

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.010

铝包钢芯高导铝绞线的技术特点及应用研究

麻闽政, 潘春平

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 铝包钢线具有优良的机械、电气和防腐性能。与传统钢芯铝绞线相比, 用铝包钢线代替镀锌钢线的铝包钢芯铝绞线具有重量轻、电阻小、耐腐蚀、弧垂小的特点, 尤其适合在沿海及重污秽地区应用; 采用 20.3% IACS 的 LB20 铝包钢芯代替镀锌钢芯与高导电率铝线组成的节能导线即铝包钢芯高导铝绞线, 可充分利用现有生产技术, 叠加发挥两种材料的节能效果, 与同规格的钢芯高导电率铝绞线相比, 交流电阻进一步降低约 1.6% ~ 2.7%。500 kV 线路典型算例表明: 综合考虑导线价格成本和节能效益, JL3/LB20 和 JL2/LB20 型铝包钢芯高导铝绞线具有较高的经济效益, 值得推广。

关键词: 铝包钢芯; 高导电率铝; 交流电阻; 节能

中图分类号: TM751

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0047-07

Characteristics and Application Research of High Conductivity Aluminum Conductor Aluminum-clad Steel Reinforced Cable

MA Minzheng, PAN Chunping

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Aluminum-clad steel wire has excellent performance of mechanical, electrical and anti-corrosion. By replacing Zinc-coated steel with aluminum-clad steel wire, aluminum-clad steel core aluminum stranded wire has lighter weight, smaller resistance, better anti-corrosion performance and better sag characteristics, compared to the traditional ACSR, especially suitable for coastal and heavy polluted area. Composed of 20.3% IACS aluminum-clad steel wire and high conductivity aluminum conductor, the new energy-saving conductor i. e. high conductivity aluminum conductor aluminum-clad steel reinforced cable can superpose two materials' energy-saving effect, and further reduce AC resistance about 1.6% ~ 2.7% compared with the same specifications of the Zinc-coated steel core high conductivity aluminum cable. A typical example of 500 kV transmission line shows, JL3/LB20 and JL2/LB20 type of the new energy-saving conductor has a notable energy conservation economic effect and worth promoting.

Key words: aluminum-clad steel reinforced; high conductivity aluminum conductor; AC resistance; energy efficiency

自然界环境污染日趋严重, 为了减轻大气污染对导线的腐蚀, 新型导线层出不穷。20 世纪 60 年代末出现的铝包钢芯铝绞线因其优越的防腐性能和机电性能, 在国外高压和超高压输电线路中得到了广泛应用。而在国内, 铝包钢芯铝绞线目前主要用于沿海地区和工业空气污染严重地区, 仍有较大推广空间。

进入 21 世纪, 国家大力提倡节能减排和使用新能源。为实现可持续发展, 建设“效率最大化、资源节约化、环境友好化”的绿色输电线路, 国内导线制造行业在传统钢芯铝绞线基础上, 通过提高硬铝导电率而研制成功的钢芯高导铝绞线具有相同的机械和物理性能, 并能降低导线电阻率约 1% ~ 3%, 节能效益可观, 已试用于诸多线路工程。

将铝包钢线生产技术和高导硬铝线生产技术相结合得到的铝包钢芯高导铝绞线, 同时具有优越的防腐性能和更高的节能效果, 具有广泛的应用前景。

收稿日期: 2016-05-11

作者简介: 麻闽政(1985), 男, 浙江温州人, 工程师, 硕士, 主要从事输电线路工程设计工作(e-mail) maminzheng@gedi.com.cn。

1 铝包钢芯高导铝绞线技术特点

1.1 镀锌钢线和铝包钢线的技术参数

传统钢芯铝绞线的承力芯由多股镀锌钢线绞合成。镀锌钢线按强度不同,分为1级~5级等5种。其中1级~3级镀锌钢线分别对应常用的普通、高强度和特高强度镀锌钢线,其技术参数见表1^[1]。

铝包钢芯铝绞线的承力芯由多股铝包钢线绞合成。铝包钢线按导电率不同,分为LB14、LB20、LB23、LB27、LB30、LB35和LB40等7种,其导电率分别为国际标准退火铜(IACS)的14%、20.3%、23%、27%、30%、35%和40%,其技术参数见表1^[2]。

