

重冰区特高压直流线路大截面多分裂导线选型研究

周 唯,刘翰柱,谢 静,梁 明

(西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要:选择特高压直流输电线路工程的典型重冰区段为边界条件,并根据系统规划要求,开展大截面导线的电气性能、机械特性和全寿命周期经济性的比较分析。研究表明,大截面导线均能满足机械特性的校核要求,但随着冰区量级增大,年费用最优的推荐导线总截面呈减少趋势。损耗小时数越低,减少分裂和减小截面的导线方案年费用优势越明显。

关键词:特高压;直流输电线路;重冰区;导线

Abstract: Taking the typical heavy icing section of UHVDC transmission line as boundary conditions and according to the requirements of system planning, the electrical performance, mechanical characteristic and life cycle economy of large section conductors are compared and analyzed. Research shows that large section conductors can meet the requirements of mechanical characteristics. And the annual cost of total cross section of the optimal recommended conductor shows a decreasing trend with the increase of ice. If the loss hours are lower, the advantage of annual cost of conductor plan with lowering the number of bundled conductor and reducing cross section is more obvious.

Key words: ultra-high voltage (UHV); DC transmission lines; heavy icing area; conductor

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)02-0004-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.02.002

0 引 言

特高压直流线路架线工程投资一般占本体投资的30%左右,再加上导线方案变化引起的杆塔和基础工程量的变化,其对整个工程的造价影响是极其巨大的,直接关系到整个线路工程的建设费用以及建成后的技术特性和运行成本,所以在整个输电线路的技术经济比较中,应该对导线的截面和分裂型式进行充分的技术经济比较,推荐出满足技术要求而且经济合理的导线截面和分裂型式。

随着中国多条特高压直流输电线路工程建设投运,同时开展了900 mm²、1 000 mm²、1 250 mm²等大截面导线研制及工程应用研究。从荷载方面来看,分裂根数越少,导线截面越大,导线抗冰能力越强,杆塔荷载也随之显著减少。下面针对±800 kV直流线路工程输送容量增大、投资更高的特点,开展导线减少分裂数和缩截面研究,并提出满足工程要求的设计技术方案,为后续工程的重冰区大截面导线选型积累经验。

1 导线选型边界条件

1.1 系统边界条件

系统标称电压:±800 kV;系统输送功率:10 000 MW;额定电流:6 250 A。地形条件:20%高山大岭、40%山地、30%丘陵、10%平地。气象条件组合:27 m/s风区、20 mm冰区;27 m/s风区、30 mm冰区;27 m/s风区、40 mm冰区。

1.2 导线选择控制参数

特高压直流输电线路导线选型,是根据系统需要,按照经济电流密度和系统输送容量,结合不同导线的材料结构进行电气和机械特性等比选,并应满足可听噪声和无线电干扰等技术条件的要求,通过年费用最小法进行综合技术经济比较后确定特高压直流输电线路的导线截面和分裂型式。

1.2.1 导线选型规范要求

根据GB 50790-2013《±800 kV直流架空输电线路设计规范》规定:±800 kV直流线路下方最大地面合成场强的控制指标为30 kV/m;邻近民房的合成场强的控制指标为25 kV/m;无线电干扰

表1 机械特性比较表

导线型号	铝/钢股数	总截面 /mm ²	直径 /mm	线重 /(kg·m ⁻¹)	拉断力 /kN	弹性 模量 /MPa	热膨胀 系数/ ×10 ⁻⁶ (1/°C)	20℃时直流 电阻/ (Ω·km ⁻¹)
JL/G2A-1 000/80	84×3.89/19×2.34	1 080.00	42.79	3 411.00	255 330	65 200	20.5	0.028 76
JL/G2A-1 120/90	84×4.12/19×2.47	1 211.00	45.30	3 811.50	295 940	65 200	20.5	0.025 80
JL/G2A-1250/100	84×4.35/19×2.61	1 350.03	47.85	4 252.30	329 850	65 200	20.5	0.023 00
JLHA1/G2A-1 250/100	84×4.35/19×2.61	1 350.04	47.85	4 252.30	523 360	65 200	20.5	0.026 90
JLHA4/G2A-1 250/100	84×4.35/19×2.61	1 350.04	47.85	4 252.30	448 460	65 200	20.5	0.024 80
JLHA4/G2A-1 120/90	84×4.12/19×2.47	1 211.00	45.30	3 811.50	402 100	65 200	20.5	0.027 66
JLHA4/G2A-1 000/80	84×3.9/19×2.34	1 085.17	42.90	3 418.04	355 450	65 200	20.5	0.033 51

