

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

易海蓉,王婷婷,李育兵,梁明

(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:以重冰区特高压直流输电线路工程为例,将钢芯中强度铝合金绞线与钢芯高强度铝合金导线的电气性能、机械特性和全寿命周期经济性进行比较分析。研究表明,钢芯中强度铝合金绞线在节约电能、减少损耗和降低年费用等方面具有显著优势,在重冰区特高压直流输电线路中具有广泛的应用前景。

关键词:特高压直流;输电线路;中强度铝合金芯铝绞线;应用

Abstract: Taking UHVDC transmission line project in heavy icing area for example, the differences in electrical performance, mechanical characteristic and total life cycle economy between aluminum-alloy conductor medium-strength steel reinforced and aluminum-alloy conductor high-strength steel reinforced are analyzed. It shows that, aluminum-alloy conductor medium-strength steel reinforced has significant advantages in saving electric energy, reducing power loss and annual cost etc, which is suggested to be extended in UHVDC transmission lines in heavy icing area.

Key words: ultra high voltage (UHV) DC; transmission lines; aluminum-alloy conductor medium-strength steel reinforced; application

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)05-0034-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.05.009

0 引言

中国幅员辽阔,特高压直流输电符合电力工业发展规律和电网技术的发展方向,在中国有广阔的应用前景^[1-3]。

远距离大容量的特高压直流输电,线路途经重覆冰区段概率增多,覆冰已成为影响线路安全运行和工程造价的主要因素之一。重冰线路易发生覆冰过载和不均匀覆冰引发的断线、断股事故,危及线路的安全运行,因此导线要具有优良的机械特性。为提高安全性,以往工程在特重冰区段均采用钢芯高强度铝合金绞线,但存在导线线损相对较高的问题。下面以±800 kV酒湖线30 mm冰区导线选择为例,在电气性能、机械性能、本体投资、年费用等方面对3种截面相同、型式不同的导线进行了详细对比分析,首次提出了30 mm重冰区线路采用新型钢芯中强度铝合金绞线的导线技术方案。

1 铝合金特性

铝合金是输电线路常用的材料,在国内外已经

有几十年的应用历史,合金单线主要材料成分由铝、镁、硅等材料合成。它添加的元素主要是镁(Mg)和硅(Si),该合金的主要组成物为 Mg_2Si 。在热处理状态下, Mg_2Si 固溶于铝中,并通过人工时效进行硬化,将 Mg_2Si 均匀地析出在合金单线的表面,使其在导电率、强度、延伸率上得到明显提高。

重冰区线路运行经验表明,导线在覆冰过载和不均匀覆冰情况下易发生导线断股、断线事故。因此在重冰区线路导线选择中应选取强度较大、铝股受力好的导线,并且适当提高导线安全系数,以提高导线覆冰过载能力。

2 钢芯铝合金绞线特性

钢芯铝合金绞线是一种钢芯和铝合金组合的导线,外层采用52.5% IACS或53% IACS高强度铝合金替代普通钢芯铝绞线中的铝线,内层采用常规的钢芯单丝绞合。中国导线标准GB/T 1179-2008《圆线同心绞架空导线》已有JLHA1/G1A、JHA2/G1A等规格的钢芯铝合金绞线,由于铝合金线强度较高,伸长率较大,所以其机械过载能力也较大,特

表1 铝(铝合金)单丝主要性能比较

系列	抗拉强度/MPa	导电率/(% IACS)	弹性模量/GPa	线性膨胀系数 /($1 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
硬铝单丝	> 165	61	55	23
中强铝合金单丝	240 ~ 255	57 ~ 58.5	55	23
高强铝合金单丝	295 ~ 315	52.5 ~ 53	55	23

表2 钢芯中强度、高强度铝合金绞线的技术参数

技术参数	JLHA2/G1A -630/45	JLHA4/G1A -630/45	JLHA1/G2A -720/50	JLHA4/G2A -720/50	JLHA2/G2A -800/55	JLHA4/G2A -800/55
钢芯强度	高强度	中强度	高强度	中强度	高强度	中强度
铝合金丝直径 (mm)/股数	4.22/45	4.22/45	4.53/45	4.53/45	4.8/45	4.8/45
钢丝直径 (mm)/股数	2.81/7	2.81/7	3.02/7	3.02/7	3.2/7	3.2/7
铝合金丝	630	630	725.27	725.27	814.3	814.3
钢芯	43.6	43.6	50.14	50.14	56.3	56.3
截面 /mm ²	总计	674	775.41	775.41	870.6	870.6
导线直径/mm	33.8	33.8	36.23	36.23	38.4	38.4
单位重量/(kg·km ⁻¹)	2 079.2	2 078.4	2 397.7	2 397.7	2 687.5	2 690
计算拉断力/N	231 330	216 060	290 640	247 120	326 310	277 460
弹性模量/(N·mm ⁻²)	63 000	63 000	63 000	63 000	63 000	63 000
线性膨胀系数 /($1 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8
20℃时直流电阻 /($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.053 34	0.049 13	0.046 3	0.042 63	0.041 23	0.037 97

