

高海拔交流特高压线路基于电晕条件下的导线选型研究

梁明 朱长青 谢静 戴严航

(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)

摘要: 导线选型研究是特高压交流输电工程的关键技术之一。尤其在海拔地区,由于空气相对密度大大降低,导线选型研究对线路的可靠运行、环境保护和控制工程投资至关重要。根据1 000 kV特高压交流输电线路电磁环境的限值,采用经过实际工程验证且广泛使用的计算分析方法,研究了1 000 kV特高压交流输电线路采用多种分裂组合导线时其电场强度比值、可听噪声的海拔限值,同时结合导线年费用计算推荐相应海拔区段内的导线选型。经研究,在海拔1 500~2 000 m时,推荐采用8×JL/G2A-720/50导线;在海拔2 000~3 000 m时,推荐采用10×JL/G1A-630/45导线。

关键词: 特高压; 高海拔; 电晕条件; 导线选型

Abstract: The research of conductor selection is one of the key technologies in UHV AC transmission project. Especially in high altitude area, because the relative density of air is greatly reduced, the research of conductor selection is vital to the reliable operation of transmission line, the environmental protection and project investment. According to the limit value of electromagnetic environment in 1 000 kV UHV AC transmission line, the altitude limit of the electric field intensity ratio and audible noise is studied when multiple split composite conductors are applied to 1 000 kV UHV AC transmission line. At the same time, combined with the annual cost of conductors, the conductor selection related to the corresponding elevation is recommended. After the research, at the altitude of 1 500~2 000 m, it is recommended to use 8×JL/G2A-720/50 conductor, and at the altitude of 2 000~3 000 m, it is recommended to use 10×JL/G1A-630/45 conductor.

Key words: ultra-high voltage; high altitude; corona performance; conductor selection

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)05-0039-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.05.010

0 引言

特高压输电线路工程中导线的选择对整个工程的造价影响极大,直接关系到整个线路工程的建设费用以及建成后的运行可靠性和运行成本。目前已建和在建的1 000 kV交流特高压输电线路均在海拔2 000 m以下,研究表明,随着海拔的增加,电晕产生的可听噪声和电晕损失已成为1 000 kV交流特高压输电线路选择导线截面的控制因素。

随着特高压电网向西部的延伸,交流特高压线路将不可避免地通过2 000 m以上高海拔地区,而高海拔地区导线电晕更加严重,电磁环境恶化,导线选型困难,需要开展高海拔1 000 kV特高压输电线路导线选型研究,提出满足电晕校核条件、电磁环境指标要求同时经济性较优的导线型式。

下面从电磁环境限值出发,对高海拔地区采用不同结构导线时的电场强度、可听噪声、无线电干扰及电阻、电晕损耗进行分析,并结合年费用计算进行经济性比较,提出了高海拔1 000 kV交流特高压输电线路导线截面积及分裂方式。探讨出的计算方法和计算结论可为特高压交流输电线路高海拔导线选型设计提供参考。

1 导线及分裂方式的初选

1.1 总截面的选取

特高压交流线路所采用的导线,应符合有效的产品技术标准。这里根据现行导线标准《圆线同心绞架空导线》^[1]按照现有导线生产的情况,选择表1所示钢芯铝绞线导线进行比较,各导线分裂数组合见表2。

表1 导线参数

导线型号	铝、钢股数	截面/mm ²	直径/mm	线重/(kg·m ⁻¹)	电阻/(Ω·km ⁻¹)
JL/G1A-1000/85	84×3.89/19×2.34	1 080.00	42.79	3.411 0	0.028 76
JL/G1A-900/75	84×3.69/7×3.69	975.00	40.60	3.074 2	0.032 20
JL/G1A-800/55	45×4.80/7×3.20	870.60	38.40	2.687 5	0.035 80
JL/G2A-720/50	45×4.53/7×3.02	775.41	36.23	2.397 7	0.039 84
JL/G1A-630/45	45×4.22/7×2.81	674.00	33.60	2.079 2	0.045 90
JL/G1A-500/45	48×3.60/7×2.80	531.68	30.00	1.685 5	0.059 10