限值一般地区不超过 58 dB(μV/m)。可听噪声限值:海拔 1 000 m 及以下地区不超过 45 dB(A);海拔高度大于 1 000 m 地区控制在 50 dB(A) 以下。验算覆冰气象条件时,弧垂最低点的最大张力不超过拉断力的 60%,悬挂点的最大张力不超过拉断力的 66%^[1]。

1.2.2 重冰区导线选型要求

重冰区线路导线须满足设计规范提出的电磁环境控制限值要求,同时还应考虑机械特性满足以下原则:不能制约整条线路的传输能力;要有较高的机械强度和过载能力;铝股在冰荷载下的安全系数要高,以防止重冰区线路过载时断股;弧垂特性优良,降低杆塔高度,并满足电磁环境参数要求。

2 导线类型及分裂间距选择

2.1 导线类型选择

在进行导线型号的选择时,首先应立足于国内已有成功制造、施工和运行经验的导线型式。根据导线制造标准 GB/T 1179-2008《圆线同心绞架空导线》,并参考国际上常用的导线标准^[2],现初步选定表 1 所列 7 种常规导线型号作为比较用。

参比导线的型号及特性见表 1。

2.2 分裂间距选择

从电气方面看,导线存在最佳分裂间距,使得表面电场强度最小,但根据计算分析,限制次档距振荡要求的分裂间距才是控制条件。次档距振荡是由迎风侧子导线的尾流所诱发的背风侧子导线的不稳定振动现象。一般认为分裂导线间保持足够的距离就可以避免出现次档距振荡现象。根据国外研究,当分裂间距与子导线直径之比 $S/d > (16 \sim 18)$ 时,就

可以避免出现次档距振荡。

特高压线路由于分裂根数的增加,在采用大截面导线时,很难保证 $S/d > (16 \sim 18)$ 。但根据国外线路设计和运行的情况分析, S/d 的比值在 10~18 之间也能满足线路的安全运行。根据上述情况,结合中国超高压线路的设计、运行经验及本工程电磁环境计算结果, S/d 值暂按不小于 10 控制,工程具体实施时,进一步优化间隔棒布置方案,以抑制导线的次档距振荡等问题^[3]。根据国内外已建工程情况和有关研究成果,推荐特高压直流线路 1 250 mm² 截面导线分裂间距按表 2 选取。

表2 导线分裂间距及 S/d 值一览表

分裂 根数	分裂间距 S/mm	分裂导线圆直径 D/mm	S/d
6	500	1 000	10.440 ~ 11.680
8	550	1 100	11.484 ~ 12.850

注:d 为子导线直径,mm。

3 电气特性

3.1 导线总截面的选取

目前在建的锡盟—江苏、上海庙—山东 ± 800 kV 直流输电线路工程的输送容量均按双极输送容量 10 000 MW 进行设计。鉴于 ± 800 kV 直流输电线路的发展趋势,按系统输送容量 10 000 MW 开展导线选型,由此算得每极电流为 6 250 A,按电流密度不大于 0.9 A/mm² 考虑,则导线总铝截面不小于 7 000 mm²。

3.2 导线表面电场强度

一般认为直流线路导线起晕场强和交流线路起晕场强的峰值相同,可以将皮克(peek)公式转换为

直流型式,计算各种导线在海拔1 000、2 000、3 000、3 500 m时的起始电晕电场强度见表3。

表3 导线起始电晕电场强度 E_0 表(晴天)

导线	起晕电场 E_0 / (kV · cm ⁻¹)			
	1 000 m	2 000 m	3 000 m	3 500 m
6 × JL/G2A - 1 250/100	16.24	14.86	13.55	12.94
8 × JL/G2A - 1 250/100	16.24	14.86	13.55	12.94
8 × JL/G2A - 1 000/80	16.40	15.01	13.70	13.08
8 × JL/G2A - 1 120/90	16.32	14.93	13.62	13.01
6 × JLHA1/G2A - 1 250/100	16.24	14.86	13.55	12.94
6 × JLHA4/G2A - 1 250/100	16.24	14.86	13.55	12.94
6 × JLHA4/G2A - 1 120/90	16.32	14.93	13.62	13.01
6 × JLHA4/G2A - 1 000/80	16.40	15.01	13.70	13.08

按经典公式校核导线表面平均最大电场强度,由于比选导线直径很大,极导线方案的表面最大电场强度均小于起始电晕电场强度 E_0 ,即在大部分时间内,导线不处于电晕状态。

