

±1 100 kV 特高压直流输电线路 导线结构参数研究

李晓丽¹ 李先志²

(1. 国网成都供电公司, 四川 成都 610021; 2. 西南电力设计院, 四川 成都 610021)

摘要: 导线选型及分裂方式的确定是发展 ±1 100 kV 特高压直流输电工程的关键技术之一, 对线路的可靠运行、环境保护和控制工程投资至关重要。采用国际公认的、经过实际工程验证且广泛使用的计算分析方法, 研究了 ±1 100 kV 直流输电线路的结构参数(导线分裂数、子导线截面、导线分裂间距、极导线对地高度和极导线间距)对合成电场、可听噪声和无线电干扰场强的影响; 对不同的导线方案进行了经济性比较。根据电磁环境预测分析及经济比较结果, 确定了 ±1 100 kV 直流输电线路的导线结构。

关键词: ±1 100 kV 特高压直流; 电磁环境; 导线选型

Abstract: Determination of conductor type selection and bundle structure is one of the key technologies for developing ±1 100 kV UHVDC transmission line projects, which is of vital importance to the reliable operation of transmission lines, the environmental protection and the control of project investment. Employing the internationally recognized, practically verified and widely used calculation and analysis methods, the influence of the structure parameters of ±1 100 kV UHVDC transmission lines, such as splitting number, sectional area of sub-conductors, splitting-wire spacing, conductor elevation to the ground and pole conductor distance, on total electric fields, audible noise and radio interference field intensity is studied. The economic comparison is carried out with regard to different conductor schemes. Finally, the conductor structure of ±1 100 kV UHVDC transmission lines is determined on the basis of electromagnetic environment forecast analysis and economic comparison results.

Key words: ±1 100 kV UHVDC; electromagnetic environment; conductor type selection

中图分类号: TM751 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)02-0006-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.02.002

随着中国经济持续发展, 电力需求逐年增长, 经济发达地区的电力缺口不断扩大, 加之中国资源地域分布的特殊性, 煤炭、水能等电力一次资源主要集中在经济欠发达地区, 而发达地区的资源则较为匮乏, 因此采用特高压直流线路进行长距离输电是解决电力供应问题的重要举措。根据电网发展规划, 结合新疆地区煤电资源丰富的特点, 拟建设一回疆电外送 ±1 100 kV 特高压直流线路工程, 输电容量约 10 000 MW, 单极电流约 4.5 kA。该项目目前正在进行前期论证工作。

导线选择是特高压直流输电工程的关键技术之一, 对线路可靠运行、环境保护和控制工程投资至关重要。而 ±1 100 kV 特高压线路在工程实践中属新的电压等级, 目前尚无标准、规范、设计运行经验可供参考。但根据现有 ±800 kV 输电线路研究结论^[1-2], 并进行合理类推发现, 决定 ±1 100 kV 特高压

线路导线选择的因素是电磁环境要求。因此, 下面将主要从电磁环境要求出发, 对采用不同结构导线时的电场、离子流密度、可听噪声和无线电干扰进行分析, 并结合年费用计算等经济性比较。提出 ±1 100 kV 直流输电线路导线分裂数和子导线截面选择建议。

1 电磁环境限值

±1 100 kV 特高压线路的电磁环境要求尚无规程规范可以执行, 本工程仍参照《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(报批稿)规定, 电磁环境主要控制指标为^[3]: ①一般非居民区线路下方最大地面合成场强的控制指标为 30 kV/m; 邻近民房的最大合成场强的控制指标为 25 kV/m。②线路下方离子流密度的控制指标为一般地区: 100 nA/m²; 居民区: 80 nA/m²。③直流磁场的控制指标为 10 mT。