表2 导线分裂数组合

分裂数	匹配导线型号				
6分裂	JL/G1A-900/75	JL/G1A-1000/85	/	/	/
8分裂	JL/G1A-500/45	JL/G1A-630/45	JL/G2A-720/50	JL/G1A-800/55	JL/G2A-900/75
10分裂	JL/G1A-500/45	1JL/G1A-630/45	/	/	/

表3 导线分裂间距及S/d值

分裂根数	分裂间距/mm	分裂导线圆直径/mm	S/d
6	450(900/75导线)	900.00	11.08
	500(1 000/80导线)	1 000.00	11.68
8	450	1 175.91	11.08~15.00
10	450	1 456.23	13.39~15.00

1.2 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特性两个方面。各分裂导线组合分裂间距设置见表3。

2 电磁环境计算

目前,主要的1 000 kV特高压交流输电线路导线均采用水平排列,绝缘子串为IVI串布置,单回路铁塔布置如图1所示。

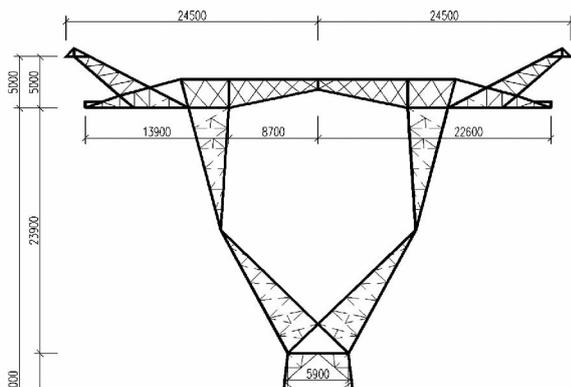


图1 1 000 kV单回路IVI塔头布置图

2.1 工作场强与临界场强的比值(E_m/E_0)

根据GB 50665-2011《1 000 kV架空输电线路设计规范》规定,并结合国标中建议导线表面电场强度(E_m)不宜大于全面电晕电场强度(E_0)的80%~85%的要求。

中国特高压交流线路采用的计算公式^[4]为

$$E_{m0} = 30.3m\delta^{2/3}(1 + 0.3/\sqrt{r_0}) \quad (1)$$

式中: E_{m0} 为临界电场强度; m 为导线表面系数,对绞线一般可取0.82; δ 为相对空气密度; r_0 为导线半径, μm 。

导线表面最大工作场强 E_m 取决于最高运行电压、子导线直径、相导线分裂形式及相间距离等,目前常用的方法为逐次镜像法^[4]。

由上述计算方法分析,对于不同的导线组合方案,在不同海拔高度下,各导线的 E_m/E_0 值均不同,为满足 E_m/E_0 值在80%~85%范围内的限值,各导线组合方案均存在不同的适用海拔范围。

在满足工作场强与临界场强的比值($E_m/E_0 = 0.85$)时,各导线组合方案适用海拔如图2所示。

根据图2可看出,6分裂900 mm²导线和8分裂500 mm²导线均不能满足海拔3 000 m时(E_m/E_0)的限值要求。

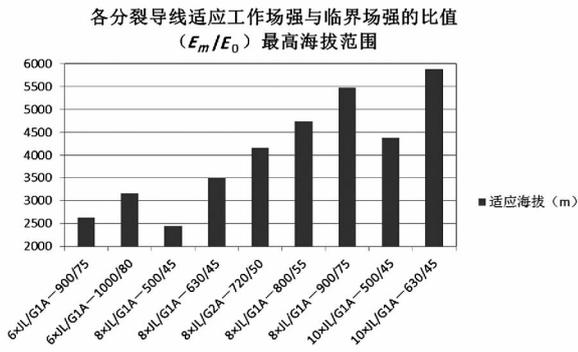


图2 各分裂导线组合适应工作场强与临界场强比值海拔范围图 (m = 0.85)

