

Analysis on Selecting Application of Energy-Saving Conductors in Overhead Transmission Line Construction

Bingran Shao, Zheng Lei, Guoqi Ren, Suna Bai

Economic Research Institute, State Grid Tianjin Electronic Power Company, Tianjin
Email: shaobingran@126.com, charlie123@163.com, jin.liu2@sohu.com

Received: Nov. 28th, 2015; accepted: Dec. 12th, 2015; published: Dec. 16th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Comparing with common aluminium conductor steel reinforced (ACSR) with equal outside diameter, the DC resistance of energy-saving conductor is lower, so applying it in transmission lines can enhance conductivity and decrease line losses. This paper introduces electrical characteristics, mechanical characteristics, construction installation, line's cost analysis as well as annual cost, and other conditions of the energy-saving conductor and common aluminium conductor steel reinforced. A general method of selecting energy-saving conductors is proposed binding with the project.

Keywords

Transmission Line, Energy-Saving Conductor, Technical and Economic Analysis, Selecting Application

节能导线在架空输电线路工程中选型应用分析

邵冰然, 雷 铮, 任国岐, 白苏娜

国网天津市电力公司经济技术研究院, 天津

Email: shaobingran@126.com, charlie123@163.com, jin.liu2@sohu.com

收稿日期: 2015年11月28日; 录用日期: 2015年12月12日; 发布日期: 2015年12月16日

文章引用: 邵冰然, 雷铮, 任国岐, 白苏娜. 节能导线在架空输电线路工程中选型应用分析[J]. 输配电工程与技术, 2015, 4(4): 103-111. <http://dx.doi.org/10.12677/tdet.2015.44011>

摘要

与等外径的普通钢芯铝绞线相比,节能导线的直流电阻小,可提高导线导电能力,减少输电线路损耗,达到节能效果。分析了节能导线与普通钢芯铝绞线的电气特性、机械特性、施工安装、线路造价分析以及线路年费用等情况,提出了工程中节能导线选型的通用方法。

关键词

输电线路, 节能导线, 技术经济分析, 选型应用

1. 引言

国家电网公司积极落实国务院“十二五”节能减排综合性工作方案,开展“资源节约型、环境友好型,新技术、新材料、新工艺”的“两型三新”输电线路建设,全过程实现节能、节水、节材、节地和环境保护,从而减少工程建设对环境的影响[1][2]。

架线工程的投资约占工程本体投资的三分之一。导线作为传输能量的载体同时也产生输电损耗,在保证输送容量基础上,减少导线的输电损耗是重要的关注课题。

2013年,国家电网公司发布了关于加强输电线路节能导线推广应用工作的通知和应用技术导则,推广的三种节能导线分别是:钢芯高导电率铝绞线、铝合金芯高导电率铝绞线、中强度铝合金绞线。明确在以下工程进行导线比选,推广应用节能导线:

- 1) 110 (66) kV 线路工程:单分裂及以上,子导线截面大于等于 240 mm^2 。
- 2) 220 kV、330 kV 线路工程:双分裂及以上,子导线截面大于等于 400 mm^2 。
- 3) 500 kV 线路工程:四分裂及以上,子导线截面大于等于 500 mm^2 。
- 4) 750 kV 及以上线路工程根据实际情况选择采用。

但是,该导则并没有提出明确的比较选型的依据和原则。相关的科研和设计人员都提出了节能导线的选型分析论文,有的论文侧重经济性分析,采用不同容量不同电价条件下采用全寿命周期进行经济比较[3];还有的论文通过实际工程的经济效益和社会效益,确定了节能导线的使用范围定性分析[4];有的论文在技术分析中提出了不同节能导线由于张力不同,造成杆塔耗钢量差异,并经济性分析中提出节能导线增加投资与节约电能回收年限的比较[5]。有的论文侧重技术分析,根据导线的电气性能和机械特性进行总体比较[6]。本文通过实际工程选型的技术经济分析,得出节能导线选型的通用定量分析方法。

