

钢芯高强度耐热铝合金导线在 500 kV 大跨越工程中应用

罗 强¹, 罗浩元²

(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. 国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆 400039)

摘 要: 以重庆万州神华 500 kV 线路长江大跨越工程为例, 通过对不同大跨越导线应用方案的载流量、电磁环境、荷载、工程投资等技术经济指标进行了对比分析, 结果表明钢芯高强度耐热铝合金导线具有明显的优势, 可以在今后的低海拔大跨越工程中广泛应用。

关键词: 输电线路; 大跨越; 导线比选; 工程应用

中图分类号: TM751 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2018)06-0075-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.06.017

Comparison and Selection of Heat – resistance Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced with High Strength for Wangzhou Changjiang Large Span Installation and Its Application

Luo Qiang¹, Luo Haoyuan²

(1. Southwest Electric Power Research Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China;
2. State Grid Chongqing Maintenance Company, Chongqing 400039, China)

Abstract: The comparison and selection of conductors are introduced in Changjiang river crossing project of Shenhua 500 kV transmission line in Wanzhou, Chongqing. The JGQNLH/EST-630/80 heat-resistant aluminum alloy conductor steel reinforced with high strength is selected from 6 different large span conductors through calculating the allowing current of conductor, the electromagnetic environment of all kinds of bundled conductor and the load of tower, and comprehensively comparing and analyzing the economy and technology.

Key words: transmission line; large span; conductor comparison and selection; engineering application

0 引 言

大跨越工程的导线选择非常关键。导线特性对跨越塔的高度和运行荷载起关键作用, 也决定了输电损耗和效率以及机电过载能力。只有选择最佳导线方案, 才能确保跨越段工程具有良好的技术经济性和较高的运行安全性。大跨越工程在选择导线时应考虑输送容量、电磁环境、机械性能、制造条件等因素, 合理控制导线平均运行应力和弧垂等。

目前, 国内外 500 kV 大跨越设计一般采用的导线主要有(特强)钢芯(高强度)铝合金绞线、钢芯

(高强度)耐热铝合金绞线、铝包钢绞线、钢芯铝包钢绞线等。

钢芯高强度耐热铝合金导线是在钢芯铝合金导线的基础上将其钢芯加强采用高强度钢芯, 同时在铝合金中加入金属锆(Zr)元素后制造出的一种新型导线。在低海拔地区钢芯高强度耐热铝合金导线由于其连续运行温度及短时容许温度比常规钢芯铝绞线(ACSR)高 60 ℃, 分别达到 150 ℃ 及 180 ℃, 从而大大提高了输电能力, 同时其机械特性也较常规钢芯铝绞线(ACSR)大大提高。

下面以重庆万州 500 kV 长江大跨越工程为例, 对比分析计算了 6 种大跨越导线方案, 结果表明高

强度耐热铝合金导线方案具有明显优势,为今后低海拔地区 500 kV 大跨越工程提供参考。

额定电流: $2 \times 1277 \text{ A}$
系统最大输送容量: 2400 MVA/回;
N-1 情况下导线载流量: $1 \times 2917 \text{ A}$ 。

1 工程概况

万州神华 500 kV 线路长江大跨越工程采用同塔双回路架设,跨越段线路全长 $2 \times 1.512 \text{ km}$ 。

跨越方式: 耐-直-直-耐;

跨越档距: 101 m/1247 m/164 m;

铁塔呼高: 39 m/86 m/84.5 m/25 m

铁塔全高: 78.5 m/124.6 m/123.1 m/64.55 m

系统额定输送容量: $2 \times 1050 \text{ MVA}$;