表1 导线型号及特性一览表

序号	导线型号	铝、钢股数	总截面 /mm ²	直径 /mm	铝/钢 截面比	线重 /((kg·m ⁻¹))	电阻(20℃) /((Ω·km ⁻¹))
1	JL/G1A-1 120/90	84×4.12/19×2.47	1 211.20	45.30	12.3	3.812	0.025 8
2	JL/G3A-1 000/45	72×4.21/7×2.80	1 043.20	42.10	23.1	3.100	0.028 9
3	JL/G2A-900/75	84×3.69/7×3.69	975.00	40.60	12.0	3.074	0.032 2
4	JL/G1A-800/55	45×4.80/7×3.20	870.60	38.40	14.5	2.690	0.035 5
5	JL/G2A-720/50	45×4.53/7×3.02	775.41	36.20	14.5	2.398	0.039 8
6	JL/G1A-630/45	45×4.22/7×2.81	674.00	33.80	14.5	2.079	0.045 9

表2 导线分裂数组合一览表

分裂数	导线型号			
8分裂	8×JL/G1A-800/55	8×JL/G2A-900/75	8×JL/G3A-1000/45	8×JL/G1A-1120/90
9分裂	9×JL/G1A-630/45	9×JL/G2A-720/50	9×JL/G1A-800/55	9×JL/G2A-900/75
10分裂	10×JL/G1A-630/45	10×JL/G2A-720/50		

④无线电干扰的控制指标:海拔1 000 m及以下地区,距直流架空输电线路正极性导线对地投影外20 m处,80%时间,80%置信度,0.5 MHz频率的无线电干扰不超过58 dB(μV/m)。⑤电晕可听噪声的控制指标:海拔1 000 m及以下地区,距直流架空输电线路正极性导线对地投影外20 m处,由电晕产生的可听噪声(L50)不超过45 dB(A);海拔高度大于1 000 m且线路经过人烟稀少地区时,控制在50 dB(A)以下。

其中直流线路的磁场与地磁相当,远小于国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)建议的公众暴露限值^[4,5];地面离子流密度计算值也远小于限值。在导线选型时,磁场和离子流密度两个指标不会起制约作用。

2 导线及分裂方式的初选

2.1 总截面的选取

特高压直流线路所采用的导线,一般应符合有效的国家电线产品技术标准。需要采用非标准产品或国外产品时,应符合国际或生产国相同产品的技术标准。根据现行导线标准《圆线同心绞架空导线》^[6],基于以上要求和系统确定的总截面等条件,按照中国现有导线生产的情况,选择以下钢芯铝绞线导线进行比较,其特性如表1,各导线的分裂数组合列入表2。

2.2 分裂间距

导线分裂间距S的选取与子导线直径d有关,

并需考虑分裂导线的次档距振荡和电气两个方面的特性。然而两者要求却是矛盾的,防止次档距振荡要求分裂间距尽量大($S/d > 13.80 \sim 18.0$),而电气方面,对本项目而言则要求分裂间距尽量小,以降低表面场强进而降低电磁环境参数值(如图1)。

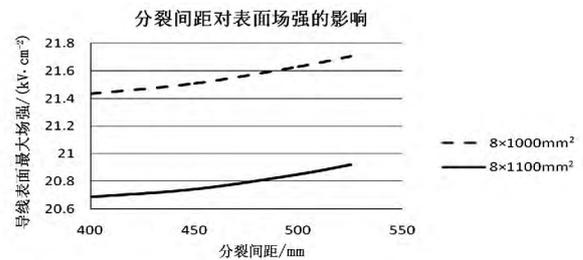


图1 分裂间距与导线表面场强的关系

由于±1 100 kV直流线路电磁环境影响较大,分裂间距选取时应更多考虑电气因素而取较小的值,次档距振荡则通过合理安装阻尼间隔棒来解决。从运行经验来看,中国皖电东送、锡盟—南京等1 000 kV交流特高压线路选择的分裂间距为400 mm(8×630 mm²导线),但由于本工程参选导线截面更大,大截面导线时分裂间距应适当增加。对大截面导线来说,宁东—山东±660 kV输电线路分裂间距为450 mm(4×1 000 mm²导线)。基于以上考虑,本工程导线分裂间距按表3选取。