2. 工程概况

本试点线路为天津地区某 220/110 kV 同塔四回线路,路径长约 7.2 千米。沿线地形为平地,交通较便利。

系统额定电压: 220、110 kV;

系统最高运行电压: 252、126 kV;

功率因数: 0.95;

最大负荷利用小时: 5000 小时。

系统正常运行输送功率: 220 kV 正常输送功率为 330.06 MW,系统极限运行输送功率为 450.4 MW; 110 kV 正常输送功率为 82.65 MW,系统极限运行输送功率为 112.6 MW。

本工程设计基本风速为 26.2 m/s, 设计覆冰为 5 mm。本工程其它气象条件与 IV 级典型气象区一致, 本工程气象条件选取结果见表 1。

根据选定的路径方案及沿线地形、气象条件, 综合分析比较本工程选用 2011 年新修编《国家电网公司 220 kV 输电线路铁塔通用设计》2/1I1 模块铁塔。

3. 导线结构及型号选择

3.1. 导线截面的选择

导线的截面由系统专业提资, 根据系统正常运行输送功率进行导线选择, 并按系统极限输送功率进行校验。本工程 220 kV 导线选择截面为 $2 \times 400 \text{ mm}^2$, 110 kV 导线截面为 $1 \times 400 \text{ mm}^2$ 。

3.2. 导线分裂间距的选择

220 千伏导线采用双分裂导线, 分裂间距应考虑导线表面电位梯度和次档距振荡, 根据导线表面电位梯度, 子导线分裂间距为导线直径的 11~20 倍比较合适。据国际大电网会议所作的国际咨询, 为有效降低尾流效应, 减小次档距振荡, 分裂间距 D 和子导线直径 d 的比值 D/d 不宜小于 12~13。本工程各种子导线直径均为 26.8, 导线分裂间距取 400 mm, 分裂间距与 $D/d = 14.93$ 。

3.3. 导线型号的选择

在本工程 220 kV 及 110 kV 均采用 400 mm^2 截面规格导线的前提下, 结合本工程的地形和气象条件, 以及国内线路工程中导线的使用情况, 本工程共选择了四种 400 mm^2 截面导线进行比较。普通钢芯铝绞线 JL/G1A-400/35、高导电率钢芯铝绞线 JL4/G1A-400/35 (IACS: 63%)、铝合金芯高导电率铝绞线 JL3/LHA2-210/220 (IACS: 62.5%) 和中强度铝合金绞线 JLHA3-425 四种导线进行比较。各种导线的主要技术参数见表 2。

4. 导线电气性能比选

4.1. 导线载流量的选择

计算中环境温度为最高气温月的平均气温。经查天津地区最热月(7 月)平均最高气温多年平均值为 31.2°C , 本工程计算取最热月(7 月)平均最高气温 35°C 。日照强度 1000 w/m^2 , 垂直风速 0.5 m/s, 导线表面辐射、散热系数均取 0.9, 根据《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》(GB50545-2010)条文说明 5.0.6 公式计算。各种导线载流量和输送功率见表 3。

从表中可看出, 当导线允许温度从 $+70^\circ\text{C}$ 升至 $+80^\circ\text{C}$, 导线载流量平均提高约 1.22 倍。在导线运行温度为 $+70^\circ\text{C}$ 情况下, 参加比选的四种种导线均能满足系统要求。故本工程导线允许载流量均按 $+70^\circ\text{C}$ 控制, 不再考虑 $+80^\circ\text{C}$ 情况。在同样满足系统极限输送容量的前提下, 各种导线运行温度有所差异。同时各种导线的载流量和极限输送功率有所差别, 节能导线要比普通导线平均高出 2.99%。

综合比较三种节能导线, 中强度铝合金绞线 JLHA3-425 相对最优, 铝合金芯高导电率铝绞线 JL3/LHA2-210/220 次之, 高导电率钢芯铝绞线 JL4/G1A-400/35 相对最差。

