

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.016

# 绞合型碳纤维复合芯导线在新建线路中的应用研究

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:** 与目前普及应用的棒型碳纤维复合芯导线相比, 绞合型碳纤维复合芯导线具有柔软性能良好、安全稳定性高、连接金具简单和架线施工方便的系列优点, 是未来碳纤维复合芯导线的发展趋势。为研究该导线在 500 kV 新建架空输电线路工程中的应用前景, 以两典型 500 kV 双回交流线路模型为例, 分别从节材和节能的角度相应选取碳纤维复合芯导线, 与推荐的铝包钢芯铝绞线方案进行综合技术经济比较, 总结绞合型碳纤维复合芯导线经济性方面的优劣势, 以指导实际工程应用。

**关键词:** 绞合型; 碳纤维复合芯导线; 新建线路; 经济性

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)04-0082-06

## Application Research on Aluminium Conductor Multi-Strand Carbon-Fiber Core Cable in New Power Transmission Lines

MA Minzheng, PAN Chunping

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

**Abstract:** Compared to the widely used ACCC (Aluminum Conductor Composite Core) cable, the ACMCC (Aluminium Conductor Multi-Strand Carbon-Fiber Core) cable use the multi-strand carbon-fiber core instead of the single carbon-fiber core in ACCC, which has much better performance: higher stability and improved safety margin, better flexibility, simpler fittings as ACSR and easier for installation. Thus, ACMCC is future development trend of ACCC. In order to study the application prospect of ACMCC in new 500 kV overhead power transmission lines, taking two typical 500 kV double circuit AC lines as examples, different sizes of ACMCC cable are selected according to material-saving and energy-saving principle, and detailed technical and economic comparison is showed compared to the recommended cable, so economic performance of the ACMCC is given to direct the engineering application.

**Key words:** multi-strand carbon-fiber core; ACMCC; new transmission line; economy

我国于 2006 年开始在输电线路中研究应用碳纤维复合芯导线。截至 2015 年底, 全国共有 250 多条架空输电线路采用了该新型导线, 线路总长度约 1 790 km, 导线总长度约 7 315 km; 主要为增容改造或扩建工程, 电压等级覆盖 35 ~ 500 kV, 并以 110 kV、220 kV 线路为主。随着关键生产技术的国产化和导线价格的日益降低, 碳纤维

复合芯导线在新建线路中亦逐渐呈现技术经济优势。

目前应用成熟的碳纤维复合芯导线可分为棒型<sup>[1]</sup>和绞合型<sup>[2]</sup>碳纤维复合芯软铝绞线两类, 均具有重量轻、强度大、弛度低、耐高温、抗腐蚀、载流量大的共同优点。两者相比, 前者存在导线柔软性较差、配套金具复杂、施工工艺要求较高等缺点; 后者克服了该不足, 是未来碳纤维复合芯导线的发展趋势, 但由于导线价格稍高、生产厂家唯一, 制约了其在输电线路中的推广应用。

本文以新建 500 kV 输电线路为例, 研究分析应用绞合型碳纤维复合芯软铝绞线的技术经济性。

收稿日期: 2017-08-29

基金项目: 中国能建广东院科技项目: 同塔多回线路电气协同优化研究(EV04051W)

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 碳纤维复合芯软铝绞线

### 1.1 碳纤维复合芯软铝绞线分类

碳纤维复合芯软铝绞线即由碳纤维复合芯代替传统的钢芯, 与一层或多层导电率为 63% IACS 的软铝型线同心绞合而成的导线。按碳纤维复合材料芯的形状可以分为单股棒型芯和多股绞合碳纤维芯两类, 其结构如图 1 所示。

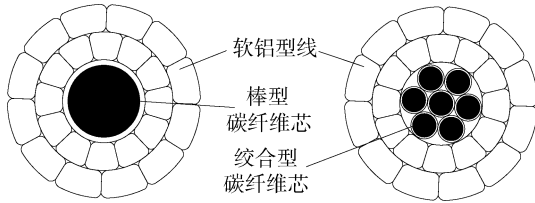


图 1 碳纤维复合芯导线结构图(棒型、绞合型)