3 电磁环境计算

在本节的各种计算中,导线采用双极水平排列,绝缘子串为V串布置,为深入研究不同导线方案对技术经济的影响,挂线尺寸在合理范围内选取多种

数值参与计算,极间距取24、26、28 m,一般地区最小对地高度按25、27、29 m(计算地面合成场强用),对应导线平均高取30、32、34 m(计算可听噪声和无线电干扰)。

表3 导线分裂间距及S/d值一览表

分裂根数	分裂间距/mm	分裂导线圆直径/mm	S/d
8	450(其余)	1 175.9	10.11~11.72
	500(1120/90导线)	1 307.2	11.04
9	450(900/75导线)	1 315.7	11.08
	400(其余)	1 169.5	10.42~11.83
10	400	1 294.4	11.05~11.83

3.1 地面合成场强计算

地面合成场强关系到线路附近居民的人身安全问题。美国 Dalles 试验中心曾经做过相关人体试验,试验表明,人在22 kV/m(±400 kV)电场下,头皮有轻微刺痛感觉;在27 kV/m(±500 kV)电场下,头发有刺激感,耳朵和毛发有轻微感觉;人体在32 kV/m(±600 kV)电场下,头皮有强烈的刺痛感觉。因此,将合成场强和离子流密度限定在一定的范围内对环保具有重要的意义。

最小对地距离分别取25、27、29 m,极间距取24、26、28 m,计算各种导线的地面合成场强Es的计算结果见表4。

由表4可知,参选导线在海拔为0晴天条件下,合成场强小于30 kV/m,满足限值要求。尽管海拔

高度对合成场强、离子流密度的影响较大,但根据研究,合成电场强度随海拔高度每升高1 000 m最大增加约4~5 kV/m,因此参选导线的合成场强,在海拔1 000 m也基本控制在30 kV/m。海拔1 000 m时,合成场强可能超过30 kV/m限值的,主要存在于表4中25 kV/m以上的导线方案,由于这些导线方案的导线表面场强也比较大,在满足可听噪声限值方面也可能存在困难。

3.2 无线电干扰和可听噪声

3.2.1 无线电干扰计算方法

《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(报批稿)推荐的无线电干扰场强的计算方法是国际无线电干扰特别委员会 CISPR 的公式,试验结果表明,CISPR 计算方法具有较高的准确度,采用 CISPR 公式进行无线电干扰场强的预估计算。

$$RI = 38 + 1.6(g_{\max} - 24) + 46\log r + 5\log n + 33\log \frac{20}{D} \quad (1)$$

式中 RI 为输电线路的无线电干扰水平值,dB; g_{\max} 为导线表面最大电位梯度,kV/cm; r 为子导线的半径,cm; D 为距正极性导线的距离(适应小于100 m),m; n 为分裂导线根数。

式(1)适用于0~500 m海拔,其后海拔每升高300 m,无线电干扰增加1 dB。式(1)计算值为好天气50%概率无线电干扰电平,换算至无线电干扰双80%值还应增加3 dB。

3.2.2 可听噪声计算方法

表4 地面合成场强计算结果(海拔0晴天)

最小对地高/m	H=25			H=27			H=29			
	极间距/m	24	26	28	24	26	28	24	26	28
8×JL/G1A-800/55		26.7	26.7	26.6	23.8	23.8	23.7	21.4	21.3	21.3
8×JL/G2A-900/75		24.9	24.8	24.7	22.2	22.0	21.9	19.9	19.7	19.6
8×JL/G3A-1000/45		23.7	23.5	23.3	21.1	20.9	20.6	18.8	18.7	18.5
8×JL/G1A-1120/90		21.5	21.2	20.9	19.0	18.7	18.3	16.9	16.6	16.3
9×JL/G2A-900/75		21.7	21.4	21.0	19.2	18.8	18.5	17.0	16.7	16.4
9×JL/G1A-800/55		23.2	23.0	22.8	20.6	20.4	20.1	18.4	18.2	18.0
9×JL/G2A-720/50		25.2	25.1	25.0	22.5	22.3	22.1	20.1	20.0	19.9
9×JL/G1A-630/45		27.3	27.3	27.3	24.4	24.4	24.3	21.9	21.9	21.9
10×JL/G1A-630/45		25.1	25.0	24.8	22.3	22.1	21.9	20.0	19.8	19.6
10×JL/G2A-720/50		22.6	22.3	22.0	20.0	19.7	19.4	17.8	17.5	17.2