1.2 硬铝线的技术参数

常规钢芯铝绞线中普通硬铝线LY9的导电率为61.0% IACS^[3],经过特殊制造工艺得到的高导电率硬铝线L1~L4的导电率可以达到61.5%~63% IACS^[4],其技术参数如表2所示。

1.3 铝包钢芯铝绞线的技术性能

常用型号铝包钢芯铝绞线的铝包钢单丝外径多为2.40~3.50 mm。为使铝包钢芯代替钢芯后导线机械拉力相匹配,一般采用LB20和LB14铝包钢线分别代替G1A级和G2A、G3A级镀锌钢线。按此原则设计的铝包钢芯铝绞线的结构、截面、外径、制造长度与同型号钢芯铝绞线完全相同,并具有以下优点:

- 1)重量略轻,相同重量长度更长。
- 2)电阻略小,电能损耗更小。

3)无双金属接触,耐腐蚀性能好,尤其适合在沿海及重污秽地区应用。

4)拉力重量比略大,使导线弧垂更小。

铝包钢线与高导电率铝线相结合可组成铝包钢芯高导铝绞线,在具有上述优点的同时,节能效果更为显著,其结构如图1所示。

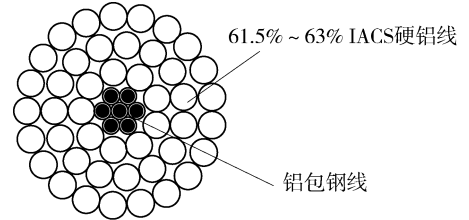


图1 铝包钢芯高导铝绞线结构图

Fig. 1 Structure of high conductivity aluminum conductor aluminum-clad steel reinforced cable

2 导线的机械特性

以广东沿海地区(基本风速37 m/s、无覆冰)500 kV输电线路常用钢芯铝绞线JL/G1A-720/50为例,与铝包钢芯铝绞线JL/LB20-720/50进行机械特性比较。

当JL/G1A-720/50或JL/LB20-720/50的铝线采用表2所示节能高导电率铝线时,相应新型节能导线的机械性能与原导线完全相同,故不赘述。

对比导线的参数见表3,对比导线的50℃定位弧垂、风偏摇摆角、大风过载能力、线条荷载及按节矩法^[5]计算的外层铝股应力和安全系数分别见表4、表5、表6、表7和表8。

表1 镀锌钢线和铝包钢线技术参数

Tab. 1 Technical parameters of zinc-coated steel and aluminum-clad steel

级别	镀锌钢线			铝包钢线						
	G1A	G2A	G3A	LB14	LB20	LB23	LB27	LB30	LB35	LB40
抗张强度/MPa (≤ 3.5 mm)	1 340~1 290	1 450~1 410	1 620~1 550	1 590~1 550	1 340~1 310	1 220	1 080	880	810	680
抗张强度/MPa (> 3.5 mm)	1 290	1 380	1 520~1 500	1 520~1 500	1 270~1 070	1 220	1 080	880	810	680
最小延伸率/(250 mm) %	3.0~4.0	2.5~3.0	2.0~2.5	1.0*	1.0*	1.0*	1.0*	1.0*	1.0*	1.0*
1%伸长时的应力/MPa (≤ 3.5 mm)	1 170~1 100	1 310~1 240	1 450~1 380	1 410~1 380	1 200~1 180	980	800	650	590	500
1%伸长时的应力/MPa (> 3.5 mm)	1 100	1 170	1 340~1 270	1 340~1 270	1 140~1 000	980	800	650	590	500
20℃时电阻率/($n\Omega \cdot m$)	191.57	191.57	191.57	123.15	84.80	74.96	63.86	57.47	49.26	43.10
导电率/(% IACS)	9	9	9	14	20.3	23	27	30	35	40
20℃时标称密度/($g \cdot cm^{-3}$)	7.78	7.78	7.78	7.14	6.59	6.27	5.91	5.61	5.15	4.64
最终弹性模量/GPa	190	190	190	170	162	149	140	132	122	109
线膨胀系数/($10^{-6} \cdot ^\circ C^{-1}$)	11.5	11.5	11.5	12.0	13.0	12.9	13.4	13.8	14.5	15.5
电阻温度系数/ $^\circ C^{-1}$	0.004 55	0.004 55	0.004 55	0.003 4	0.003 6	0.003 6	0.003 6	0.003 8	0.003 9	0.004 0