Fig. 1 Structure of aluminum conductor composite core cable

### 1.2 碳纤维复合芯软铝绞线比较

与棒型碳纤维复合芯导线相比, 绞合型碳纤维复合绞线芯导线采用多股碳纤维复合绞线作为导线的承力体, 具有以下优势:

1) 良好的柔软性。传统钢芯铝绞线、棒型和绞合型碳纤维复合芯导线的弯曲半径分别约为 20 倍、40 倍和 25~30 倍导线直径。绞合型碳纤维复合芯导线在弯曲和自转时都具有较好的柔软性和弹性, 故在运输、施工过程中更加便利, 亦不存在“竹节”现象<sup>[3]</sup>。

2) 良好的安全稳定性。绞合型碳纤维复合线芯由多股碳芯线绞制而成, 每股线芯承受的拉力一般仅为整根复合芯的 1/7 或 1/19, 即使断裂对导线张力的影响较小。而棒型碳纤维复合芯一旦有生产过程中存在的瑕疵或施工过程中造成的微小裂痕, 均有可能扩散至整根芯棒, 造成导线断裂<sup>[2]</sup>。

3) 连接金具简单、架线施工较为方便。棒型碳纤维复合芯导线采用楔型自锁原理的新式耐张线夹和接续管, 其结构复杂, 价格较高(约为常规导线的 6~8 倍), 施工繁琐<sup>[4]</sup>; 绞合型碳纤维复合芯导线的耐张线夹和接续管与传统导线相似, 均由钢锚和铝管组成, 并采用常规的压接工艺, 施工简单<sup>[5]</sup>, 价格便宜(约为常规导线的 2~3 倍)。

## 2 节材方案比选

### 2.1 线路模型

某抽水蓄能电厂 500 kV 同塔双回送出线路的线路模型和系统条件如表 1 所示。

### 2.2 比选导线参数

根据系统规划, 推荐的导线为 JL/LB1A-500/45 铝包钢芯铝绞线, 每相 4 分裂, 分裂间距 500 mm。采用小截面碳纤维复合芯导线 JLRX1/JF1-400/35、JLRX1/JF1-300/40 进行比选, 各导线参数见表 2。

表 1 线路模型和系统条件

Tab. 1 Model of transmission line and system conditions

线路模型		系统条件	
线路长度	31 km	事故每回极限输送功率 2 640 MW	
地形比例	山地 51% 平丘 49%	额定每回输送功率 990 MW	
海拔高度	0~500 m	功率因素	0.9
气象条件	基本风速 31 m/s 无覆冰	年最大负荷 利用小时数	2 000 h
直线/耐张塔数	44/31	年最大负荷损耗小时数	1 000 h

表 2 导线参数

Tab. 2 Parameters of different conductors

导线	JL/LB1A-500/45	JLRX1/JF1-400/35	JLRX1/JF1-300/40
铝线/股数 × 单丝直径/mm	45 × Φ3.60	19 × Φ5.18 *	16 × Φ4.89 *
芯线/股数 × 单丝直径/mm	7 × Φ2.80	7 × Φ2.50	7 × Φ2.70
铝截面/mm <sup>2</sup>	488.58	400.0	300.0
芯截面/mm <sup>2</sup>	43.10	34.36	40.08
总截面/mm <sup>2</sup>	531.68	434.36	340.08
直径/mm	30.0	24.7	21.9
单位质量/(kg/km)	1 635.3	1 158.4	891.9
额定拉断力/kN	129.90	95.20	101.45
拉力重量比/km	8.10	8.38	11.60
弹性模量/GPa	63.7	59.8/115 **	62.1/115 **
线膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> /℃)	20.9	17.1/1.0 **	16.4/1 **
20℃直流电阻/(Ω/km)	0.057 45	0.069 8	0.093 0