表 5 海拔 1 000 m 时不同导线的可听噪声预估值 /dB(A)

线均高/m	Hav = 30			Hav = 32			Hav = 34			
	极间距/m	24	26	28	24	26	28	24	26	28
8 × JL/G1A - 800/55		46.77	46.1	45.51	46.46	45.78	45.18	46.16	45.48	<u>44.87</u>
8 × JL/G2A - 900/75		46.12	45.46	<u>44.86</u>	45.81	45.13	<u>44.53</u>	45.51	<u>44.83</u>	<u>44.22</u>
8 × JL/G3A - 1000/45		45.89	45.04	<u>44.45</u>	45.39	<u>44.71</u>	<u>44.11</u>	45.10	<u>44.42</u>	<u>43.80</u>
8 × JL/G1A - 1120/90		<u>44.90</u>	<u>44.23</u>	<u>43.64</u>	<u>44.59</u>	<u>43.91</u>	<u>43.30</u>	<u>44.29</u>	<u>43.6</u>	<u>42.99</u>
9 × JL/G2A - 900/75		<u>44.52</u>	<u>43.83</u>	<u>43.22</u>	<u>44.20</u>	<u>43.50</u>	<u>42.88</u>	<u>43.90</u>	<u>43.20</u>	<u>42.56</u>
9 × JL/G1A - 800/55		<u>44.99</u>	<u>44.32</u>	<u>43.72</u>	<u>44.67</u>	<u>43.99</u>	<u>43.39</u>	<u>44.38</u>	<u>43.69</u>	<u>43.08</u>
9 × JL/G2A - 720/50		45.75	45.08	<u>44.49</u>	45.43	<u>44.76</u>	<u>44.15</u>	45.14	<u>44.45</u>	<u>43.84</u>
9 × JL/G1A - 630/45		46.45	45.79	45.19	46.14	45.46	<u>44.86</u>	45.85	45.16	<u>44.55</u>
10 × JL/G1A - 630/45		<u>44.97</u>	<u>44.29</u>	<u>43.68</u>	<u>44.66</u>	<u>43.96</u>	<u>43.34</u>	<u>44.36</u>	<u>43.65</u>	<u>43.02</u>
10 × JL/G2A - 720/50		<u>44.27</u>	<u>43.58</u>	<u>42.97</u>	<u>43.95</u>	<u>43.25</u>	<u>42.63</u>	<u>43.66</u>	<u>42.95</u>	<u>42.32</u>

注: 表中的数值为距正极导线对地投影外 20 m 处的值, 下划线加黑表示海拔修正后满足要求的值。

关于导线电晕引起的可听噪声的计算方法, 国际上有许多研究机构进行过深入的研究, 提出了各自的预测公式, 但由于各自的实验环境和条件不同, 其预测公式的计算结果也存在差异。《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(报批稿) 推荐采用 BPA 及 EPRI 的两种计算公式, 这里采用 EPRI 计算公式。

$$P_{dB} = 56.9 + 124 \log \frac{E}{25} + 25 \log \frac{d}{4.45} + 18 \log \frac{n}{2} - 10 \log R_p - 0.02 R_p + K_n \quad (2)$$

式中 P_{dB} 为输电线路的可听噪声, dB(A); E 为导线表面最大场强, kV/cm; n 为次导线分裂根数; R_p 为距正极性导线的距离, m; $n \geq 3$ 时 $K_n = 0$ 。