注: *指铝包钢线断裂后伸长率。

表2 普通硬铝线和高导硬铝线技术参数

Tab. 2 Technical parameters of hard-drawn aluminum and high conductivity aluminum

级别	硬铝线		高导硬铝线		
	LY9	L1	L2	L3	L4
抗张强度/MPa ($\leq 3.5\text{mm}$)	200~165	200~165	200~165	200~165	200~165
抗张强度/MPa ($> 3.5\text{mm}$)	160	160	160	160	160
20℃时电阻率/ ($\text{n}\Omega \cdot \text{m}$)	28.264	28.034	27.808	27.586	27.367
导电率/ (% IACS)	61	61.5	62.0	62.5	63.0
20℃时标称密 度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.703	2.703	2.703	2.703	2.703
最终弹性模 量/GPa	55	55	55	55	55
线膨胀系数/ ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
电阻温度系 数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	0.004 03	0.004 07	0.004 10	0.004 13	0.004 15

表3 导线 JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50 的参数

Tab. 3 Cable JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50's parameters

参数	JL/G1A-720/50	JL/LB20-720/50
铝线/股数 \times 单丝直径	45 \times $\Phi 4.53\text{mm}$	45 \times $\Phi 4.53\text{mm}$
钢(铝包钢)线/股数 \times 单丝直径	7 \times $\Phi 3.02\text{mm}$	6 \times $\Phi 3.02\text{mm}$
铝截面/ mm^2	725.27	725.27
钢截面/ mm^2	50.14	50.14
总截面/ mm^2	775.41	775.41
直径/ mm	36.24	36.24
单位质量/($\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$)	2 397.7	2 337.0
额定拉断力/kN	171.20	176.21
拉力重量比/ km	7.29	7.69
弹性模量/GPa	63.0	61.4
线膨胀系数/($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	20.9	21.5

表4 导线 JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50 的 50℃弧垂

Tab. 4 Cable JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50's sag in 50℃

50℃弧垂/ m	JL/G1A-720/50	JL/LB20-720/50	差值/ m
档距 l = 代表档距			
$l_p = 300\text{m}$	7.70	7.57	-0.13(1.6%)
$l = l_p = 350\text{m}$	10.12	9.95	-0.17(1.7%)
$l = l_p = 400\text{m}$	12.90	12.66	-0.24(1.9%)
$l = l_p = 450\text{m}$	16.02	15.69	-0.32(2.0%)
$l = l_p = 500\text{m}$	19.48	19.10	-0.38(1.9%)
$l = l_p = 550\text{m}$	23.32	22.84	-0.48(2.1%)
$l = l_p = 600\text{m}$	27.50	26.89	-0.61(2.2%)
$l = l_p = 700\text{m}$	36.95	36.11	-0.83(2.3%)

注: 基于南网 500 kV 标准设计杆塔, JL/LB20-720/50 的张力已相应放松。

表5 导线 JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50 的风偏摇摆角

Tab. 5 Cable JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50's wind angle

摇摆角/ $^\circ$	JL/G1A-720/50	JL/LB20-720/50
工频大风	61.41	62.24
操作过电压	33.02	33.81
雷电过电压	18.59	19.10
带电作业	8.44	8.68

注: 杆塔 K_v 值取 0.75, 导线平均高度取 20m。

表6 导线 JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50 的大风过载能力

Tab. 6 Cable JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50's wind overload capacity

大风过载能力/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	JL/G1A-720/50	JL/LB20-720/50
代表档距 $l_p = 300\text{m}$	73.67	75.19
$l_p = 350\text{m}$	70.67	71.97
$l_p = 400\text{m}$	68.49	69.62
$l_p = 450\text{m}$	66.87	67.87
$l_p = 500\text{m}$	65.64	66.52
$l_p = 550\text{m}$	64.68	65.47
$l_p = 600\text{m}$	63.92	64.63
$l_p = 700\text{m}$	62.81	63.41