2.2 无线电干扰和可听噪声

2.2.1 无线电干扰计算方法

无线电干扰计算采用 GB 15707-95《高压交流架空送电线路无线电干扰限值》建议的公式。

$$N_D = 3.5E + 12r - 30 + 33 \lg \frac{20}{D} \quad (2)$$

式中: N_D 为距离线路边线 D 处 ($D < 100$ m) 0.5 MHz 的 RI 电平, dB; E 为线路边导线表面最大电场强度有效值, kV/m; r 为单根导线半径, cm; D 为被干扰点到边导线的距离, m。

80% 时间及 80% 置信度的无线电干扰场强 $E_{80\%}$ 、80% 由 $E_{50\%}$ 、50% 值的基础上增加 6 ~ 12 dB ($\mu V/m$) 得到, 这里取值为增加 8 dB ($\mu V/m$) [4]。

需要说明的是, 近年来, 中、短波频段的无线电广播收听已不再成为公众获取信息的主要渠道, 输电线路无线电干扰指标的好坏也基本不影响公众的生活质量。在多年的环境监测过程中已发现, 即使偶尔出现线路附近无线电干扰超过限值的情况, 也没有对百姓的无线电广播收听造成实际影响。目前, 在输变电工程的环境影响评价中已不再纳入无线电干扰因子。

2.2.2 可听噪声计算方法

这里采用 BPA 计算公式来进行本工程的可听噪声预测 [3]。

$$SLA = 10 \times \lg \sum_{i=1}^Z \lg^{-1} \left(\frac{PWL(i) - 11.4 \times \lg(R_i) - 5.8}{10} \right) \quad (3)$$

式中: SLA 为 A 计权声级; $PWL(i)$ 为 i 相导线的声功率级; R_i 为测点至被测 i 相导线的距离, m; Z 为相数。

式 (3) 的 PWL 按式 (4) 计算:

$$PWL = -164.4 + 120 \times \lg E + 55 \times \lg d_{eq} \quad (4)$$

式中: E 为导线的表面梯度, kV/cm; d_{eq} 为等效直径, 按式 (5) 计算:

$$d_{eq} = 0.58 \times n^{0.48} \times d \quad (n > 4) \quad (5)$$

式中: n 为分裂根数; d 为次导线直径, mm。

2010 年国家电网公司开展了“特高压输电线路设计深化研究”课题研究, 根据中国特高压交流试验示范工程和特高压交流试验基地试验线段的可听噪声实测结果与理论计算结果比较, 按现行的 BPA 公式得到的特高压交流线路可听噪声计算值较实测值偏大约 2 dB(A), 因此可对现有的可听噪声计算方法在原公式计算结果基础上减去 2 dB(A) 进行修正。

中国已针对不同海拔高度 (海拔高度 400 ~ 3 330 m) 的 330 kV、750 kV 线路做了大量的测试工作, 并提出了适用于工程上的可听噪声海拔修正量, 即海拔以 1 000 m 为基准, 海拔每增加 1 000 m 线路可听噪声增加约 1.5 ~ 2.0 dB。由于目前特高压输电线路尚未开展相关海拔修正测试工作, 这里根据 750 kV 线路测试结论进行递推, 建议 1 000 kV 输电线路的可听噪声海拔修正量为: 海拔每增加 1 000 m 线路可听噪声增加值暂取 2.2 dB(A)。

2.2.3 计算结果比较

按 GB 50665-2011《1 000 kV 架空输电线路设计规范》的要求: 湿导线可听噪声不大于 55 dB(A) (海拔 500 m 推算) [2] 限值; 无线电干扰测量值不大于 58 dB ($\mu V/m$) (海拔 500 m 推算) 限值。