4.2. 交流电阻损失比较

双回交流输电线路的电阻热损失为:

$$W_Q = 6NI^2r_e \quad (1)$$

式中: W_Q 是功率热损耗(MW/km); N 为分裂根数; I 为额定工作电流(A); r_e 交流电阻。

Table 1. Weather conditions for transmission lines
表 1. 线路工程的设计气象条件取值表

项目	气象条件		
	气温 °C	风速 m/s	冰厚 mm
最高气温	+40	0	0
最低气温	-20	0	0
年平均气温	+10	0	0
基本风速(10 m 高, 30 年一遇)	-5	26.2	0
覆冰	-5	10	5
大气过电压(无风)	+15	0	0
大气过电压(有风)	+15	10	0
操作过电压	+10	15	0
安装情况	-10	10	0
冰的比重		0.90 g/cm ³	
年平均雷暴日		40 日/年	

Table 2. Technical parameters of three energy-saving conductors
表 2. 导线型号及技术参数表

导线型号		JL/G1A-400/35	JL4/G1A-400/35	JL3/LHA2-210/220	JLHA3-425
根 × 直径 (mm)	钢	7/2.50	7/2.50	19/3.83	-
	铝(铝合金)	48/3.22	48/3.22	18/3.83	37/3.83
截面积 (mm ²)	钢/铝(铝合金)	34.36/390.88	34.36/390.88	207.38/218.9	0/426.28
	总截面	425.24	425.24	426.28	426.28
	铝钢截面比	11.376	11.376	1.056	1
	直径(mm)	26.8	26.8	26.81	26.81
	单位质量(kg/m)	1.3487	1.3473	1.1781	1.1782
	计算拉断力(kN)	103.67	103.67	94.53	102.31
	20°C 直流电阻(Ω/km)	0.0739	0.0716	0.0718	0.0707

Table 3. Current carrying capacity & transmission capacity of conductors
表 3. 各种导线载流量和输送功率

导线型号		JL/G1A-400/35	JL4/G1A-400/35	JL3/LHA2-210/220	JLHA3-425
允许电流 (A/相)	+70°C	654.44	662.75	679.66	682.08
	+80°C	797.93	808.20	830.35	833.31
110 kV 输送功率 (MW/回)	+70°C	118.45	119.98	123.01	123.45
	+80°C	144.42	146.28	150.29	150.82
220 kV 输送功率 (MW/回)	+70°C	473.8	479.92	492.04	493.8
	+80°C	577.68	585.12	601.16	603.28

计算可得在相同输送功率下,各种导线的电阻热损失按照:普通钢芯铝绞线、高导电率钢芯铝绞线、铝合金芯高导电率铝绞线和中强度铝合金绞线的顺序递减。节能导线较普通导线节能效果较好,故其电阻损失最少,在输送功率较大的线路其节能效益更明显。

5. 导线机械性能比选

5.1. 导线弧垂

导线的弧垂特性与导线的计算拉断力、铝钢截面比、自重等线材特性密切相关。结合工程实际定位情况,通过使用五种不同导线对本工程新建线路分别进行排杆定位,如表4可得出以下结论:中强度铝合金绞线 JLHA3-425 弧垂特性最优, JL3/LHA2-210/220 弧垂特性次之。普通钢芯铝绞线 JL/G1A-400/35 和高导电率钢芯铝绞线 JL4/G1A-400/35 弧垂特性基本一致。总的来说,中强度铝合金绞线优于铝合金芯高导电率铝绞线优于钢芯铝绞线。因弧垂特性差异,在杆塔耗量指标方面三种钢芯铝绞线最高,铝合金芯高导电率铝绞线耗量居中,中强度铝合金绞线最低。