注: \* 为梯形型线等效直径; \*\* 为斜杠前后数据对应导线拐点前后数值。

### 2.3 导线电气性能

由表 1 系统条件的线路 N-1 事故极限输送容量, 可求得每相子导线允许载流量应不小于 847A。

各比选导线的允许载流量计算结果见表3。根据线路设计规程<sup>[6]</sup>, JL/LB1A-500/45、JLRX1/JF1-400/35、JLRX1/JF1-300/40 线型的线路排位温度可取 50 ℃、60 ℃和 80 ℃。

表3 允许载流量

Tab. 3 Current-carrying capacity of different conductors A

导线	JL/LB1A-500/45	JLRX1/JF1-400/35	JLRX1/JF1-300/40
线温 80 ℃	916	802	675
线温 90 ℃	—	913	766
线温 110 ℃	—	1095	916

注: 环境温度取 35 ℃, 下同。

线路输送额定容量时, 各导线的交流电阻和线路电阻损耗功率如表4所示。

表4 交流电阻和损耗功率

Tab. 4 AC resistance and energy loss of different conductors

导线	JL/LB1A-500/45	JLRX1/JF1-400/35	JLRX1/JF1-300/40
运行温度/ ℃	38.3	38.5	39.9
交流电阻/ (Ω/km)	0.0635	0.0759	0.1011
损耗功率/ (kW/km)	153.6 (100.0%)	183.6 (119.5%)	244.6 (159.2%)

注: 环境温度取 20 ℃, 下同。

## 2.4 导线机械性能

各比选导线的定位弧垂、风偏摇摆角、线条荷载分别如表5~表7所示。

表5 定位弧垂

Tab. 5 Design sag of different conductors m

导线	JL/LB1A-500/45	JLRX1/JF1-400/35	JLRX1/JF1-300/40
定位温度/ ℃	50	60	80
档距 $l=400$ m	11.79	11.66 (-0.13)	9.71 (-2.08)
档距 $l=450$ m	14.62	14.42 (-0.20)	11.83 (-2.79)
档距 $l=500$ m	17.75	17.45 (-0.30)	14.13 (-3.63)

注: 假设档距等于代表档距, 导线安全系数 2.5、年平系数 25%, 下同。

表6 风偏摇摆角

Tab. 6 Swing angle of different conductors (°)

导线	JL/LB1A-500/45	JLRX1/JF1-400/35	JLRX1/JF1-300/40
工频大风	60.6	65.2	69.7
操作过电压	32.0	36.1	41.6
雷电过电压	10.1	11.6	14.1

注: 杆塔 kV 值取 0.75, 导线平均高度取 20m, 下同。

表7 线条荷载

Tab. 7 Mechanical load of different conductors

导线	JL/LB1A-500/45	JLRX1/JF1-400/35	JLRX1/JF1-300/40
水平荷载/ (N/m)	22.27 (100.0%)	18.33 (82.3%)	16.28 (73.1%)
垂直荷载/ (N/m)	16.04 (100.0%)	11.36 (70.8%)	8.75 (54.6%)
纵向张力/ kN	49.36 (100.0%)	36.18 (73.3%)	38.55 (78.1%)

## 2.5 导线经济性

综合导线、铁塔、基础、绝缘子、金具等因素, 各导线方案的主要技术指标和本体投资差异如表8和表9所示。

表8 主要技术指标

Tab. 8 Main technical indicators of different conductors

导线	JL/LB1A-500/45	JLRX1/JF1-400/35	JLRX1/JF1-300/40
导线/(t/km)	41.16	29.15	22.45
塔材/(t/km)	181.2	159.6	152.5
基础砼/(m <sup>3</sup> /km)	320.5	284.7	279.6
基础钢筋/(t/km)	27.5	24.4	24.0

表9 本体投资比较

Tab. 9 Economy comparison of different conductors

导线	JL/LB1A-500/45	JLRX1/JF1-400/35	JLRX1/JF1-300/40
导线单价/(元/m)	23.71	45.10	40.71
导线/(万元/km)	59.68	113.5	102.5
塔材/(万元/km)	144.96	127.7	122.0
基础/(万元/km)	55.04	49.7	48.9
本体/ (万元/km)	423.3 (100.0%)	440.6 (104.1%)	419.7 (99.2%)
年费用/ (万元·km <sup>-1</sup> ·年 <sup>-1</sup> )	43.41 (基准)	46.25 (2.85)	47.20 (3.79)