注: 稀有风速工况导线允许最大张力取 70% 额定拉断力。

表7 导线 JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50 的线条荷载

Tab. 7 Cable JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50's load

线条荷载	JL/G1A-720/50	JL/LB20-720/50
水平荷载/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	29.748 (100%)	29.748 (100%)
垂直荷载/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	23.513 (100%)	22.918 (97.5%)
纵向最大使用张力/kN	65.056 (100%)	65.056 (100%)

表8 导线 JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50 的外层铝股应力

Tab. 8 Cable JL/G1A-720/50、JL/LB20-720/50's outer layer aluminum strand's stress

外层铝股	JL/G1A-720/50	JL/LB20-720/50
所在层数	3	3
应力 σ_a /MPa	46.96	48.19
破断应力/MPa	160	160
安全系数	3.41	3.32
疲劳极限/MPa	63.7	63.7
应力/疲劳极限 %	73.7%	75.6%

3 导线的电气性能

3.1 结构参数

我国常用的钢芯铝绞线结构有三种^[6], 见表 9。

3.2 综合导电率

导线的国际标准退火铜导电率 Y 为^[7]:

$$Y = \frac{0.017\ 241}{\rho_{\lambda 20}} \times 100\% \quad (1)$$

表9 我国常用钢芯铝绞线结构

Tab. 9 Common structure of aluminum cable steel reinforced in China

单丝数	钢比/%	导线标称截面					
45/7	7	300/20	400/25	500/35	630/45	720/50	800/55
48/7	9	300/25	400/35	500/45	630/55	720/65	800/70
其他*	13	300/40 ¹	400/50 ²	500/65 ²	630/80 ³	720/95 ³	800/100 ³

注: *系列单丝数含24/7、54/7和54/19,分别对应序号1、2和3。

$$\rho_{\Lambda 20} = \rho_{20} \lambda_m \quad (2)$$

式中: $\rho_{\Lambda 20}$ 为绞线 20 °C 时的电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$; ρ_{20} 为导电金属线 20 °C 时的电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$; λ_m 为绞线导电金属层的平均绞入系数, 即电阻增量比值。

对组合导线即钢芯铝绞线和铝包钢芯铝绞线, 其综合导电率 Y 为:

$$Y = \frac{A_a}{A} \cdot \frac{Y_a}{\lambda_{am}} + \frac{A_s}{A} \cdot \frac{Y_s}{\lambda_{sm}} \quad (3)$$

式中: A_a 为铝部分截面积, mm^2 ; A_s 为芯部分截面积, mm^2 ; A 为导线综合截面积, mm^2 ; Y_a 为铝线标准铜导电率, % IACS; Y_s 为芯线标准铜导电率, % IACS; λ_{am} 为铝股层电阻增量比值; λ_{sm} 为芯股层电阻增量比值。

普通铝线导电率 Y_a 为 61% IACS, 芯线导电率 Y_s 取值见表 10; 铝部分和芯部分的电阻增量比值 λ_{am} 和 λ_{sm} 取值见表 11。

表10 芯线标准铜导电率 Y_s 取值

Tab. 10 Core wire's conductivity percent IACS %

芯线 IACS	镀锌钢线 G1A ^[1]	铝包钢线 LB20 ^[2]
考虑钢导电性	9	20.3 *
不考虑钢导电性	0	15.3

注: * 为 LB20 铝包钢线规定的最小导电率。

表11 铝部分和芯部分电阻增量比值

Tab. 11 Resistance increment ratio of aluminum part and core part

单丝数	铝部分 λ_{am}	芯部分 λ_{sm}
24/7	1.020 8	1.004 3
45/7	1.022 3	1.004 3
48/7	1.022 4	1.004 3
54/7	1.023 3	1.004 3
54/19	1.023 3	1.007 7

按式(3)计算常用结构钢芯铝绞线和用 LB20 铝包钢线替换镀锌钢线后铝包钢芯铝绞线的综合导电率(分别按忽略钢导电性和考虑钢导电性考虑),

结果如表 12 和表 13 所示。

表12 常用导线的综合导电率(忽略钢导电性)

Tab. 12 Integrated conductivity of aluminum cable (aluminum-clad) steel reinforced (ignore steel wire's conductivity) %

单丝数	钢比	钢芯	LB20 芯	导电率增加 IACS	电阻减小
45/7	7	55.81	56.79	0.98	1.73
48/7	9	54.84	56.07	1.23	2.19
24/7	13	52.88	54.63	1.75	3.20
54/7	13	52.75	54.50	1.75	3.21
54/19	13	52.89	54.60	1.71	3.12