按上述规范的要求, 各分裂导线方案按不同海拔修正值进行计算, 所得结果如图 3 所示。

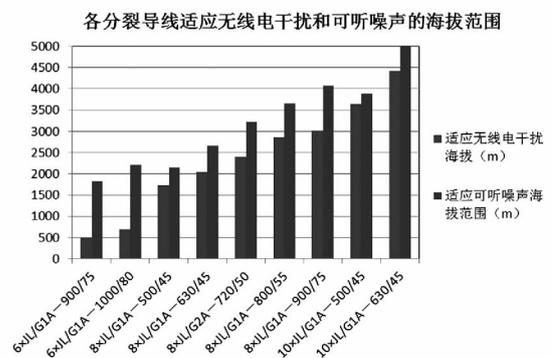


图3 各分裂导线适应无线电干扰和可听噪声海拔范围

由图 3 可以看出 8 分裂 900 mm² 导线及 10 分裂 500 mm² 和 630 mm² 导线均满足海拔 3 000 m 的无线电干扰以及可听噪声要求值, 而 6 分裂导线受无线电干扰限制, 不适用于高海拔地区。

2.3 电能损耗

2.3.1 电阻电能损耗

电阻损耗是输电线路运行期间所导致的发热损耗,通常与输送功率、最大负荷损失小时数等相关。其计算公式为:

$$Q = (P/U \times \varphi)^2 \times R \times t \quad (6)$$

式中: Q 为电阻损耗; P 为输送功率; U 为额定电压; φ 为功率因数; R 为交流电阻; t 为最大负荷损失小时数。

各分裂导线组合输送功率为 5 000 MW,按照最大负荷损失 3 000 h、4 000 h、5 000 h 进行电阻损耗计算,结果见图 4。

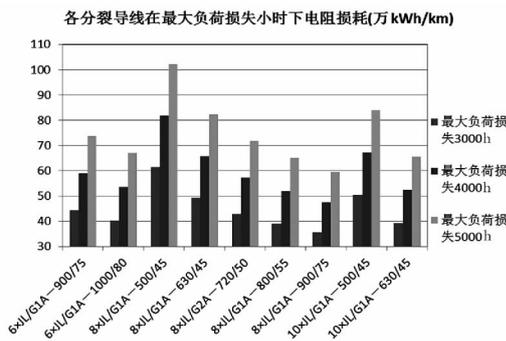


图4 各分裂导线电阻损耗对应图

2.3.2 电晕损耗计算

当输电线路导线周围电场强度超过空气击穿强度时,邻近导线附近的空气产生电离形成电晕放电,将电能转化为热、光、可听噪声和无线电干扰等形式释放,这种能量损失就是电晕损失。

在确定高海拔特高压线路导线选型及分裂方式时,不仅要考虑导线的电阻损耗,还应考虑不同导线结构下的电晕损失。在高海拔地区,电晕造成的电能损失占总电能损失比例较高,已成为决定导线经济性优劣的控制因素。

年平均电晕功率损失为导线在各种天气条件下(好天、雪天、雨天、雾淞天)产生的电晕功率损失的总和,参考有关工程典型气候情况^[3],这里 1 000 kV 交流输电线路电晕损失计算采用气候情况见表 4。

由于电晕损失计算需依据 (E_m/E_0) 值^[4] 查询计算曲线取得,但目前尚无特高压交流线路电晕损失的计算曲线,故这里采用《电力工程高压送电线路设计手册》(第二版)中年平均电晕损失计算曲线^[4] 进行估算,见表 5。

由表 5 可看出:

1) 随着导线分裂数的减少,电晕损耗随之增大,在总铝截面积大致相当的情况下,6 分裂导线电晕损耗约为 8 分裂导线电晕损耗的 1.8 ~ 2.7 倍。8 分裂导线电晕损耗约为 10 分裂导线电晕损耗的 1.25 ~ 1.8 倍。