注: JL/LB1A-500/45 导线单价 1.45 万元/t。

采用最小年费用法<sup>[7]</sup>进一步评价各方案的经济性。当投资回收率取 7%<sup>[8]</sup>、运行年数取 30 年、电价参考广东燃煤发电上网电价 0.45 元/kWh<sup>[9]</sup>, 各方案的年费用计算结果如表9所示。

## 2.6 敏感性分析

对碳纤维复合芯导线的价格进行敏感性分析, JLRX1/JF1-400/35 和 JLRX1/JF1-300/40 方案的年费用随其导线价格波动的变化趋势如图2所示。

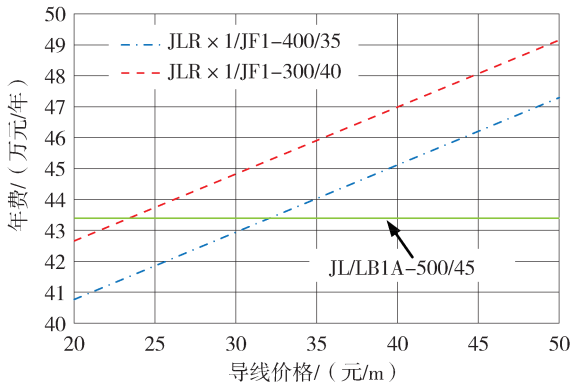


图 2 年费用随导线价格波动变化趋势

Fig. 2 Annual cost of ACMCC while the conductor price fluctuated

### 2.7 节材方案比选总结

由上述分析可知, 与推荐的四分裂铝包钢芯铝绞线 JL/LB1A-500/45 方案相比:

1) 碳纤维复合芯绞线 JLRX1/JF1-400/35 和 JLRX1/JF1-300/40 方案由于荷载较小, 可分别降低塔重约 12% 和 16%、降低基础砼约 11% 和 13%; 但导线价格较贵、其导线投资分别为 JL/LB1A-500/45 方案的 1.9 倍和 1.7 倍; 综合本体投资分别增加 4.1% 和减少 0.8%。

2) JLRX1/JF1-400/35 和 JLRX1/JF1-300/40 方案的电能损耗分别增加约 20% 和 59%, 综合考虑初期投资、电能损耗费用和资金利息, 两方案运行期内折算年费用分别增加 2.84 万元/km 和 3.79 万元/km。

3) 当 JLRX1/JF1-400/35 和 JLRX1/JF1-300/40 的导线价格分别降至 32.0 元/m 和 23.3 元/m 以下时, 该两方案才具备经济可比性。即单位长度价格相当于 JL/LB1A-500/45 的 1.35 倍和 0.98 倍; 与目前价格相比, 则需分别降低约 29% 和 43%。

## 3 节能方案比选

### 3.1 线路模型

为分析碳纤维复合芯导线在节能方面的技术经济性, 对表 1 线路模型的系统条件按燃煤火电厂的参数进行调整, 如表 10 所示。

### 3.2 比选导线参数

推荐的铝包钢芯铝绞线 JL/LB1A-500/45 和按等截面、等外径原则拟定的比选绞合型碳纤维复合芯导线 JLRX1/JF1-500/40、JLRX1/JF1-600/45

的参数如表 11 所示。

表 10 系统条件

Tab. 10 System conditions

参数	数值
事故每回极限输送功率/ MW	3 000
额定每回输送功率/ MW	1 500
功率因素	0.95
年最大负荷利用小时数/ h	4 500
年最大负荷损耗小时数/ h	2 700