2 导线初步对比分析

初步比选从载流量、电磁环境影响、电能损失、机械性能等方面开展对比分析。

2.1 候选对比方案

候选方案有特强钢芯铝合金绞线等 6 种,其中钢芯高强度耐热铝合金绞线采用 2 分裂,其余采用 4 分裂,具体方案和导线参数如表 1、表 2 所示。

表 1 万州神华 500 kV 线路长江大跨越导线候选方案

| 导线方案 | 导线类别 | 型号 | 分裂数 |
|------|--------------|----------------------|-----|
| 方案 1 | 特强钢芯铝合金绞线 | AACSR/EST-410 | 4 |
| 方案 2 | 钢芯铝合金绞线 | JLHA1/G3A-315-26/7 | 4 |
| 方案 3 | 钢芯铝合金绞线 | JLHA1/G1A-400/50 | 4 |
| 方案 4 | 钢芯高强度耐热铝合金绞线 | JGQNLH/EST-630/80 | 2 |
| 方案 5 | 钢芯高强度耐热铝合金绞线 | JGQNLH55/EST-690/180 | 2 |
| 方案 6 | 铝包钢绞线 | AS-400 | 4 |

表 2 导线机械特性

| 型号 | AACSR/ EST-410 | JLHA1/G3A- 315-26/7 | JLHA1/G1A- 400/50 | JGQNLH/ EST-630/80 | JGQNLH55/ EST-690/180 | AS-400 |
|--|--|--|--|---|---|-----------------|
| 结构 | 铝合金 38×3.7 钢芯 37×2.29 | 铝合金 26×4.23 钢芯 7×3.29 | 铝合金 54×3.07 钢芯 7×3.07 | 铝合金 54×4.05 钢芯 19×2.43 | 铝合金 72×3.5 钢芯 19×3.5 | 铝包钢 $37/3.7$ |
| 截面积/ mm^2 | 560.97 | 426.00 | 451.54 | 783.77 | 875.52 | 397.83 |
| 其中: 铝(合金) / mm^2 | 408.58 | 366.00 | 399.72 | 695.66 | 692.72 | 171.07 |
| 钢/ mm^2 | 152.39 | 59.60 | 51.82 | 88.11 | 182.80 | 226.76 |
| 铝钢比 | 2.68 | 6.14 | 13.00 | 7.895 | 3.79 | 0.75 |
| 直径/mm | 30.83 | 26.80 | 27.60 | 36.45 | 38.50 | 25.90 |
| 重量 / $(\text{kg} \cdot \text{km}^{-1})$ | 2 421 | 1 475.30 | 1 509.30 | 2 615 | 3 349 | 2 276.5 |
| 拉断力/N | 361 700 | 197 550 | 186 910 | 293 100 | 450 290 | 315 080 |
| 破坏应力 / $(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$ | 644.80 | 463.73 | 413.90 | 373.96 | 514.31 | 792.00 |
| 弹性模量 / $(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$ | 102 300 | 76 000 | 69 000 | 70 180 | 83 190 | 118 800 |
| 膨胀系数 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ | 16.70 | 18.90 | 19.30 | 19.50 | 17.52 | 13.80 |
| 直流电阻 20°C / $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$ | 0.080 5 | 0.091 7 | 0.084 1 | 0.046 11 | 0.046 3 | 0.147 3 |
| 拉力重量比 /km | 15.24 | 13.65 | 12.63 | 11.44 | 13.72 | 14.13 |
| 资料来源 | 镇江大胜关 大跨越 | 国家标准 ^[1] | 国家标准 ^[1] | 万州长江 大跨越型号 | 上海中天 铝线厂 | 上海中天 铝线厂 |

2.2 允许载流量比较

根据 GB 50545-2010^[2], 可以计算得到各种方案允许温度下的允许载流量如表3所示。

表3 6个导线方案的允许载流量

| 方案 | 导线允许温度 /°C | 每相允许电流 /A | 备注 |
|-----|------------|-----------|--------|
| 方案1 | 90 | 3846 | >2917A |
| 方案2 | 90 | 3279 | >2917A |
| 方案3 | 90 | 3556 | >2917A |
| 方案4 | 120 | 3328 | >2917A |
| 方案5 | 120 | 3386 | >2917A |
| 方案6 | 100 | 3007 | >2917A |