2) 海拔每增加 1 000 m,电晕损失增加 2 ~ 5 倍。

同时根据计算曲线^[4],针对好天气、雪天、雨天情况下,导线的 (E_m/E_0) 值在 0.9、0.7、0.6 时,对应的电晕损失值出现突变,但该曲线对于所研究的特高压高海拔条件下的适应性需验证。另外,针对 1 000 kV 的电晕损失计算目前尚无成熟的计算经

表 4 电晕损失计算天气数

天气条件	好天气	雪天	雨天	雾淞天
小时数/h	7 372	182	1 042	164

表 5 各分裂导线组合计算电晕损耗

导线型号	分裂数	电晕损耗/(kW·km ⁻¹)			
		1 000 m	2 000 m	3 000 m	4 000 m
JL/G1A-900/75	6	106.9	262.7	1 202.9	2 727.60
JL/G1A-1000/80	6	83.4	188.7	852.8	2 318.66
JL/G1A-500/45	8	105.7	283.5	1311.1	2 722.93
JL/G1A-630/45	8	68.7	149.5	602.2	1 822.55
JL/G2A-720/50	8	56.0	114.8	376.9	1 279.12
JL/G1A-800/55	8	46.8	92.5	255.6	860.50
JL/G1A-900/75	8	40.1	77.8	187.9	587.70
JL/G1A-500/45	10	54.3	108.9	339.0	1 152.25
JL/G1A-630/45	10	37.2	71.2	165.9	481.80

验 因此特高压电晕损失计算曲线尚需进一步进行
研究、验证。

3 年费用比较

年费用法为财务评价方法之一,能反映工程投
资的合理性和经济性。

年费用最小法计算为^[4]:

$$F_N = Z \left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + u \quad (6)$$

式中: F_N 为年费用(平均分布在 n 年内); u 为折算
年运行费用; r_0 为电力工程投资的回收率,按 8%、
10% 计; n 为经济使用年数,这里取值为 30 年; Z 为
折算到第 m 年的总投资,按式(7)进行计算。

$$Z = \sum_{t=1}^m Z_t (1+r_0)^{m+1-t} \quad (7)$$

式中: m 为施工年数,参考工程建设周期,这里取为
2 年; t 为从开工这一年起起到计算年的年数,参考工
程建设周期,取值为 1 年。

在高海拔输电线路电能损耗计算中包含电阻损
耗与电晕损耗两部分,在相同的输送功率下电阻损
耗仅与导线材料、运行时间相关,相同运行条件下,
各导线方案电阻损耗为固定值。而如前面所述,电
晕损耗则与输电线路所处位置的天气、海拔、运行
时间等相关,在全年相同的天气条件和运行时间下,
各导线方案电晕损耗随海拔高度增加而增大。这里
年最小费用比较法中同时考虑了输电线路电阻损耗
与电晕损耗所造成的费用变化情况。

为了进一步分析各种导线的经济性,采用最
小年费用法对所选 9 种导线组合方案在海拔 1 000
~ 3 000 m 时不同年损耗小时下的年费用进行了计
算比较,如图 5 至图 10 所示。