5.2. 导线过载能力

各导线过载能力见表5,覆冰验算的气象条件为:气温 -5°C 、风速 10 m/s。

本工程线路设计覆冰厚度为 5 mm 时,表中六种导线的过载允许覆冰厚度均超过 20 mm,能够满足覆冰过载要求,且有较大裕度。

中强度铝合金绞线 JLHA3-425 导线单位重量轻、导线张力只相对钢芯铝绞线系列略小,因此从表5可看出:导线过载冰厚特性在六种导线中相对最好。普通钢芯铝绞线 JL/G1A-400/35 仅次于中强度铝合金绞线,居于第二位。高导电率钢芯铝绞线过载能力居于第三位。铝合金芯高导电率铝绞线的过载能力在四种导线中相对最差。

Table 4. Sag & tower weight of conductors at 40°C

表 4. 导线在 $+40^{\circ}\text{C}$ 下弧垂及杆塔重量

导线型号		JL/G1A-400/35	JL4/G1A-400/35	JL3/LHA2-210/220	JLHA3-425
+40℃弧垂 320 m	弧垂(m)	8.11	8.11	7.98	7.49
	差比(%)	0	0	-1.6	-7.6
+40℃弧垂 370 m	弧垂(m)	10.52	10.51	10.30	9.67
	差比(%)	0	-0.10	-2.09	-8.08
+40℃弧垂 410 m	弧垂(m)	12.67	12.66	12.38	11.60
	差比(%)	0	-0.08	-2.29	-8.45
杆塔总重量(kg)		512,225	512,225	510,575	509,585
杆塔单公里指标(kg/km)		124,933	124,933	124,530	124,289
塔重百分比(%)		100	100	99.67	99.48

Table 5. Icing overload capacity of conductors

表 5. 导线过载冰厚

导线型号		JL/G1A-400/35	JL4/G1A-400/35	JL3/LHA2-210/220	JLHA3-425
过载覆冰能力 (mm)	300 m	27.40	27.36	26.55	29.46
	400 m	24.18	24.15	23.86	25.27
	500 m	22.42	22.35	21.73	22.83

5.3. 导线的耐张串强度选择

随着导线铝钢截面比的变化，自重、张力及绝缘子串的受力随之发生变化。不同导线结构的耐张串安全系数不同。通过计算可得，中强度铝合金绞线 JLHA3-425 拉重比最大，铝合金芯高导电率铝绞线 JL3/LHA2-210/220 拉重比次之。普通钢芯铝绞线 JL/G1A-400/35 和高导电率钢芯铝绞线 JL4/G1A-400/35 相对最小。节能导线具有良好的拉重比特性，在杆塔结构设计中较普通导线有明显优势。在本工程使用条件下，4 种导线结构 220 kV 采用 2×120 kN 耐张串、110 kV 采用单联 120 kN 即可满足要求。

5.4. 导线对杆塔荷载的影响

各种导线结构的每相荷载见表 6。

从表 6 可看出：两种钢芯铝绞线水平荷载、垂直荷载相同；铝合金芯高导电率铝绞线和中强度铝合金绞线水平荷载、垂直荷载相同；均大于三种钢芯铝绞线。

5.5. 导线对杆塔荷载的影响

两种钢芯铝绞线风偏角相对较小，相互之间基本无差别。高导电率钢芯铝绞线以及中强度铝合金绞线风偏角相对较大，相互间差异很小。四种导线风偏角均能满足国网通用设计 2/111 模块铁塔风偏角使用条件要求。

6. 线路造价分析

在同一设计条件下，由于导线机械特性、材质各异，除导线本身的成本外，每公里线路杆塔基数、单位钢耗量、绝缘子和附加金具的种类也略有差异，因而六种导线结构的静态投资是不一样的。

6.1. 导线用量计算

根据目前导线的市场报价，各种导线结构的每公里材料量及差价列于表 7。

从表 7 可以看出，同普通钢芯铝绞线相比，节能导线费用均较高。综合考虑各种节能导线自重及单价的差异，铝合金芯高导电率铝绞线 JL3/LHA2-210/220 费用相对最低。中强度铝合金绞线 JLHA3-425 再次之。高导电率钢芯铝绞线 JL4/G1A-400/35 相对最高。