3.3 无线电干扰

GB 50790 - 2013《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》推荐的无线电干扰场强的经验公式和国际无线电干扰特别委员会 CISPR 的公式是一致的。这里采用 CISPR 公式进行无线电干扰场强的预估计算。各种极导线组合方案的无线电干扰计算结果见表4。

表4 导线无线电干扰计算结果 单位: dB(1 μV/m)

导线方案	海拔	海拔	海拔	海拔
	1 000 m	2 000 m	3 000 m	3 500 m
6 × JL/G2A - 1 250/100	49.08	52.41	55.75	57.41
8 × JL/G2A - 1 250/100	44.79	48.12	51.46	53.12
8 × JL/G2A - 1 000/80	44.72	48.05	51.39	53.05
8 × JL/G2A - 1 120/90	44.73	48.06	51.39	53.06
6 × JLHA1/G2A - 1 250/100	49.08	52.41	55.75	57.41
6 × JLHA4/G2A - 1 250/100	49.08	52.41	55.75	57.41
6 × JLHA4/G2A - 1 120/90	48.96	52.29	55.62	57.29
6 × JLHA4/G2A - 1 000/80	48.94	52.27	55.61	57.27

注:表中为采用极间距20 m,导线对地高度23 m的计算值。

可见,在海拔3 500 m时,各比选导线方案的无线电干扰均满足58 dB(μV/m)的限值要求。总体来看,对于上述导线方案,无线电干扰不作为电磁环境的控制条件。

3.4 可听噪声

GB 50790 - 2013《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》推荐采用BPA及EPRI的两种计算公式,这里采用EPRI计算公式。

各种极导线组合方案 and 不同海拔下的可听噪声值见表5。

表5 导线可听噪声计算表格 单位: dB(A)

导线方案	海拔	海拔	海拔	海拔
	1 000 m	2 000 m	3 000 m	3 500 m
6 × JL/G2A - 1 250/100	39.64	42.98	46.31	47.98
8 × JL/G2A - 1 250/100	35.91	39.24	42.57	44.24
8 × JL/G2A - 1 000/80	37.18	40.51	43.84	45.51
8 × JL/G2A - 1 120/90	36.52	39.85	43.19	44.85
6 × JLHA1/G2A - 1 250/100	39.64	42.98	46.31	47.98
6 × JLHA4/G2A - 1 250/100	39.64	42.98	46.31	47.98
6 × JLHA4/G2A - 1 120/90	40.86	44.20	47.55	49.20
6 × JLHA4/G2A - 1 000/80	42.18	45.52	48.85	49.52

注:导线平均高度23 m,极间距20 m。

由以上比较可看出,在海拔1 000 m时,所选参比导线均满足45 dB(A)的限值要求;在海拔达到3 500 m时,可听噪声均满足50 dB(A)的限值要求。通过电气特性计算校核,参选导线方案均满足电磁环境的控制条件。

4 20 mm 重冰区导线选型

根据系统输送容量10 000 MW开展导线选型,由此算得每极电流为6 250 A,按电流密度不大于0.9 A/mm²考虑,则导线总铝截面不小于7 000 mm²。10 mm轻冰区和15 mm中冰区导线通过年费用最小法进行综合技术经济比较,推荐年费用最低的8 × JL/G2A - 1 250/100钢芯铝绞线导线方案,分析过程这里不作详细阐述。主要针对20 mm、30 mm重冰区导线进行比选。

4.1 20 mm 冰区机械特性

参与比选的各导线弧垂、过载能力详见表6。导线荷载的比较详见表7。

表6 导线弧垂、过载性能一览表

导线型号	最大应力安全系数	最大应力 (×10 MPa)	年均应力 (×10 MPa)	过载能力/mm $L_0 = 400$	高温弧垂/m $L_0 = 400$
6×JL/G2A-1 250/100	2.5	9.468	5.917	37.86	13.569
6×JL/G2A-1 120/90	2.5	9.469	5.918	36.81	13.998
6×JL/G2A-1 000/80	2.5	9.161	5.726	35.50	15.051
8×JL/G2A-1 250/100	2.5	9.468	5.917	37.86	13.569
8×JL/G2A-1 120/90	2.5	9.469	5.918	36.81	13.998
8×JL/G2A-1 000/80	2.5	9.161	5.726	35.50	15.051