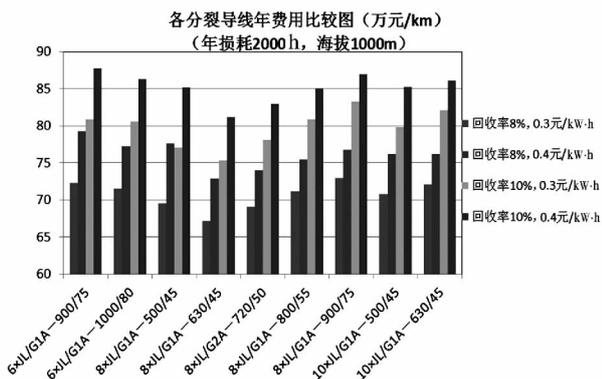


图5 年损耗 2 000 h,海拔 1 000 m 年费用比较

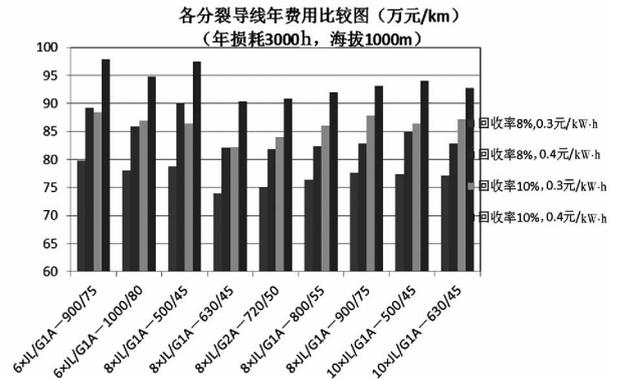


图6 年损耗 3 000 h,海拔 1 000 m 年费用比较

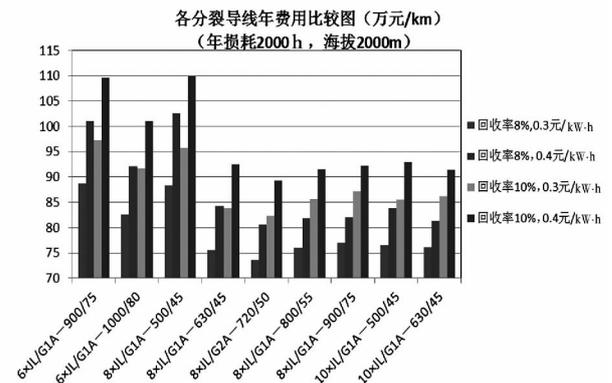


图7 年损耗 2 000 h,海拔 2 000 m 年费用比较

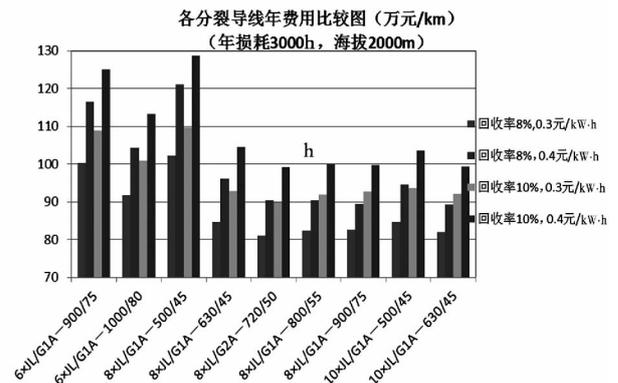


图8 年损耗 3 000 h,海拔 2 000 m 年费用比较

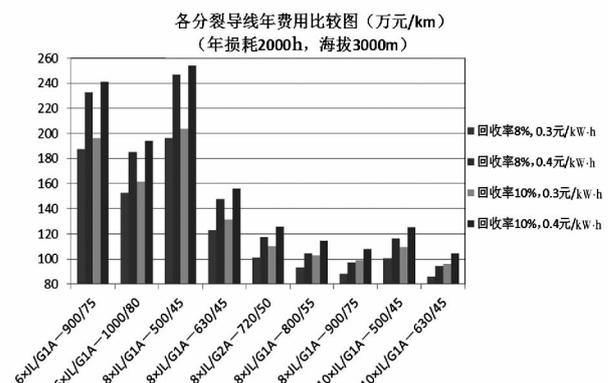


图9 年损耗 2 000 h,海拔 3 000 m 年费用比较

(下转第 86 页)

作量巨大,宜自行开发软件计算,此时所提出方法可供参考。

参考文献

- [1] 孔月萍,张璋,代冰辉,等.跟踪式光伏设备的阵列排布优化设计[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版) 2015 47(6):885-887.
- [2] 何银涛,张梅,黄华.光伏发电跟踪支架阴影数学模型