表3 钢芯中强度、高强度铝合金绞线的机械特性

机械特性指标	JLHA2/ G1A - 630/45	JLHA4/ G1A - 630/45	JLHA1/ G2A - 720/50	JLHA4/ G2A - 720/50	JLHA2/ G2A - 800/55	JLHA4/ G2A - 800/55
$L_p = 400$	47.83	45.84	56.16	48.27	60.06	51.42
过载冰厚/mm	$L_p = 500$	46.74	44.94	54.53	47.20	58.23
	$L_p = 600$	46.13	44.44	53.60	46.60	57.18
最大弧垂 /($40^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$)	$L_p = 400$	18.02	18.66	18.11	18.17	18.29
	$L_p = 500$	28.63	29.59	28.64	28.73	28.83
	$L_p = 600$	41.60	42.94	41.52	41.64	41.51
相导线垂直荷重/ ($\text{kN} \cdot \text{相}^{-1}$)	均温	73.40	73.38	84.65	84.65	94.88
	覆冰	287.11	287.08	305.33	305.33	321.83
($L_o = 600$)	大风	62.81	62.81	67.33	67.33	71.36
相导线风荷重/ ($\text{kN} \cdot \text{相}^{-1}$)	覆冰	93.14	93.14	95.55	95.55	97.70
($L_h = 500$)	覆冰纵向最大张力 /($\text{kN} \cdot \text{相}^{-1}$)	507	493	543	542	575

别适合在重冰区使用。

外层采用 52.5% IACS 或 53% IACS 高强度铝合金线,其电阻损耗仍较大,若要进一步降低导线损耗,可采用 57% ~ 58.5% IACS 导电率的中强度铝合金线,虽然导线强度有所降低(详见表1),但导线直

流电阻进一步减小,在输电线路中节能降耗效果将更为突出。虽然目前钢芯中强度铝合金绞线只有少部分厂家的产品通过鉴定,但鉴于铝合金绞线的制造技术成熟,已在线路工程中广泛应用且运行维护经验丰富,因此钢芯中强度铝合金绞线制造、运

表4 钢芯中强度、高强度铝合金绞线的电气特性

导线型号	总铝截面/mm ²	电流密度/(A·mm ⁻²)	70℃时允许电流/A	运行线温时直流电阻值/(Ω·km ⁻¹)	运行线温下的电压降/kV	运行线温下两极导线电阻损耗功率/(kW·km ⁻¹)	两极电晕损失/(kW·km ⁻¹)
JLHA2/G1A-630/45	3 780	0.83	4 350	0.055 31	28.81	180.05	11.91
JLHA4/G1A-630/45	3 780	0.83	4 536	0.051 05	26.59	166.18	11.91
JLHA1/G2A-720/50	4 320	0.72	4 734	0.0481 3	25.07	156.67	10.74
JLHA4/G2A-720/50	4 320	0.72	4 932	0.044 84	23.35	145.96	10.74
JLHA2/G2A-800/55	4 800	0.65	5 070	0.043 38	22.59	141.21	9.91
JLHA4/G2A-800/55	4 800	0.65	5 280	0.040 19	20.93	130.83	9.91