注: 过载时, 导线最低点的最大张力达到其计算拉断力60%时相应的计算覆冰厚度。

表7 20 mm 冰区导线荷载一览表

导线型号	相导线垂直荷重 $L_0 = 600$ m (kN/相)		相导线风荷重 $L_h = 500$ m (kN/相)		耐张绝缘子串配置/kN
	均温	覆冰	大风	覆冰	
6×JL/G2A-1 250/100	150.12	296.17	90.82	65.42	5×550
6×JL/G2A-1 120/90	134.56	275.67	85.98	63.52	4×550
6×JL/G2A-1 000/80	120.42	256.67	81.22	61.65	4×550
8×JL/G2A-1 250/100	200.16	394.90	121.10	87.23	6×550
8×JL/G2A-1 120/90	179.41	367.56	114.64	84.70	5×550
8×JL/G2A-1 000/80	160.56	342.23	108.29	82.20	5×550

表6、表7的20 mm重冰区各导线方案的过载能力大于35 mm, 满足20 mm重冰区设计要求, 且6分裂导线方案的杆塔荷重明显低于8分裂导线。

4.2 20 mm 冰区年费用比较

4.2.1 本体投资测算

按目前设计原则及假定工程边界条件, 对20 mm冰区各导线方案的初期投资进行估算, 详见表8。

表8 本体投资及投资差额比较表

序号	导线型号及分裂数	基准本体投资 (万元/km)	与导线1差值 (万元/km)
1	6×JL/G2A-1 250/100	462.5	0
2	6×JL/G2A-1 120/90	430.6	-31.9
3	6×JL/G2A-1 000/80	401.0	-61.5
4	8×JL/G2A-1 250/100	574.9	112.4
5	8×JL/G2A-1 120/90	532.1	69.6
6	8×JL/G2A-1 000/80	495.9	33.4

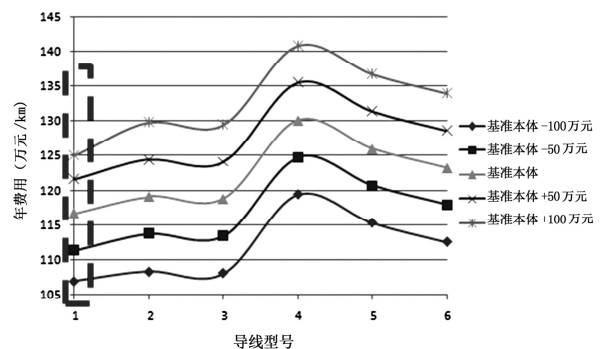
注: 本体投资由选取27 m/s 风区、20 mm 冰区气象条件的典型区段进行估算得来。

从表8各种导线方案每公里本体投资比较看出, 6分裂导线方案由于导线材料量、杆塔荷载小、塔重轻等原因, 本体投资均小于8分裂导线方案, 并

且截面越小, 初期本体投资越低。

4.2.2 年费用比较分析

虽然6分裂导线方案初期投资较优, 但是导线总截面较小, 电能损耗较高。对于特高压直流长距离大负荷运行而言, 随着损耗时间和运行时间的累积, 电能损耗引起的投资流失将逐级增大。考虑实际运行后的经济性采用年费用比较法, 进一步分析20 mm冰区各导线方案的最优选型。

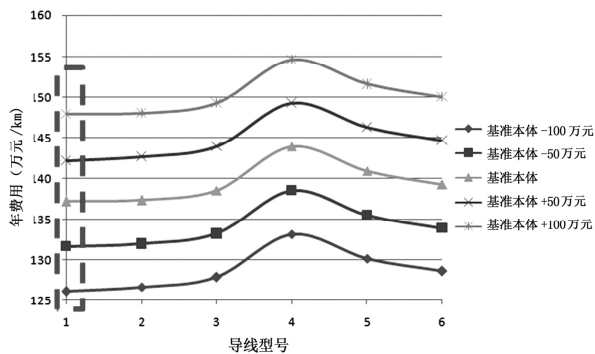


注: 图中1~6号导线型号及基准本体详见表8。

图1 20 mm不同本体投资水平下的导线年费用(3 000 h)

工程材料价格波动会影响本体投资的浮动, 在此分析20 mm冰区不同本体投资水平下, 各种导线方案的年费用对比情况。按照20 mm冰区各导线

方案的单公里本体投资(详见表8)作为基准本体进行比较测算。计算条件为:回收率8%;损耗小时数3000h;电价为0.4元/kWh。计算结果如图1所示。



注:图中1~6号导线型号详见表8,20mm基准本体462.5万元/km。

图2 20mm不同本体投资水平下的导线年费用(4000h)

计算条件为:回收率8%;损耗小时数4000h;电价为0.4元/kWh。计算结果如图2所示。

根据图1~图3的各导线方案投资变化趋势比较结果可知,本体投资增减在-100万元~100万元的范围内,对不同电价及回收率进行了测算分析,20mm冰区年费用最低的导线为6×JL/G2A-1250/100钢芯铝绞线方案。