根据表3的计算结果来看, 6种方案均能够满足该工程载流量的要求。

2.3 电磁环境比较

采用逐次镜像法计算导线表面电场强度^[3], 采用 CISPR 公式^[4]计算无线电干扰水平、BPA 公式计算可听噪声^[5]、前苏联经验公式计算电晕损失。计算对比结果如表4所示。

从表4的计算结果可知, 6种方案均满足相关标准^[6]的要求。

2.4 电能损失比较

各种导线方案的电能损失列于表5, 其中年损耗小时数取3000h, 上网电价取0.35元/kWh。

2.5 铁塔荷载及投资比较

6种导线方案在考虑大风、覆冰等条件下的铁塔荷载及其投资费用如表6所示。其中假设钢材单价1万元/t、混凝土单价0.2万元/t、导线单价2万元/t、金具单价2.5万元/t、420kN和550kN绝缘子单价分别为240元/片和360元/片。

通过表6的比较可见, 方案1的弧垂特性最好, 其跨江直线铁塔高度较方案2至方案6分别低8.5m、6.5m、22.5m、3.5m、2.5m。按实测大跨越断面图4座铁塔呼高分别为39m、63.5m、61m、25m, 铁塔全高分别为78.5m、102.1m、100.6m、64.55m。但由于其风荷载、无冰垂直荷重、有冰垂直荷重、最大使用张力均大于其他导线方案, 结合导线、绝缘子、金具等方面因素, 本体投资较方案2至方案6分别增加653.8万元、656万元、896.28万元、742.1万元、114.4万元。可看出方案4本体投

表4 各种导线分裂方式电磁环境参数计算结果

| 参数 | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案4 | 方案5 | 方案6 | 标准要求值 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| 子导线分裂间距/mm | 550 | 450 | 450 | 600 | 600 | 450 | |
| 最大地面电场强度/(kV·m ⁻¹) | 1.38 | 1.31 | 1.29 | 1.02 | 1.02 | 1.31 | 离地面1.5m高处最大电场强度≤4kV/m。 |
| 电晕临界电场强度 E _{m0} /(kV·cm ⁻¹) | 32.84 | 33.3 | 32.96 | 32.29 | 32.21 | 33.42 | |
| 导线表面最大电场强度有效值 E/(kV·cm ⁻¹) | 13.73 | 15.16 | 14.43 | 17.87 | 17.63 | 15.60 | |
| 导线表面最大电场强度 E _m /(kV·cm ⁻¹) | 19.42 | 21.44 | 20.99 | 25.27 | 25.19 | 22.06 | |
| E _m /E _{m0} | 0.591 | 0.644 | 0.637 | 0.783 | 0.782 | 0.66 | 按电晕条件考虑, 导线最大表面电场强度与全面电晕起始电场强度之比 (E _m /E ₀) ≤0.8~0.85。 |
| 无线电干扰 /dB(μV/m) | 34.05 | 36.56 | 35.2 | 52.06 | 51.71 | 37.52 | 无线电干扰限制: 海拔不超过1000m时, 距输电线路边相导线投影外20m处且离地高2m、频率为0.5MHz时的无线电干扰不超过55dB(V/μm)。 |
| 可听噪声 /dB(A) | 38.47 | 40.31 | 41.3 | 47.79 | 47.62 | 40.98 | 可听噪音限值: 距边导线投影外20m处, 可听噪音限值小于55dB(A)。 |