注:数据以标称电压±800 kV、输送功率5 000 MW、输送距离1 000 km的线路计算所得;运行线温均以60℃考虑。

维难度不大。钢芯中强度铝合金绞线示意图1,暂定型号为JLHA4/G2A。

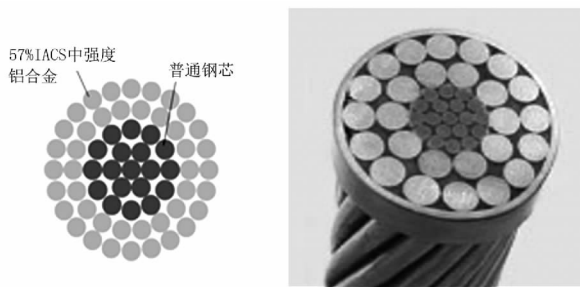


图1 钢芯中强度铝合金绞线结构及绞线

选定标称截面为630 mm²、720 mm²和800 mm²的钢芯中强度铝合金绞线和钢芯高强度铝合金绞线进行分析比较,其参数如表2所示。

由表2可知,相同铝合金截面的钢芯中强度铝合金绞线的计算拉断力比钢芯高强度铝合金小7%~15%,电阻低8%,而其他参数都基本一致。

为进一步对比两类导线,以6分裂为例,通过计算得出各导线的机械特性、电气特性分别如表3、表4所示。

由表3可知,相同铝合金截面的钢芯中强度铝合金绞线的机械特性与高强度相比基本相当,仅过载冰厚小约2~9 mm。

由表4可知,相同截面的中强度铝合金芯铝绞线与高强度相比,电阻损耗功率减小约7%左右,节能降耗效果更为突出。

3 导线参数

根据酒泉—湖南特高压直流工程(以下简称酒湖线)初步设计总报告,其输电规模为8 000 MW,输

电电压为±800 kV,30 mm特重冰区的长度合计约为43.7 km,最大风速为30 m/s(10 m高时),地形以高山大岭为主。

年最大负荷利用小时数在5 000 h以上,按照规程规定,导线经济电流密度应为0.9 A/mm²以下。

30 mm及以上重冰区线路的运行经验表明,导线上主要发生的是悬垂线夹处的导线断股事故。因此在重冰区导线选择中应选取强度较大、铝股受力好的导线,并且适当提高导线安全系数,尽量降低铝股应力,提高线夹握力均匀性。

根据重冰线路设计、运行的经验,在30 mm冰区及以上重冰线路,导线均采用钢芯铝合金绞线。根据工程导线结构型式比选,30 mm重冰区导线采用与5~20 mm冰区一致的6×1 250 mm²结构形式导线。因此选用了3种不同类型但截面均为6×1 250 mm²的导线进行比较分析,各导线参数如表5所示。

4 电气性能比较

4.1 导线载流量比较

根据系统条件,计算出各种导线型的最大允许电流和过负荷温度,如表6所示。

计算中,环境气温采用最高气温月的最高平均气温,在此取环境温度为40℃,风速采用0.5 m/s,太阳辐射功率密度采用1 000 W/m²。

从表6可以看出,3种导线均满足过负荷温度不超过70℃的要求。

4.2 电磁环境比较

由于参与比选的3种导线的外径相同,铝层结构相同,表面光洁度也相同,所以在同样电压作用下

表5 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线的技术参数

导线型号	JLHA1/G2A - 1250/100	JLHA2/G2A - 1250/100	JLHA4/G2A - 1250/100
	钢芯高强度铝合金绞线		钢芯中强度铝合金绞线
铝	1 248	1 248	1 248
截面/mm ²	101	101	101
总	1 350	1 350	1 350
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/km	0.026 9	0.026 7	0.024 8
计算拉断力/kN	523.36	498.39	448.46
弹性模量/GPa	65.17	65.17	65.17
热膨胀系数/×10 ⁻⁶ (℃)	20.5	20.5	20.5

表6 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线过负荷温度计算结果

导线	70℃时允许电流/A	80℃时允许电流/A	过负荷温度/℃
JLHA1/G2A - 1250/100	6 522	8 520	66
JLHA2/G2A - 1250/100	6 552	8 562	66
JLHA4/G2A - 1250/100	6 792	8 874	65.3

表7 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线不同代表档距下高温弧垂

代表档距	JLHA1/G2A - 1250/100	JLHA2/G2A - 1250/100	JLHA4/G2A - 1250/100
Lo = 300	10.50	10.49	10.46
Lo = 500	29.02	28.99	28.91

表8 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线不同代表档距过冰厚度

代表档距	JLHA1/G2A - 1250/100	JLHA2/G2A - 1250/100	JLHA4/G2A - 1250/100
Lo = 300	83.36	79.55	71.72
Lo = 500	75.27	72.13	65.64

表9 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线相导线荷载

导线型号	JLHA1/G2A - 1250/100	JLHA2/G2A - 1250/100	JLHA4/G2A - 1250/100
相导线垂直荷重 (Lo = 600)	150.12	150.12	150.12
相导线风荷重 (Lh = 500)	90.82	90.82	90.82
覆冰纵向最大张力	728	728	728.5