(上接第43页)

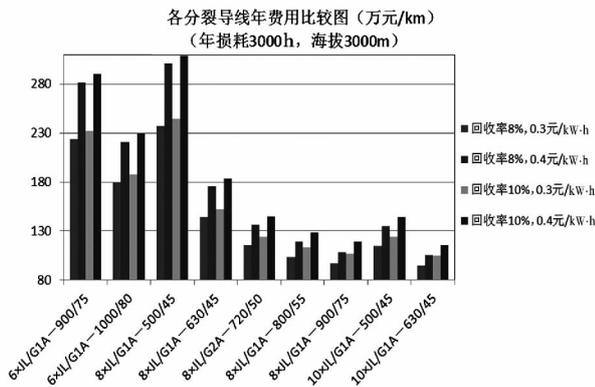


图10 年损耗3000h,海拔3000m年费用比较

可以看出,在年费用比较方面,8分裂、10分裂导线优势明显,其中:在海拔1000m以下,8分裂630mm²导线年费用最低;在海拔2000m时,8分裂720mm²导线年费用最低;海拔3000m时,10分裂630mm²导线年费用最低。6分裂导线受电晕损耗影响,其年费用在各海拔中均较高。

同时8分裂500mm²导线受电晕损耗影响,在海拔1000m以上时,其年费用均为参选导线中的最大值。

经比较计算,在不考虑电晕损耗的情况下,8分裂630mm²导线的年费用在各海拔范围内均为最低值。

4 结论

上面对1000kV特高压交流输电线路各分裂导线组合在满足电磁环境条件下的海拔限值进行分析,其结果如下:

- 1) 对于工作场强与临界场强的比值(E_m/E_0), 10分裂导线满足限值海拔均在4000m以上; 8分裂导线中仅630mm²截面限值海拔约为3500m,其余导线均在3500m海拔以上; 6分裂导线满足限值

研究[J]. 太阳能 2015(3):32-35.

作者简介:

胡振兴(1980),高级工程师,长期从事火力发电厂、新能源电站电气设计和管理工作的;

彭勇(1973),高级工程师,长期从事火力发电厂、新能源电站电气设计和管理工作的。

(收稿日期:2017-06-27)

海拔最高为3000m。

2) 鉴于环境影响评价中已不纳入无线电干扰因子,建议无线电干扰不作为特高压导线选型控制条件。

3) 可听噪声限值条件下,10分裂导线满足要求的极限海拔均在3500m以上; 8分裂导线中仅500mm²、630mm²导线的极限海拔小于3000m,但仍超过海拔2000m,其余导线均超过3000m; 6分裂导线最高极限海拔约为2200m。

4) 结合电晕损耗在不同海拔下对各分裂导线组合方案的最小年费用所产生的影响,在海拔1000~3000m范围内,1000kV特高压交流输电线路在海拔1500~2000m时,推荐采用8xJL/G2A-720/50导线;在海拔2000~3000m时,推荐采用10xJL/G1A-630/45导线。

参考文献

- [1] GB/T 1179-2008 圆线同心绞架空导线[S].
- [2] 郭雄,万保权,路遥.1000kV级交流输电线路电磁环境的研究[J].高电压技术 2006 32(12):55-58.
- [3] 黄春道,阮江军,文武,等.特高压交流输电线路电磁环境研究[J].电网技术 2007 31(1):6-11.
- [4] 国家电力公司东北电力设计院.电力工程高压送电线路设计手册(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:

梁明(1973),教授级高级工程师,长期从事输电线路设计工作;

朱长青(1981),高级工程师、工学硕士,从事架空输电线路设计和研究工作;

谢静(1983),高级工程师、工学硕士,从事架空输电线路设计和研究工作;

戴严航(1991),工程师、工学硕士,从事架空输电线路设计工作。

(收稿日期:2017-08-10)