对于高海拔修正, 按照采用中国电力科学研究院的最新研究结论推荐的 0~4 300 m 按 0~5 dB 线性修正方法进行高海拔修正所得计算值作为判据。

3.2.3 计算及比较

按照上述计算方法, 各种导线的可听噪声 (AN) 及无线电干扰值 (RI) 计算结果列入表 5、表 6。

表 5、表 6 中的计算结果表明, 所有参选方案的无线电干扰均小于 58 dB(μV/m), 而可听噪声值是否满足 45 dB(A) 的要求, 则随导线和布置尺寸的不同存在显著差异。故决定导线型式的因素是可听噪声。

各种导线方案的可听噪声值随极间距和线高不同而变化, 且极间距的影响比线高的影响更大。10 × 630 和 10 × 720 在表中所有排列尺寸下均满足可听噪声限值要求, 而 8 × JL/G1A - 800/55 与 9 × JL/G1A - 630/45 两方案在满足可听噪声要求下, 极间距达 28m, 对地均高达 34m, 明显不经济, 因此, 这两种导线方案首先被淘汰。在其余导线方案中, 按最经济原则, 选取满足可听噪声条件下极间距和线高

最小的布置尺寸(列入表 6), 再进行年费用比较。

表 6 按最经济原则确定的导线型式及其布置尺寸

序号	导线型号	导线高/m		极间距/m
		最小对地高	对地平均高	
1	8 × JL/G1A - 1120/90	27	32	24
2	8 × JL/G3A - 1000/45	27	32	26
3	8 × JL/G2A - 900/75	25	30	28
4	9 × JL/G2A - 900/75	25	30	24
5	9 × JL/G1A - 800/55	27	32	24
6	9 × JL/G2A - 720/50	27	32	26
7	10 × JL/G2A - 720/50	25	30	24
8	10 × JL/G1A - 630/45	27	32	24

4 年费用比较

表 6 中的导线均满足电气特性要求, 要确定最优的导线方案只能再通过经济性进行比较。年费用法为财务评价方法之一, 能反映工程投资的合理性、经济性。年费用比较法是将参加比较的诸多方案在计算期内的全部支出费用折算成等额年费用比较, 年费用低的方案在经济上最优。年费用包含初投资年费用、年运行维护费用、电能损耗费用及资金的时间价值(即利息)。年费用计算中难点在于估计各种导线方案对应的本体投资。这里充分考虑了各种导线对铁塔的外负荷, 以及表 6 中不同导线对应的极间距和塔高的不同对造价的影响, 以便更为准确地估计不同导线方案的本体投资。以 10 mm 冰区典型线段为例, 各导线方案的年费用比较如图 2、图 3。

年损耗在 3 500 h, 年费用较低的导线方案是 8 × JL/G3A - 1000/45、9 × JL/G1A - 800/55、9 × (下转第 50 页)

负荷率将降低 ρ 值略有下降趋势。其中 2020 年 ρ 值约 0.8 左右 2030 年 ρ 值约 0.79 左右。

参考文献

[1] 国家发展改革委经济运行调节局,等. 负荷特性及优化[M]. 北京:中国电力出版社 2013.

[2] 赵希正,等. 中国电力负荷特性分析与预测[M]. 北京:中国电力出版社 2002.

[3] 《中国电力年鉴》编辑委员会编. 中国电力年鉴[M]. 北京:中国电力出版社 2000-2013.

[4] 国家统计局编. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社 2013.

[5] H. 钱纳里(H. Chenery) 等著 吴奇 等译. 工业化和经济增长的比较研究[M]. 上海:上海人民出版社 1995.

[6] 陈佳贵,等. 中国工业化进程报告[M]. 北京:社会科学文献出版社 2007.

[7] 郭克落. 中国工业化的进程、问题与出路[J]. 中国社会科学,2000(3):60-71.

[8] 重庆市人民政府. 2013年政府工作报告[R].

[9] 国家统计局. 国家统计局数据库[DB/OL]. 北京, 2014. [2014-06-10]. <http://data.stats.gov.cn/>

[10] World Bank. The world bank statistics database [DB/OL], 2013 [2014-06-15]. <http://data.worldbank.org/cn/>

[11] 战略和综合研究所. 我国中长期电力需求发展趋势研究[R]. 北京:国家电力规划研究中心 2012.