导线表面电场强度相当,无线电干扰、可听噪声等几乎没有差别。经计算,导线的电磁环境指标基本一致,满足《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(GB 50790 - 2013)的要求。

5 机械特性比较

输电线路导线的机械特性,主要包括弧垂特性、荷载特性和覆冰过荷载特性。机械特性的好坏直接影响到线路的安全运行情况,所以输电线路导线必须满足机械强度的要求。

5.1 弧垂特性

由表7可以看出,参与比选的3种导线中,钢芯中强度铝合金绞线 JLHA4/G2A - 1250/100 弧垂特性最好,但与其它导线弧垂相差不大。

5.2 导线过载能力

由表8可以看出,不同代表档距下,3种导线方案过冰厚度均达到65 mm以上,满足本冰区过载的要求。

5.3 导线的荷载特性

由于参与比选的3种导线外径、单重相当,故各导线垂直荷重、线条风荷重、纵向张力基本相同。

30 mm 冰区导线每相荷载见表9。

6 年费用比较

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。为了进一步分析各种导线的经济性,采用最小年费用法对各种导线的年费用进行了计算^[6]。

6.1 电能损失

对于超高压送电线路来说,电能损失主要由两

表10 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线电阻损耗及电晕损失

单位: kW/km

导线型号	JLHA1/G2A-1250/100	JLHA2/G2A-1250/100	JLHA4/G2A-1250/100
运行线温下两极导线电阻损耗功率	234.25	236.5	221.82
两极电晕损失	8.66	8.66	8.66

注: 运行线温按 60℃ 考虑; 两极电晕损失均为海拔 500 m、好天气条件下的电晕损失计算值。

表11 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线经济特性比较

单位: 万元/km

项 目	JLHA1/G2A-1250/100	JLHA2/G2A-1250/100	JLHA4/G2A-1250/100
	钢芯高强度铝合金绞线		钢芯中强度铝合金绞线
年损耗 4 000 h	年损耗费用	48.15	47.73
	导线年费用	161.66	161.24
年损耗 5 000 h	年损耗费用	59.39	58.87
	导线年费用	172.91	172.39
年损耗 6 000 h	年损耗费用	70.64	70.02
	导线年费用	184.16	183.53

注: 电价为 0.501 4 元/kW·h, 回收率为 8%。

部分组成, 即电阻损耗与电晕损耗。但电晕损耗在线路损耗中所占比重远小于电阻损耗, 线路的电能损失主要取决于电阻损耗^[4-5]。

根据系统条件, 导线按输送容量 8 000 MW, 电阻损耗计算结果见表 10 所示。

由表 10 可以看出, 钢芯中强度铝合金绞线 JLHA4/G2A-1250/100 电阻损耗最小, 由于各导线外径基本相同, 导线电晕损失基本相同, 故钢芯中强度铝合金绞线 JLHA4/G2A-1250/100 电能损失最小。

6.2 年费用计算结果

经初步询价, 钢芯高强度铝合金绞线单价定为 2 万元/t, 钢芯中强度铝合金绞线单价定为 2.1 万元/t。

将参与比选的 3 种钢芯铝合金绞线的全寿命周期经济比较, 年费用计算结果如表 11 所示。

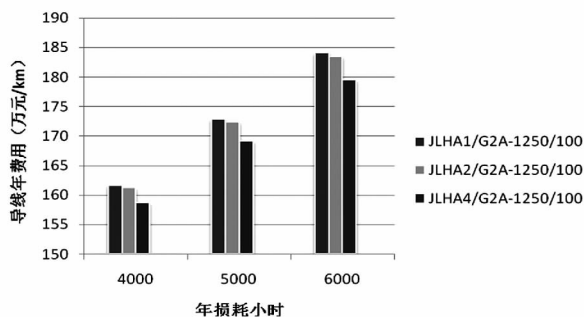


图2 年费用比较

(电价为 0.501 4 元/kW·h, 回收率为 8%)

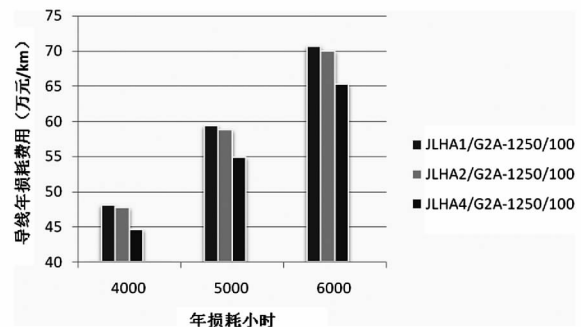


图3 年损耗费用比较

(电价为 0.501 4 元/kW·h, 回收率为 8%)