表13 常用导线的综合导电率(考虑钢导电性)

Tab. 13 Integrated conductivity of aluminum cable (aluminum-clad) steel reinforced (contain steel wire's conductivity) %

单丝数	钢比	钢芯	LB20 芯	导电率增加 IACS	电阻减小
45/7	7	56.39	57.12	0.73	1.27
48/7	9	55.56	56.47	0.91	1.61
24/7	13	53.91	55.21	1.30	2.34
54/7	13	53.78	55.08	1.30	2.35
54/19	13	53.90	55.16	1.26	2.29

按《圆线同心绞架空导线》(GB/T 1179—2008) 第 4.8 条规定: 铝与钢线的组合导线直流电阻计算, 忽略钢线的电导率, 但铝包钢线加强芯中铝包层的电导仍计算在内。根据表 12 和表 13 可知, 是否忽略钢线的导电率对计算结果有较大影响。笔者认为, 为客观估计和评价铝包钢线代替镀锌钢线带来的节能效益, 在比较计算导线综合导电率和电阻时应计及钢线的电导率。

因此根据表 13 计算结果, 若以 20.3% IACS 的 LB20 铝包钢绞线代替 9% IACS 的镀锌钢绞线作为承力芯, 对钢比分别为 7%、9% 和 13% (单丝数 54/7) 的导线, 其综合导电率可分别提高约 0.73%、0.91% 和 1.30% IACS, 电阻可分别降低约 1.27%、1.61% 和 2.35%。可见, 钢比越大的导线, 用铝包钢线代替镀锌钢芯对降低导线电阻的作用越大, 反之则越小。

3.3 直流电阻

导线 20 °C 时直流电阻 R_{20} 可按下式计算:

$$R_{20} = \frac{\rho_{\Lambda 20}}{A} = \frac{0.017\ 241}{Y \cdot A} \quad (4)$$

以 720/50 导线结构为例, 分别计算常规钢芯铝绞线、铝包钢芯铝绞线和不同导电率铝线时铝包钢芯高导铝绞线的 20 °C 直流电阻, 结果如表 14

表 14 720/50 结构导线直流和交流电阻比较表

Tab. 14 DC resistance and AC resistance comparison of 720/50 structure conductors

级别	JL/G1A	JL/LB20	JL1/G1A	JL1/LB20	JL2/G1A	JL2/LB20	JL3/G1A	JL3/LB20	JL4/G1A	JL4/LB20
20 °C 直流电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.039 430	0.038 928	0.039 113	0.038 618	0.038 800	0.038 314	0.038 493	0.038 014	0.038 191	0.037 719
导线温度/°C	42.16	42.05	42.11	42.01	42.07	41.97	42.03	41.93	41.98	41.89
导线直流电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.042 951	0.042 388	0.042 633	0.042 078	0.042 311	0.041 765	0.041 995	0.041 457	0.041 675	0.041 145
集肤效应增加率/%	3.24	3.32	3.28	3.37	3.33	3.42	3.38	3.47	3.43	3.52
铁磁损耗增加率/%	1.02	0.57	1.02	0.58	1.03	0.58	1.04	0.58	1.05	0.59
导线交流电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.044 777	0.044 037	0.044 469	0.043 737	0.044 157	0.043 434	0.043 851	0.043 136	0.043 542	0.042 834
交流电阻减小率/%	0.00	-1.65	-0.69	-2.32	-1.38	-3.00	-2.07	-3.66	-2.76	-4.34

注: (1) 环境温度 20 °C, 风速 0.5 m/s, 太阳辐射功率 1 000 W/m², 导线表面散热系数和吸热系数 0.9; (2) 导线直流电阻已计及钢线导电率。