通过上述方案比选,各种方案的导线弧垂特性和过载能力都能满足20mm重冰区的设计要求,从

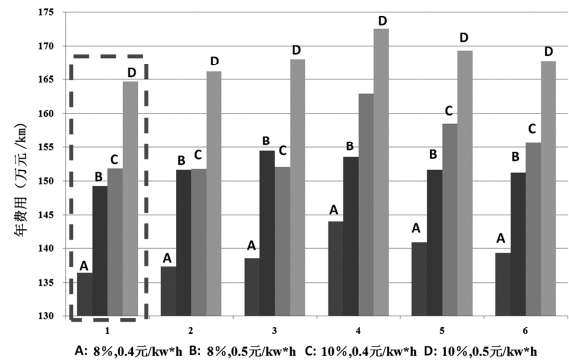


图3 20mm冰区不同电价及回收率的导线年费用

经济最优考虑,推荐6×JL/G2A-1250/100钢芯铝绞线作为20mm重冰区导线方案。

5 30mm、40mm重冰区导线选型

5.1 30mm、40mm重冰区机械特性

30mm及以上重冰区线路运行经验表明,导线上主要发生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、运行经验,在30mm及以上重冰线路,导线均采用钢芯铝合金绞线^[4]。参与比选的各导线弧垂、过载能力详见表9。

表9 导线弧垂、过载性能一览表

导线型号	最大应力安全系数	最大应力 (×10 MPa)	年均应力 (×10 MPa)	过载能力/mm Lo=400	高温弧垂/m Lo=400
6×JLHA4/G2A-1250/100	3.5	9.19	8.04	67.69	18.53
8×JLHA4/G2A-1250/100	3.5	9.19	8.04	67.69	18.53
6×JLHA1/G2A-1250/100	4.1	9.16	9.39	78.02	18.61
8×JLHA4/G2A-1000/80	3.5	9.07	7.94	64.20	20.78
6×JLHA4/G2A-1120/90	3.5	9.19	8.04	65.96	19.45
6×JLHA4/G2A-1000/80	3.5	9.07	7.94	64.20	20.78

导线荷载的比较以40mm冰区为例详见表10。

表10 40mm冰区导线荷载一览表

导线型号	相导线垂直荷重 Lo=500m (kN/相)		相导线风荷重 Lh=400m (kN/相)		耐张绝缘子串配置 /kN
	均温	覆冰	大风	覆冰	
6×JLHA4/G2A-1250/100	200.16	565.91	98.09	171.34	5×550
8×JLHA4/G2A-1250/100	150.12	424.43	73.57	128.51	6×550
6×JLHA1/G2A-1250/100	160.89	504.65	87.94	163.48	5×550
8×JLHA4/G2A-1000/80	134.56	400.35	69.65	125.46	5×550
6×JLHA4/G2A-1120/90	120.67	378.49	65.96	122.60	4×550
6×JLHA4/G2A-1000/80	160.56	359.34	108.29	98.64	4×550

通过表9、表10的30 mm、40 mm重冰区各导线方案的机械特性计算比选可见,大截面钢芯铝合金绞线过载能力大于60 mm,机械特性优秀,均能满足30 mm、40 mm重冰区设计要求,并留有较大裕度,故重冰区各导线方案长期运行的经济性将是导线方案的选型要点^[5]。

5.2 年费用比较

5.2.1 本体投资测算

由于30 mm、40 mm重冰区覆冰厚度的增加,造成铁塔荷载、基础作用力大幅增加,导线弧垂明显增大,杆塔平均档距更小,杆塔使用数量更多,使得工程材料量成倍数增加。由此引起单公里本体投资相对于20 mm冰区有大幅增长,势必影响导线选型趋势。按目前设计原则及假定工程边界条件,对30 mm、40 mm冰区各导线方案的初期投资进行估算,详见表11和表12。

表11 30 mm冰区本体投资及投资差额比较

序号	导线型号及分裂数	基准本体投资 (万元/km)	与导线1 差值 (万元/km)
1	6×JLHA4/G2A-1 250/100	1 086.5	0
2	8×JLHA4/G2A-1 250/100	1 424.3	337.8
3	6×JLHA1/G2A-1 250/100	1 083.3	-3.2
4	8×JLHA4/G2A-1 000/80	1 147.5	61.0
5	6×JLHA4/G2A-1 120/90	1 003.6	-82.9
6	6×JLHA4/G2A-1 000/80	911.2	-175.3