上述全寿命周期经济性比较结果表明: 同种导线年损耗费用和年费用随年损耗小时的上升而增大; 相同损耗小时数下, 钢芯中强度铝合金绞线年损耗费用和年费用低于钢芯高强度铝合金绞线, 普遍低 3~4 万元, 而上述 3 种导线在运行、损耗、维护保养直至回收等费用基本相当的, 因此在投资回收率、电价水平、损耗小时数情况下, JLHA4/G2A-1250/100 钢芯中强度铝合金绞线年损耗费用最低, 年费用也最低, 经济优势较为显著。

7 结 语

JLHA4/G2A-1250/100 钢芯中强度铝合金绞线弧垂特性和电磁环境, 满足规程规范要求; 过载冰厚度均达到 65 mm 以上, 满足本冰区过载的要求; 年损耗费用较低, 经济优势较为显著; 因此推荐 30 mm 冰

(下转第 83 页)

3) 接地槽开挖主要依赖挖沟机或定向钻机,对交通条件要求高。

为提高基础开挖及接地开挖的机械化率,充分发挥全过程机械化施工的优势,针对以上问题,提出了几点优化建议:

1) 创新基础设计,推广小型设备能够实施的基础方案,如岩石锚杆基础、微型桩等,提高基础机械化施工的可行性;

2) 对于新型小型化、专业化、节能环保、功能集成的设备,应积极引用,并制定相应设计方案,减少对大型设备的依赖;

3) 接地设计宜采用垂直敷设的方式,采用手持钻机进行机械化作业;

4) 当基础底部在风化岩层内时,不宜设置扩大头,可以采用加大基础埋深以满足承载力要求,从而提高旋挖钻机的使用效率和减少易损件的损耗;

5) 基础设计时尽量采用小桩径的基础型号,且桩径种类不宜过多,减少施工设备的投入。

5 结 语

全过程机械化施工具有安全可靠、经济合理、实施高效等优点。随着生产装备的不断更新,将逐渐

(上接第38页)

区采用经济性较好且具备制造条件的 JLHA4/G2A-1250/100 钢芯中强度铝合金绞线。

将大截面钢芯中强度铝合金铝绞线应用于特高压直流输电线路的重冰区中,可大量降低单位电能损耗,提高电能的利用效率,降低输电“线损”指标,且年费用低,经济效益较好,具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术 2005 29(14): 1-3.
- [3] 汪秀丽. 特高压输电技术的发展[J]. 水利电力科技,

克服大型机械进场困难的问题,在以后的工程中得到越来越多的推广。工程设计单位应充分发挥龙头引领作用,在确保工程满足安全、适用、耐久功能性要求的前提下,创新设计理念和办法,适应全过程机械化施工要求,进一步提升工程综合效益,实现施工由劳动密集型向装备密集型转变,提升工程施工安全水平。

参考文献

- [1] 王圣兵. 浅谈高压输电线路全过程机械化施工技术[J]. 低碳世界 2016(6): 63-64.
- [2] 赵飞等编著. 架空输电线路工程施工机械化率评价方法[M]. 北京: 中国电力出版社 2016.
- [3] 丁广鑫, 蔡敬东, 李正, 等编著. 输电线路全过程机械化施工技术设计分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [4] 丁广鑫, 蔡敬东, 李正, 等编著. 输电线路全过程机械化施工技术装备分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

作者简介:

杨 洋(1974), 本科、高级工程师, 长期从事输电线路设计工作。

(收稿日期: 2017-06-27)

2006 32(2): 6-16.

- [4] 丁广鑫, 孙竹森, 张强, 等. 节能导线在输电线路中的应用分析[J]. 电网技术 2012 36(8): 25-30.
- [5] 中国电机工程学会城市供电专委会. DL/T 686-1999 电力网电能损耗计算导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [6] 黄彭, 莫娟, 万建成, 等. 架空输电线路节能导线应用技术经济分析[J]. 中国电力 2013 46(7): 153-157.

作者简介:

易海蓉(1981) 本科, 从事高压输电线路设计工作;
王婷婷(1985) 硕士, 从事高压输电线路设计工作;
李育兵(1980) 硕士, 从事高压输电线路设计工作;
梁 明(1973) 本科, 从事高压输电线路设计工作。

(收稿日期: 2017-08-09)