表 11 导线参数

Tab. 11 Parameters of different conductors

导线	JL/LB1A - 500/45	JLRX1/JF1 - 500/40	JLRX1/JF1 - 600/45
铝线/股数 × 单丝直径 /mm	45 × Φ3.60	36 × Φ4.21 *	36 × Φ4.59 *
芯线/股数 × 单丝直径/mm	7 × Φ2.80	7 × Φ2.70	7 × Φ2.90
铝截面/mm <sup>2</sup>	488.58	500.0	595.6
芯截面/mm <sup>2</sup>	43.10	40.08	46.24
总截面/mm <sup>2</sup>	531.68	540.08	641.86
直径/mm	30.0	27.5	30.0
单位质量/(kg/km)	1635.3	1450.1	1725.1
额定拉断力/kN	129.90	112.97	131.41
拉力重量比/km	8.10	7.94	7.77
弹性模量/GPa	63.7	59.5/115 **	59.3/115 **
线膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> /℃)	20.9	17.9 **	17.9 **
20℃直流电阻/(Ω/km)	0.05745	0.0561	0.0471

注: \* 为梯形型线等效直径; \*\* 斜杠前后数据对应导线拐点前后数值。

### 3.3 导线电气性能

由线路 N-1 事故极限输送容量, 可求得每相子导线允许载流量应不小于 912A。各比选导线的允许载流量计算结果见表 12。JL/LB1A-500/45、JLRX1/JF1-500/40、JLRX1/JF1-600/45 线型的最高设计温度均为 80℃, 相应的线路排位温度取 50℃。

表 12 允许载流量

Tab. 12 Current-carrying capacity of different conductors A

导线	JL/LB1A - 500/45	JLRX1/JF1 - 500/40	JLRX1/JF1 - 600/45
线温 80℃	916	919	1 023

线路输送额定容量时, 各导线的交流电阻和线路电阻损耗功率如表 13 所示。

### 3.4 导线机械性能

各比选导线的定位弧垂、风偏摇摆角、线条荷载分别如表 14~表 16 所示。

表 13 交流电阻和损耗功率

Tab. 13 AC resistance and energy loss of different conductors

导线	JL/LB1A - 500/45	JLRX1/JF1 - 500/40	JLRX1/JF1 - 600/45
运行温度/℃	42.0	41.6	40.6
交流电阻/(Ω/km)	0.0647	0.0620	0.0522
损耗功率/ (kW/km)	322.6 (100.0%)	309.1 (95.8%)	260.3 (80.7%)

表 14 定位弧垂

Tab. 14 Design sag of different conductors m

导线	JL/LB1A - 500/45	JLRX1/JF1 - 500/40	JLRX1/JF1 - 600/45
定位温度/℃	50	50	50
档距 $l=400$ m	11.79	11.81(+0.02)	12.04(+0.24)
$l=450$ m	14.62	14.67(+0.05)	14.96(+0.34)
$l=500$ m	17.75	17.86(+0.11)	18.22(+0.47)

表 15 风偏摇摆角

Tab. 15 Swing angle of different conductors (°)

导线	JL/LB1A - 500/45	JLRX1/JF1 - 500/40	JLRX1/JF1 - 600/45
工频大风	60.6	61.4	58.8
操作过电压	32.0	32.6	30.4
雷电过电压	10.1	10.3	9.5

表 16 线条荷载

Tab. 16 Mechanical load of different conductors

导线	JL/LB1A - 500/45	JLRX1/JF1 - 500/40	JLRX1/JF1 - 600/45
水平荷载/ (N/m)	22.27 (100.0%)	20.41 (91.7%)	22.27 (100.0%)
垂直荷载/ (N/m)	16.04 (100.0%)	14.22 (88.7%)	16.92 (105.5%)
纵向张 力/kN	49.36 (100.0%)	42.93 (87.0%)	49.94 (101.2%)

### 3.5 导线经济性

综合导线、铁塔、基础、绝缘子、金具等因素，各导线方案的主要技术指标和本体投资差异及运行期折算年费用如表 17 和表 18 所示。

表 17 主要技术指标

Tab. 17 Main technical indicators of different conductors

导线	JL/LB1A - 500/45	JLRX1/JF1 - 500/40	JLRX1/JF1 - 600/45
导线/(t/km)	41.16	36.50	43.42
塔材/(t/km)	181.2	170.8	181.8
基础砼/ (m <sup>3</sup> /km)	320.5	303.3	321.7
基础钢筋/ (t/km)	27.5	26.0	27.6