注:本体投资由选取27 m/s风区、30 mm冰区气象条件的典型区段进行估算得来。

表12 40 mm冰区本体投资及投资差额比较

序号	导线型号及分裂数	基准本体投资 (万元/km)	与导线1 差值 (万元/km)
1	6×JLHA4/G2A-1 250/100	1 632.1	0
2	8×JLHA4/G2A-1 250/100	2 124.3	492.2
3	6×JLHA1/G2A-1 250/100	1 628.2	-3.9
4	8×JLHA4/G2A-1 000/80	1 683.7	51.6
5	6×JLHA4/G2A-1 120/90	1 484.4	-147.7
6	6×JLHA4/G2A-1 000/80	1 295.2	-336.9

注:本体投资由选取27 m/s风区、40 mm冰区气象条件的典型区段进行估算得来。

通过表11和表12的典型区段投资估算比较可见,少分裂小截面导线仍然具有初期投资低的优点,需采用年费用比较法,进一步分析30mm、40mm冰

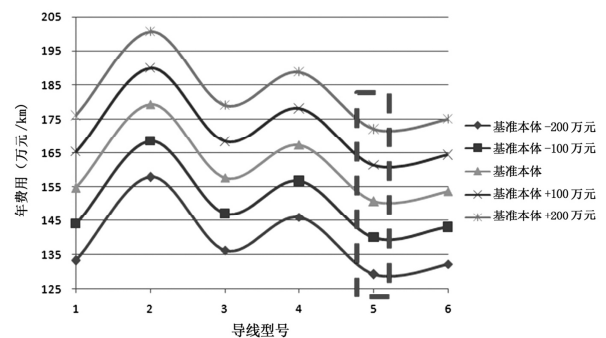
区各导线方案的综合经济性。

5.2.2 年费用比较分析

本体投资随着工程材料价格上下波动而变化,首先分析不同本体投资水平下,各种导线方案的年费用变化情况和差异性。

1) 30 mm冰区年费用比较

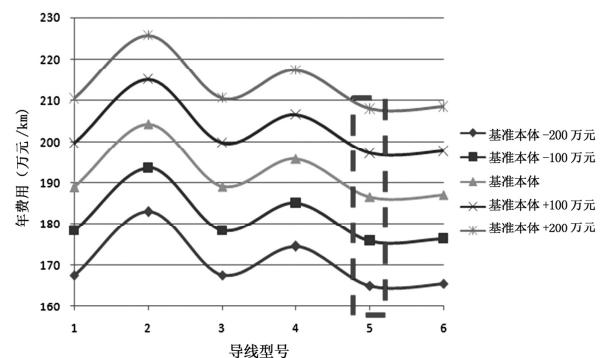
按照30 mm冰区各导线方案的单公里本体投资(详见表11)作为基准本体进行比较测算。计算条件为:回收率8%;损耗小时数3 000 h;电价为0.4元/kWh。计算结果如图4所示。



注:图中1~6号导线型号及基准本体详见表11

图4 30 mm不同本体投资水平下的导线年费用(3 000 h)

以40 mm冰区各导线方案的单公里本体投资(详见表12)作为基准本体进行比较测算。计算条件为:回收率8%;损耗小时数4 000 h;电价为0.4元/kWh。计算结果如图5所示。



注:图中1~6号导线型号及基准本体详见表12

图5 30 mm不同本体投资水平下的导线年费用(4 000 h)

从图4~图6的投资变化趋势比较可以看出,本体投资增减在-200万元~200万元的范围内。对不同电价及回收率进行了测算分析,30 mm冰区年费用最低的导线为6×JLHA4/G2A-1 120/90钢芯铝合金绞线。

2) 40 mm冰区年费用比较

分析40 mm冰区不同本体投资水平下各种导

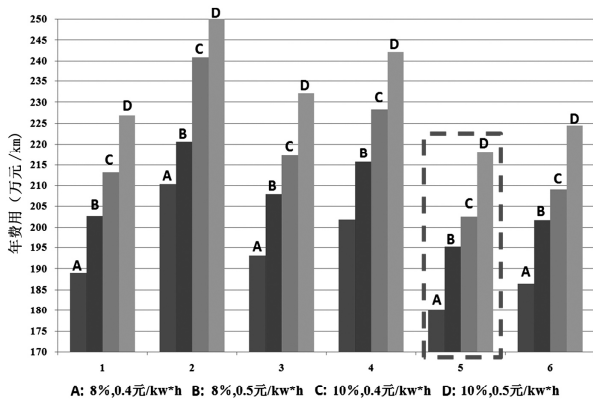
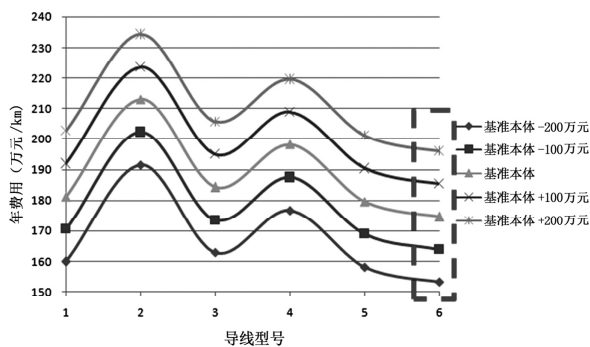


