area[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(2): 150-155(in Chinese).
- [22] 中华人民共和国国家能源局. 重覆冰架空输电线路设计技术规程: DL/T 5440—2009[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

收稿日期: 2020-02-25; 修回日期: 2020-03-26。

作者简介:



林锐

林锐(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 注册电气工程师(发输变电), 主要从事超/特高压输电线路设计及研究工作。通信作者, E-mail: 156204974@qq.com。

翁兰溪(1980), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事超/特高压输电线路设计及研究工作, E-mail:

328509286@qq.com。

何园丁(1979), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事超/特高压输电线路设计及研究工作, E-mail: 9027383@qq.com。

陈允清(1964), 男, 本科, 高级工程师, 长期从事高压输电线路设计、研究及管理工作, E-mail: chenyunqing@fedi.com.cn。

赵晶(1982), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事超/特高压输电线路设计及研究工作, E-mail: 275867727@qq.com。

(责任编辑 李锡)