表 18 体投资比较

Tab. 18 Economy comparison of different conductors

导线	JL/LB1A - 500/45	JLRX1/JF1 - 500/40	JLRX1/JF1 - 600/45
导线单价/(元/m)	23.71	54.43	64.13
导线/(万元/km)	59.68	136.99	161.4
塔材/(万元/km)	144.96	136.64	145.44
基础/(万元/km)	55.04	52.46	55.22
本体/ (万元/km)	423.3 (100.0%)	485.5 (114.7%)	529.4 (125.1%)
年费用/ (万元·km <sup>-1</sup> ·年 <sup>-1</sup> )	75.69 (基准)	79.43 (3.73)	77.27 (1.58)

注: JL/LB1A-500/45 导线单价 1.45 万元/t。

### 3.6 敏感性分析

对碳纤维复合芯导线的价格进行敏感性分析, JLRX1/JF1-500/40 和 JLRX1/JF1-600/45 方案的年费用随其导线价格波动的变化趋势如图 3 所示。

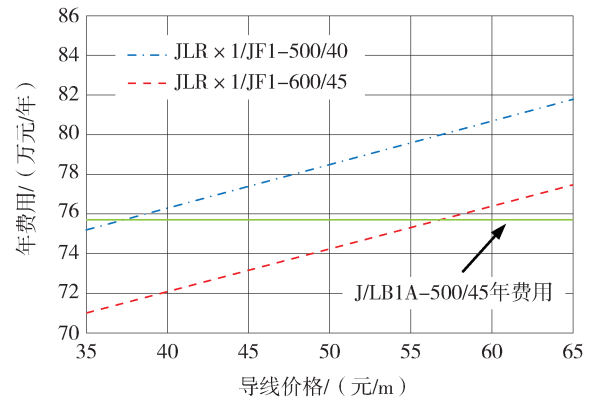


图 3 年费用随导线价格波动变化趋势

Fig. 3 Annual cost of ACMCC while the conductor price fluctuated

由表 13 可知, 等截面和等外径碳纤维复合芯导线均具有节能效果, 且节能总量随线路年最大负荷利用小时数的升高而增大。故对线路负荷利用小时数进行敏感性分析, 计算 JLRX1/JF1-500/40、JLRX1/JF1-600/45 与 JL/LB1A-500/45 方案年费用相等时的单位长度导线价格倍数, 如图 4 所示。

### 3.7 节能方案比选总结

由上述分析可知, 与推荐的四分裂铝包钢芯铝绞线 JL/LB1A-500/45 方案相比:

1) 碳纤维复合芯绞线 JLRX1/JF1-500/40 方案由于荷载较小, 可降低塔重约 6%、降低基础砼约 5%; JLRX1/JF1-600/45 方案的荷载基本相当, 故各指标量均相近。但导线价格较贵、其导线投资

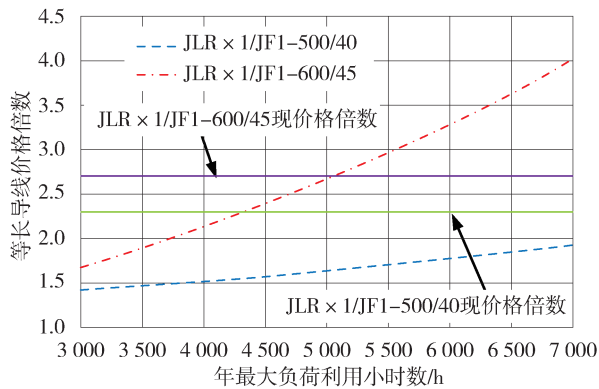


图4 等年费用导线价格倍数随负荷利用小时数变化趋势  
Fig. 4 Boundary price of ACMCC while the load fluctuated

分别为 JL/LB1A-500/45 方案的 2.3 倍和 2.7 倍, 综合本体投资分别增加约 15% 和 25%。

2) JLRX1/JF1-500/40 和 JLRX1/JF1-600/45 方案分别减少电能损耗约 4.2% 和 19%, 综合考虑初期投资、电能损耗费用和资金利息, 两方案运行期内折算年费用分别增加 3.74 万元/km 和 1.58 万元/km。