图6 30 mm冰区不同电价及回收率的导线年费用
线年费用对比情况。

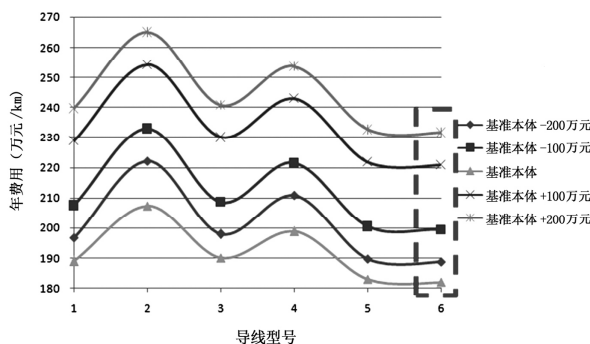
计算条件为:回收率8%;损耗小时数3 000 h;
电价为0.4元/kWh。计算结果如图7所示。



注:图中1~6号导线型号详见表12,40 mm基准本
体1632.1万元/km。

图7 40 mm不同本体投资水平下的导线年费用(3 000 h)

计算条件为:回收率8%;损耗小时数4 000 h;
电价为0.4元/kWh。计算结果如图8所示。



注:图中1~6号导线型号详见表12,40 mm基准本
体1 632.1万元/km。

图8 40 mm不同本体投资水平下的导线年费用(4 000 h)

从图7~图9的投资变化趋势可见,本体投资增
减在-200万元~200万元的范围内,对不同电价及
回收率进行了测算分析,40 mm冰区年费用最低的导
线为6×JLHA4/G2A-1 000/80钢芯铝合金绞线。

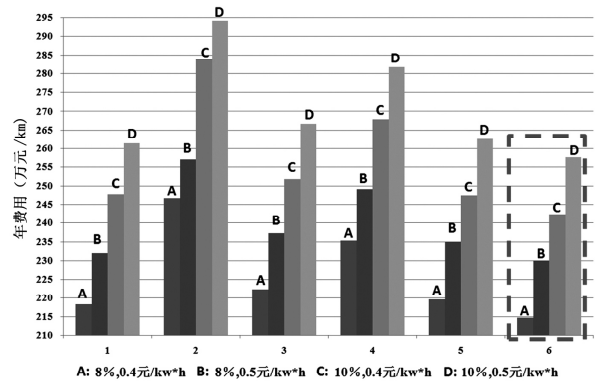


图9 40 mm冰区不同电价及回收率的导线年费用

通过上述方案比选,各种方案的导线弧垂特性
和过载能力都能满足30 mm、40 mm重冰区机械特
性的强度要求。通过年费用比较分析,在不同投资、
不同电价及回收率下,30 mm冰区6×JLHA4/G2A-
1 120/90钢芯铝合金绞线最优,而40 mm冰区6
×JLHA4/G2A-1 000/80钢芯铝合金绞线最优。6
×JLHA4/G2A-1 000/80钢芯铝合金绞线作为30
mm、40 mm重冰区的推荐导线方案。

6 结 论

1) 在满足系统输送容量的前提下,各重冰区
推荐的大截面导线均能满足机械特性的校核要
求,随着冰区量级增大,年费用最优的推荐导线总
截面呈减少趋势。20 mm冰区较10 mm和15 mm
冰区减少了分裂数,30 mm和40 mm冰区均减小
了导线截面。

2) 对不同冰区3 000 h、4 000 h损耗的年费用
趋势进行比较,损耗小时数越低,减少分裂和减小截
面的导线方案年费用优势越明显。

3) 大截面钢芯铝绞线已在特高压直流输电
线路设计中广泛应用,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^[6]。

参考文献

[1] GB 50790-2013, ±800 kV 直流架空输电线路设计规
范[S].
[2] GB/T 1179-2008, 圆线同心绞架空导线[S].