[12] 国务院. 国务院关于印发节能减排“十二五”规划的通知[R]. 国发(2012)40号. 2012.

[13] 吴敬儒,等. 中国电力工业 2010-2050 年低碳发展战略研究[M]. 北京:水利水电出版社 2012.

[14] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究[R].

[15] 胡兆光. GDP 能耗与电耗的关系[J]. 中国能源, 2006 28(7):11-15.

[16] 重庆市人民政府. 关于印发重庆市“十二五”节能减排工作方案的通知[R]. 渝府发(2011)109号 2011.

[17] 秦浩庭、肖汉、郑荡,等. 重庆电力负荷需求及特性预测[R]. 成都 西南电力设计院系统规划中心 2014.

[18] 重庆市委、市政府. 关于科学划分功能区域、加快建设五大功能区的意见[R]. 渝委发(2013)14号 2013.

作者简介:

秦浩庭(1981) 工程师 研究方向为电力系统规划。

(收稿日期:2014-11-28)

(上接第9页)

JL/G2A-720/50 导线等方案 最高的是 8×JL/G1A-1120/90 9×JL/G2A-900/75 导线。年损耗在 4 500 h, 年费用最低的导线方案是 8×JL/G3A-1000/45 最高的是 9×JL/G2A-900/75 和 10×JL/G1A-630/45 导线。总体来看 年费用最低的是 8×JL/G3A-1000/45。

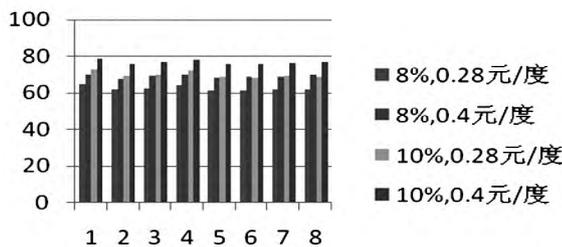


图2 导线年费用比较图(3 500 h)

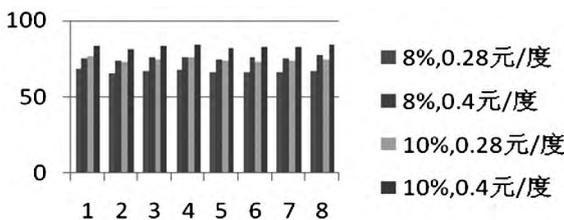


图3 导线年费用比较图(4 500 h)

5 结 论

±1 100 kV 特高压直流线路导线选择的主要控制因素是可听噪声 按海拔 1 000 m 时 45 dB(A) 限

值控制,有 6 种导线型式可供选择。最终结合经济性比较,建议选择 8×JL/G3A-1000/45 导线方式,分裂间距 450 mm。

参考文献

[1] 张文亮,陆家榆,鞠勇,等. ±800 kV 直流输电线路的导线选型研究. 中国电机工程学报[J]. 2007 27(27):1-6.

[2] 梁明,王永刚,周刚. ±800 kV 输电线路按电晕条件的导线选择. 高电压技术[J]. 2008,34(9):1875-1879.

[3] 中华人民共和国国家标准. ±800 kV 直流架空输电线路设计规范(报批稿) [S].

[4] 陆家榆,鞠勇. ±800 kV 直流输电线路电磁环境限值研究[J]. 中国电力 2006 39(10):37-42.

[5] 中华人民共和国国家电网公司企业标准. Q/GDW 145-2006, ±800 kV 直流架空输电线路电磁环境控制值 [S].

[6] GB/T 1179-2008 圆线同心绞架空导线 [S].

作者简介:

李晓丽(1983) 硕士,工程师,主要从事电力系统过电压与接地研究;

李先志(1982) 硕士,工程师,主要从事送变电线路设计与研究。

(收稿日期:2014-10-27)