3) 当 JLRX1/JF1-500/40 和 JLRX1/JF1-600/45 的导线价格分别降至 37.2 元/m 和 56.9 元/m 以下, 该两方案才具备经济可比性。即单位长度价格相当于 JL/LB1A-500/45 的 1.57 倍和 2.40 倍; 与目前价格相比, 则需分别降低约 32% 和 11%。

4) JLRX1/JF1-600/45 方案的节能效果显著, 当线路最大负荷利用小时数在 5 000 h 以上时, 将逐渐凸显节能的经济优势; 且线路负荷越重, 节能总量越大, 方案经济性越优。

## 4 结论

1) 绞合型碳纤维复合芯软铝绞线目前的价格较高, 其在新建线路中的应用仍有一定的局限性。

2) 等外径的碳纤维复合芯导线节能效果显著, 当线路年最大负荷利用小时数较高 (>5 000 h) 时, 已逐渐凸显节能的经济优势。当导线价格下降 15% 以上时, 负荷利用小时数较高 (4 000 ~ 5 000 h) 的火电送出线路采用该导线方案, 将具有较好的经济性。

3) 当导线的价格下降 30% 以上时, 水电或风电送出等负荷利用小时数较低 (<2 000 h) 的特殊线路采用小截面碳纤维复合芯导线方案、火电送出或电

网联络线等负荷利用小时数较高 (3 000 ~ 4 000 h) 的线路采用等截面碳纤维复合芯导线方案, 将都具有一定的经济可比性。

4) 需要指出的是, 新技术、新材料的应用, 一方面可以带来一定的经济效益, 另一方面也能促进生产技术的进步、甚至带动产业链的发展, 具有不可忽视的社会效益。因此, 对绞合型碳纤维复合芯软铝绞线的应用研究应不遗余力。

## 参考文献:

- [1] 杨宁. ACCC 碳纤维复合芯导线技术在我国的应用前景分析 [J]. 电气应用, 2008, 27(5): 50-52.  
YANG N. Analysis of application prospect of aluminum conductor composite core in China [J]. Electrical Application, 2008, 27(5): 50-52.
- [2] 方健银, 张开拓. 绞合型碳纤维复合芯软型铝绞线及其应用 [J]. 电世界, 2014, 55(9): 1-4.  
FANG J Y, ZHANG K T. Application of annealed aluminium conductor multi-strand carbon-fiber core cable [J]. Electrical World, 2014, 55(9): 1-4.
- [3] 李瑞, 余虹云, 余长水, 等. ACCC 导线芯棒高温“竹节”现象浅析 [J]. 电力建设, 2008, 29(6): 22-25.  
LI R, YU H Y, YU C S, et al. Discussion on the “Bamboo Knot” phenomena of ACCC cable core under high temperature [J]. Electric Power Construction, 2008, 29(6): 22-25.
- [4] 国家电网公司. 碳纤维复合芯架空导线施工工艺及验收导则: Q/GDW 388-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [5] 吴雄文, 陈创, 陈泽师, 等. 绞合型碳纤维芯导线的性能及施工工艺研究 [J]. 中国电机(技术版), 2014(4): 58-61.  
WU X W, CHEN C, CHEN Z S, et al. Research of characteristic and construction technology of hinged type carbon fiber core line [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2014(4): 58-61.
- [6] 中国住房和城乡建设部. 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.
- [7] 麻闽政, 潘春平. 铝包钢芯高导铝绞线的技术特点及应用研究 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(4): 47-53.  
MA M Z, PAN C P. Characteristics and application research of high conductivity aluminum conductor aluminum-clad steel reinforced cable [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(4): 47-53.
- [8] 国家能源局. 输变电工程经济评价导则: DL/T 5438-2009 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.  
China National Energy Administration. Economic evaluation guidelines for transmission & substation project: DL/T 5438-2009 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [9] 国家发展改革委. 关于降低燃煤发电上网电价和一般工商业用电价格的通知 [EB]. 发改价格[2015]3105 号. (2015-04-13)[2015-12-31].