注: 表中计算电晕临界电场强度 E_{m0}时光滑系数 m 取值为0.9。

表5 各方案的电能损失比较

| 参 数 | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案4 | 方案5 | 方案6 |
|--|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2 × 1050 MVA(同塔双回) | | | | | |
| 每相截面积/mm ² | 2243.88 | 1704.00 | 1806.16 | 1567.54 | 1751.04 | 1591.32 |
| 电流密度/(A · mm ⁻²) | 0.65 | 0.86 | 0.81 | 0.93 | 0.83 | 0.92 |
| 直流电阻/(Ω · km ⁻¹) | 0.0805 | 0.0917 | 0.0841 | 0.0461 | 0.0463 | 0.1473 |
| 电晕损失功率/(kW · km ⁻¹) | 1.34 | 1.40 | 1.36 | 2.03 | 2.05 | 1.37 |
| 电晕损失能耗/(×10 ⁴ kW · h · km ⁻¹) | 1.174 | 1.226 | 1.191 | 1.775 | 2.059 | 1.200 |
| 电阻损失功率/(kW · km ⁻¹) | 278.10 | 316.88 | 290.51 | 328.80 | 330.20 | 516.15 |
| 电阻损失能耗/(×10 ⁴ kW · h · km ⁻¹) | 83.43 | 95.06 | 87.15 | 98.71 | 99.12 | 154.85 |
| 总电能损失功率/(kW · km ⁻¹) | 279.44 | 318.28 | 291.87 | 330.83 | 332.25 | 517.52 |
| 总电能损失/(×10 ⁴ kW · h · km ⁻¹) | 84.604 | 96.286 | 88.341 | 100.490 | 101.180 | 156.050 |
| 总电能损失费用/(万元 · km ⁻¹) | 29.61 | 33.70 | 30.92 | 35.17 | 35.41 | 54.62 |
| 电能损失比较/(万元 · km ⁻¹) | 0 | +4.09 | +1.31 | +5.56 | +5.80 | +25.01 |

表6 铁塔荷载及投资费用

| 对比项目 | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案4 | 方案5 | 方案6 |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 铝钢比 | 2.680 | 6.141 | 7.710 | 7.895 | 3.790 | 0.750 |
| 平均运行应力/% UST | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 20.5 |
| 大风水平荷载/(N · m ⁻¹) | 117.29 | 104.44 | 107.66 | 71.30 | 79.49 | 98.79 |
| 比较值/% ^① | 100.00 | 88.95 | 91.79 | 60.79 | 67.77 | 84.23 |
| 垂直荷重(无冰)/(N · m ⁻¹) | 92.63 | 57.00 | 60.74 | 51.25 | 74.97 | 88.11 |
| 比较值/% ^① | 100.00 | 61.54 | 65.57 | 55.33 | 80.94 | 95.12 |
| 垂直荷重(有冰10 mm)/(N · m ⁻¹) | 138.15 | 104.14 | 107.35 | 76.99 | 105.67 | 127.57 |
| 比较值/% ^① | 100.00 | 75.38 | 77.71 | 55.73 | 76.49 | 92.34 |
| 每相最大张力/kN | 578.72 | 316.08 | 299.06 | 234.48 | 360.23 | 504.13 |
| 比较值/% ^① | 100.00 | 54.62 | 51.68 | 40.52 | 62.25 | 87.11 |
| 跨越塔定位高/m | 60.5 | 69.0 | 67.0 | 83.0 | 64.0 | 63.0 |
| 跨越塔呼称高比较 ^② /m | 0 | +8.5 | +6.5 | +22.5 | +3.5 | +2.5 |
| 铁塔钢材量/t ^② | 0 | -396.1 | -402.7 | -559.3 | -494.2 | -63 |
| 钢材差价/万元 ^② | 0 | -396.1 | -402.7 | -559.3 | -494.2 | -63 |
| 基础混凝土量/t ^② | 0 | -651 | -664 | -922.4 | -816 | -105 |
| 混凝土差价/万元 ^② | 0 | -130.2 | -132.8 | -184.48 | -163.2 | -21 |
| 导线差价/万元 ^② | 0 | -66 | -59 | -77 | -33 | -8 |
| 耐张绝缘子串/kN | 3 × 550 | 2 × 550 | 2 × 550 | 2 × 420 | 2 × 550 | 3 × 550 |
| 绝缘子差价/万元 ^② | 0 | -27.7 | -27.7 | -36.9 | -27.7 | -13.8 |
| 金具差价/万元 ^② | 0 | -33.8 | -33.8 | -38.6 | -24.0 | -8.6 |
| 本体投资比较/万元 ^② | 0 | -653.80 | -656.00 | -896.28 | -742.10 | -114.40 |