所示。

3.4 交流电阻

环境温度 t_a , 流经电流后温度升高 θ , 则运行温度 $t_a + \theta$ 时的直流电阻可按下式计算:

$$R_{dc(t_a+\theta)} = R_{20} [1 + \alpha_{20} (t_a + \theta - 20)] \quad (5)$$

式中: α_{20} 为 20 °C 时电阻温度系数, 1/°C。

导线温升可根据载流量热平衡公式计算^[8], 运行温度 $t_a + \theta$ 时的交流电阻可按下式计算:

$$R_{ac(t_a+\theta)} = R_{t_a+\theta} + \Delta R_1 + \Delta R_2 \quad (6)$$

式中: ΔR_1 为考虑集肤效应引起的电阻增量; ΔR_2 为考虑磁滞涡流引起的电阻增量。

交流电阻的计算方法很多, 其中以摩根 (Morgan) 计算方法^[9] 理论上最完善, 但很繁琐复杂; 而以日本 JCS0374^[10] 计算方法最简单。

文献[11]以钢芯铝绞线 JL/G1A-630/45 为基准, 对比分析了各种敏感因素下(不同工作频率、电流密度、铝线截面、钢芯截面等)摩根算法和日本算法的差异, 结果表明两者的主要差异在于磁滞涡流损耗引起的电阻增量 ΔR_2 , 日本 JCS0374 算法仅考虑了电流密度影响而忽略了其他因素, 具有一定误差, 一般用于交流电阻近似计算。因此, 为客观反映铝包钢芯铝绞线的实际节能效果, 本文采用摩根算法。

广东沿海地区 500 kV 输电线路通常每相采用 4 × JL/G1A-720/50 导线, 正常输送容量 $P = 1\ 800$ MW, 每根子导线正常电流为 $I = 547$ A。各导线的交流电阻计算结果如表 14 所示。

可知, 用铝包钢芯代替镀锌钢芯, 一方面减小

了导线直流电阻; 另一方面, 减小了钢芯的磁滞和涡流损耗, 进一步降低了导线交流电阻。如相对于 JL/G1A-720/50 钢芯铝绞线, JL/LB20-720/50 铝包钢芯铝绞线的直流电阻和交流电阻分别降低 1.27% 和 1.65%。

另外, 铝包钢线和高导电率铝线相结合组成的节能导线, 可显著降低交流电阻, 充分发挥两种材料的节能效益。如目前可批量生产的铝包钢芯高导铝绞线 JL2/LB20-720/50 和 JL3/LB20-720/50 可分别降低交流电阻 3.0% 和 3.66%, 而仍难以批量生产的最高导电率的钢芯高导铝绞线 JL4/G1A-720/50 也仅降低交流电阻 2.76%。

3.5 电磁环境

相同规格型号的铝包钢芯铝绞线与钢芯铝绞线的铝层结构、直径、表面光滑度均相同, 当作用以相同电压时, 导线表面的电场强度也相同, 故其电晕损耗、无线电干扰、可听噪声、线下电磁场强度等均一致。导线的电气性能

3.6 电能损耗费用

500 kV 四分裂双回线路导线电阻损耗功率:

$$P_{\text{loss}} = 24I^2 \cdot R_{ac(t_a+\theta)} \quad (7)$$

年电能损耗:

$$A_{\text{loss}} = P_{\text{loss}} \cdot \tau = 24I^2 \cdot R_{ac(t_a+\theta)} \cdot \tau \quad (8)$$

年电能损耗费用:

$$F_{\text{loss}} = A_{\text{loss}} \cdot J_D \quad (9)$$

式中: τ 为最大负荷损耗小时数; J_D 为上网电价。

广东电网 500 kV 输电通道线路的年最大负荷利用小时数 T_{max} 一般在 3 500 ~ 5 500 h, 取平均 T_{max}

表 15 导线电能损耗及经济性比较表

Tab. 15 Resistance loss and economy comparison of 720/50 structure conductors

级别	JL/G1A	JL/LB20	JL1/G1A	JL1/LB20	JL2/G1A	JL2/LB20	JL3/G1A	JL3/LB20	JL4/G1A	JL4/LB20
电阻损耗功率/(kW·km ⁻¹)	321.54	316.23	319.33	314.08	317.09	311.90	314.89	309.76	312.68	307.59
年电能损耗/(万 kWh·km ⁻¹)	86.82	85.38	86.22	84.80	85.61	84.21	85.02	83.64	84.42	83.05
年能损费用/ (万元·km ⁻¹ ·年 ⁻¹)	41.11	40.43	40.83	40.15	40.54	39.87	40.26	39.60	39.97	39.32
年能损差值/ (万元·km ⁻¹ ·年 ⁻¹)	0.00	-0.68	-0.28	-0.95	-0.57	-1.23	-0.85	-1.51	-1.13	-1.78
导线价格/(万元·t ⁻¹)	1.60	1.67	1.62	1.69	1.65	1.72	1.69	1.76	1.79	1.86
导线投资/(万元·km ⁻¹)	92.07	93.67	93.22	94.79	94.95	96.47	97.25	98.71	103.01	104.32
导线投资差值/(万元·km ⁻¹)	0.00	1.60	1.15	2.72	2.88	4.40	5.18	6.64	10.93	12.25
回收年限/(年)	/	-2.35	-4.07	-2.85	-5.05	-3.57	-6.09	-4.41	-9.64	-6.87
相对年费用/ (万元·km ⁻¹ ·年 ⁻¹)	0.00	-0.54	-0.18	-0.71	-0.31	-0.84	-0.39	-0.92	-0.16	-0.70

=4 500 h, 当功率因数为 0.95 时, 其损耗小时 $\tau = 2\ 700$ h; 根据发改价格[2015]748 号, 广东电网的上网电价参考火电价格取为 0.473 5 元/kWh。则双回线路单公里电阻损耗功率、年损耗电能及费用见表 15 所示。

3.7 经济性比较

相对于常规 JL/G1A-720/50 型钢芯铝绞线, 不同导电率硬铝的钢芯高导铝绞线和铝包钢芯高导铝绞线每年分别可节约电能损耗费用(0.28~1.13)万元/km 和(0.95~1.78)万元/km, 经济效益十分可观。

各导线单价及 500 kV 双回线路的导线投资如表 15 所示。对于采用各节能导线引起的初期投资增额, 可通过节约电能损耗的方式收回, 其中 JL/LB20、JL1/LB20 导线约 3 年内即可收回, JL1/G1A、JL2/LB20 导线约 4 年内收回, JL2/G1A、JL3/LB20 导线约 5 年内收回, 而其余导线则需 6~10 年方可收回。

为进一步评价各节能导线的经济性, 采用最小年费用法。按电力工业部(82)电计字第 44 号文《颁发“电力工程经济分析暂行条例”的通知》第十五条经济计算方法。线路工程简化计算公式为:

$$NF = Z \cdot \frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} + \mu \quad (9)$$

式中: NF 为年平均费用, 万元; Z 为折算到投运年的总投资, 万元; n 为工程经济使用年数, 取 30

年; r_0 为电力工业投资回收率, 取 8%; μ 为折算年运行费用, 包括电能损耗费用和维护费用, 万元。

各节能导线方案相对于普通 JL/G1A 钢芯铝绞线的年费用差值见表 15。可知, JL3/LB20 经济最优, JL2/LB20 其次, JL1/LB20 和 JL4/LB20 相当并列第三。

4 应用注意事项

4.1 导线额定拉断力算法探讨

按 GB/T 1179—2008《圆线同心绞架空导线》4.7.2 条规定: 钢或铝包钢芯铝(铝合金)绞线的额定拉断力, 应为铝(铝合金)部分的拉断力与对应铝(铝合金)部分在断裂负荷下钢或铝包钢部分伸长时的拉力的总和; 为规范及实用起见, 钢或铝包钢部分的拉力偏安全的规定为: 按 250 mm 标距, 1% 伸长时的应力来确定。

需要说明的是, G1A 级镀锌钢线断裂后伸长率为 3.0%~4.0%, 即使断裂后伸长率最小的 G3A 级镀锌钢线仍为 2.0%~2.5%, 而铝包钢线断裂后伸长率规定为不小于 1%。可见, 按 GB/T 1179—2008 规定的导线额定拉断力的算法, 对镀锌钢线和铝包钢线而言, 其安全裕度是完全不同的。前者仍有一定裕度, 而后者完全依赖制造厂家的工艺水平。制造工艺先进的厂家能够使铝包钢线的断裂后伸长率达到 1.2% 甚至 1.5%, 但更多的厂家仅仅满足国标要求的最小值。因此, 不同厂家生产的铝