(下转第23页)

as Affected by Excitation Control [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System ,1969 ,88(4) :316 -329.

[3] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论 [J]. 电网技术 ,2006 ,30(10) :29 -33.

[4] 韩志勇. 电力系统低频振荡的分析和控制 [D]. 北京: 华北电力大学 ,2005.

[5] 韩志勇, 贺仁睦, 徐衍会, 等. 基于能量角度的共振机理电力系统低频振荡分析 [J]. 电网技术 ,2007 ,31(8) :13 -16.

[6] 韩志勇, 贺仁睦, 马进, 等. 电力系统强迫功率振荡扰动源的对比分析 [J]. 电力系统自动化 ,2009 ,33(3) :16 -19.

[7] Lei Chen , Yong Min , and Wei Hu. An Energy - based Method for Location of Power System Oscillation Source [J]. IEEE Transactions on Power Systems , 2013 ,28(3) :828 -836.

[8] 董清, 梁晶, 颜湘武, 等. 大规模电网中低频振荡扰动源的定位方法 [J]. 中国电机工程学报 ,2012 ,32(1) :

78 -83.

[9] 檀斌, 薛萬胜. 多机系统混浊现象的研究 [J]. 电力系统自动化 ,2001 ,25(2) :3 -8.

[10] Wen - Show Kao , KAO The Effect of the Low - frequency Oscillations Damping in Taipower System Experience w/wo Power System Stabilizer [C]. Power Engineering Society Summer Meeting 2001.

[11] 丁蓝, 薛安成, 李津, 等. 基于窗口滑动改进 Prony 算法的电力系统低频振荡识别 [J]. 电力系统自动化 ,2010 ,34(22) :24 -28.

[12] 王超, 李继红, 李颖毅, 等. 淮沪特高压投产后的华东电网低频振荡特征分析 [J]. 电力系统自动化 ,2013 ,37(18) :120 -125.

作者简介:

张 航(1994) 硕士研究生, 研究方向为交直流电网稳定性分析与控制。

(收稿日期: 2016 - 11 - 29)

(上接第 10 页)

[3] 何健, 陈光. 新型铝合金芯铝绞线在输电线路中的应用 [J]. 吉林电力 ,2011 ,15(2) :45 -49.

[4] 叶鸿声. 中强度全铝合金导线在输电线路中的应用 [J]. 电力建设 ,2010 ,31(12) :10 -20.

[5] 万建成, 李健, 陈媛, 等. 铝合金芯铝型绞线在大容量直流线路中的应用 [J]. 电力建设 ,2013 ,34(8) :105 -106.

[6] 布春磊, 周海鹰, 江明. 特高压直流输电线路大截面钢芯铝绞线选型研究 [J]. 电力建设 ,2013 ,34(9) :102 -104.

作者简介:

周 唯(1982) 硕士、高级工程师, 从事输电线路技术设计工作;

刘翰柱(1978) 学士、高级工程师, 从事输电线路技术设计工作;

谢 静(1981) 硕士、高级工程师, 从事输电线路技术设计工作;

梁 明(1973) 学士、教授级高级工程师, 从事输电线路技术研究及设计工作。

(收稿日期: 2016 - 12 - 10)

(上接第 18 页)

确动作。系统会根据当前电流刷新参考值, 使极线电流在重启过程中存在一定扰动。

4) 为保证接地极线路在故障过电压下不发生闪络, 建议招弧角间隙距离应至少增大到 560 mm。

参考文献

[1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社 ,2004.

[2] 王彪, 王渝红, 丁理杰. 高压直流输电接地电极及相关问题综述 [J]. 电力系统及其自动化学报 ,2012 ,24(1) :66 -72.

[3] 赵杰, 何金良. 特高压和高压直流输电系统共用接地

极模式分析 [J]. 中国电力 ,2007 ,40(10) :45 -47.

[4] 张劲松. 高压直流输电共用接地极主要设计原则 [J]. 中国电力 ,2007 ,40(6) :48 -50.

[5] 张冯硕, 吴高波, 李健, 等. 特高压直流接地极线路绝缘配合研究 [J]. 电力建设 ,2015 ,36(2) :86 -90.

[6] 陈灿灿, 刘茂涛, 宋述波. ±800 kV 云广直流“12. 15”事故原因分析及防范措施 [J]. 电力系统自动化 ,2013 ,37(23) :125 -129.

作者简介:

雷 潇(1988) 博士、工程师, 主要从事电力系统过电压与接地技术研究工作。

(收稿日期: 2016 - 12 - 03)