注: ①以方案1作为基准值进行比较的百分比值; ②以方案1作为基准值进行比较的差值。

资最低,较方案1节约896.28万元。方案2、方案4、方案5的弧垂特性和电能损失稍差,但其风荷载、无冰垂直荷重、有冰垂直荷重、最大使用张力均较方案1小,且以方案4的荷重最小。

综上,在满足通航条件下:技术方面,方案1可降低跨越塔高,为6种方案塔高最低;经济方面,方案4可节约本体费用,为6种方案费用最低,方案2、方案3、方案5、方案6等在塔高和费用方面均介于方案1和方案4之间,经济技术优势不明显。因此对方案1和方案4两种导线再进行综合经济技术比较。

3 综合经济技术比较

3.1 年费用最小法

对方案1、方案4按年费用最小法^[7]计算结果如表7所示。年运行费用包括年电能损失费、运行维护费率1.4%、投资回收期10%。

表7 两种导线年费用计算结果

| 年损耗 小时数/h | 售电价/ (元·kWh ⁻¹) | 方案1/ (万元·km ⁻¹) | 方案4/ (万元·km ⁻¹) |
|--------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2500 | 0.3 | 168.98 | 145.41 |
| | 0.4 | 175.01 | 153.64 |
| 3000 | 0.3 | 172.60 | 150.35 |
| | 0.4 | 179.82 | 160.23 |
| 3500 | 0.3 | 176.21 | 155.29 |
| | 0.4 | 184.64 | 166.81 |

3.2 综合技术经济比较

两种导线综合技术经济比较见表8。

表8 两种导线综合技术经济比较

| 项 目 | 方案1 | 方案4 |
|----------------------------|---------------|---------------|
| 计算跨越塔 定位高/m | 60.5 | 83.0 |
| 最大载流能力/A | 3846 | 3328 |
| 综合荷载 | 最大 | 最小 |
| 电磁环境情况 | 满足要求,有裕度 | 满足要求,有裕度 |
| 金具配套及施工 | 有配套金具 | 有配套金具 |
| 本体投资差值 /万元 ^① | 0 | -896.28 |
| 年费用差值/万元 ^① | 0 | -23.57 |
| 导线制造情况 | 国内有制造 运行经验 | 国内有制造 运行经验 |

注:①以方案1作为比较基准。

通过上述比较,两种方案均能满足输送容量及电磁环境的要求;两种方案均能满足极限载流量2917 A,方案4年费用节约23.57万元,优于方案1。

4 结 论

通过对6种不同大跨越导线方案的技术和经济比较分析可知,高强度耐热铝合金导线以其强度高、荷载轻、载流能力强等优点,可以在满足电磁环境要求和保障安全运行的前提下,大幅度降低工程投资。在低海拔地区大跨越工程中具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 圆线同心绞架空导线引用标准: GB 1179-2008[S] 2008.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局. 110~750 kV 架空输电线路设计技术规范: GB 50545-2010[S] 2010.
- [3] 孙才华,宗伟,李世琼,等. 一种较准确的分裂导线表面场强计算方法[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 92-96.
- [4] IEEE Radio Noise Subcommittee Report. Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRE/IEEE Survey Results [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1973, PAS-92(3): 1029-1042.
- [5] R. G. Olsen. Radio Noise due to Corona on A Multiconductor Power Line above a Dissipative Earth [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(1): 272-287.
- [6] 国家能源局. 110~750 kV 架空输电线路大跨越设计技术规程: DL/T 5485-2013[S] 2013.
- [7] 原电力工业部. 电力工业部(82)电计字第44号文. 电力工程经济分析暂行条例[R]. 北京: 原电力工业部, 1982.

作者简介:

罗强(1965),高级工程师,从事输电线路技术研究及设计工作。

(收稿日期: 2018-06-10)

欢迎投稿 欢迎订阅