包钢芯铝绞线在拉断力试验中的表现往往参差不齐。

因此,笔者提出,对于铝包钢芯铝绞线的额定拉断力算法是否可以进一步探讨和研究。这里提供两种参考方法:(1)定义铝包钢芯铝绞线的额定拉断力为铝股线和芯股线拉断力的总和再打0.9~0.95折,也即日本所采用的方法;(2)按GB/T 1179—2008规定计算,但其中铝包钢部分的伸长率需通过试验界定,而并非取钢线相同的1%。

4.2 导线连接金具

鉴于铝包钢线的延伸率远小于镀锌钢线,为保证铝包钢芯铝绞线压接后导线连接处的握着力达95%导线额定拉断力以上,导线连接金具包括接续管、耐张线夹等的设计尤为重要。

一般采用两种方法优化导线连接金具设计:加长接续管的钢管、耐张线夹的钢锚;在钢管和钢锚的内表面电镀铝层,即和铝包钢线的接触部分采用相同材质。

5 结论

1)与传统钢芯铝绞线相比,用铝包钢线代替镀锌钢线与硬铝线组成的铝包钢芯铝绞线,具有耐腐蚀、线路寿命长的特点。

特别的,使用LB20铝包钢线代替镀锌钢线,导线的重量和高温弧垂略减小、过载能力稍增加、风偏特性和防振性能略微变差,综合机械性能略优。

2)铝包钢芯铝绞线具有一定的节能经济效益。用铝包钢芯代替镀锌钢芯,一方面减小了导线直流电阻;另一方面,减小了钢芯的磁滞和涡流损耗,进一步降低了导线交流电阻。

3)使用LB20铝包钢线代替镀锌钢线与高导电率铝线组成节能导线,可充分利用现有生产技术,叠加发挥两种材料的节能效果,经济效益显著,值得大力推广。

对于不同导电率的钢芯高导铝绞线和铝包钢芯高导铝绞线,综合考虑目前导线价格成本和节能效益,500 kV输电线路选用JL3/LB20和JL2/LB20型铝包钢芯高导铝绞线具有较高的经济效益。

4)适用于铝包钢芯铝绞线的额定拉断计算方法有待深入探讨和研究。实际工程选用铝包钢芯铝绞线时,为满足握着力要求,导线接续管、耐张线夹

等连接金具的设计尤为重要。

参考文献:

- [1] 国家标准化管理委员会. 架空绞线用镀锌钢线: GB/T 3428—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. Standardization Administration of China. Zinc-coated steel wires for stranded conductors: GB/T 3428—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [2] 国家标准化管理委员会. 电工用铝包钢线: GB/T 17937—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. Standardization Administration of China. Aluminum-clad steel wires for electrical purposes: GB/T 17937—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [3] 国家标准化管理委员会. 架空绞线用硬铝线: GB/T 17048—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. Standardization Administration of China. Hard-drawn aluminum wire for overhead line conductors: GB/T 17048—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [4] 国家电网公司. 高导电率钢芯铝绞线: Q/GDW 632—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011. State Grid Corporation of China. High conductivity aluminum conductor steel reinforced: Q/GDW 632—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [5] 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): 14-19. YE H S. Application of moderate-strength all aluminum alloy conductor in transmission lines [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(12): 14-19.
- [6] 国家标准化管理委员会. 圆线同心绞架空导线: GB/T 1179—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. Standardization Administration of China. Round wire concentric lay overhead electrical stranded conductors: GB/T 1179—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [7] 国家标准化管理委员会. 电线电缆性能试验方法 第2部分: 金属材料电阻率试验: GB/T 3048. 2—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. Standardization Administration of China. Test methods for electrical properties of electric cables and wires-Part2: Test of electrical resistivity of metallic materials: GB/T 3048. 2—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [8] 国家住房和城乡建设部. 110 kV~750 kV架空输电线路设计规范: GB 50545—2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [9] MORGAN V T. Electrical characteristics of steel-cored aluminum conductors [J]. Proceedings of the Electrical Engineers, 1965, 112(2): 325-334.
- [10] The Japanese Electric Wire & Cable Makers' Association. Calculation basis of bare conductor's allowable current: JCS 0374-2003 [S]. Tokyo: The Japanese Electric Wire & Cable Makers' Association, 2003.
- [11] 张瑞永, 赵新宇, 陶礼学. 架空导线的交流电阻计算方法对比 [J]. 电线电缆, 2014(4): 1-3.