6.2. 杆塔耗钢量比较

直线塔耗钢量主要与导线水平荷载、横担长度及导线弧垂有关，而耐张塔耗钢量主要与导线张力、水平荷载有关，垂直荷载对塔重的影响不大。通过对四种不同导线结构综合分析，两种钢芯铝绞线的机械特性基本一致，故其耗钢量相等。

两种铝合金芯高导电率铝绞线自重最轻，弧垂较钢芯铝绞线小，通过排杆定位耗钢量有所减少。中强度全铝合金绞线 JLHA3-425 的自重只是略大于两种铝合金芯高导电率铝绞线，导线弧垂特性最优；排杆定位后可知耗钢量最小(表 8)。

7. 年费用计算

考虑本工程的远景规划，随着输送功率的增加，导线的电阻损耗随之增加。为了进一步比较不同导线结构，对不同导线在不同输送功率下的年费用进行了计算。

年费用法能反映工程投资的合理性、经济性。年费用包含初次年费用、年运行维护费用、电能损耗费用及资金的利息。将各比较方案按照资金的时间价值折算到某基准年的总费用平均分布到项目运行期的各年，年费用低的方案在经济上最优。

Table 6. Phase load of conductors
表 6. 导线的每相荷载(kN)

导线类型		普通导线		节能导线	
导线型号		JL/G1A-400/35	JL4/G1A-400/35	JL3/LHA2-210/220	JLHA3-425
使用张力	最大荷载	39.40	39.40	35.92	38.88
	平均温度	24.62	24.62	22.45	24.30
水平荷重	350	6.35	6.35	5.94	5.94
	450	8.16	8.16	7.64	7.64
垂直荷重	400	7.05	7.05	6.39	6.39
	550	9.69	9.69	8.79	8.79

Table 7. Material usage & cost of conductors
表 7. 导线材料量和费用

类型	普通导线		节能导线	
型号	JL/G1A-400/35	JL4/G1A-400/35	JL3/LHA2-210/220	JLHA3-425
导线自重(t/km)	1.3487	1.3473	1.1781	1.1782
导线总重(t/km)	26.049	26.022	22.754	22.756
单价(万元/t)	1.721	1.904	2.114	2.120
导线费用(万元/km)	44.830	49.545	48.102	48.242
差价(万元/km)	0(基准)	4.715	3.272	3.412

Table 8. Steel consumption of tower
表 8. 杆塔耗钢量

导线类型	普通导线		节能导线	
导线型号	JL/G1A-400/35	JL4/G1A-400/35	JL3/LHA2-210/220	JLHA3-425
用钢量(t/km)	124.933	124.933	124.53	124.28
单价(万元/t)	0.84	0.84	0.84	0.84
费用(万元/km)	104.944	104.944	104.606	104.40
差价(万元/km)	0(基准)	0	-0.338	-0.541

折算到工程投运年的总投资:

$$NF = Z \cdot \left[\frac{r_0 \cdot (1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + \mu \quad (2)$$

式中: NF 是年平均费用(万元); n 为工程使用年限; Z 是折算后的工程总投资(万元)。

$$Z = \sum_{t=1}^m Z_t \cdot (1+r_0)^{m+1-t} \quad (3)$$

式中: t 是从开工这一年起至计算年的年数; m 为工程施工年数; Z_t 是第年的建设投资(万元); r_0 是电力工业投资回收率; u_t 是运行费用(万元)。

$$\mu = \frac{r_0 \cdot (1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \left[\sum_{t=t_0}^m u_t \cdot (1+r_0)^{m-t} + \sum_{t=m+1}^{t=m+n} u_t \cdot \frac{1}{(1+r_0)^{t-m}} \right] \quad (4)$$

式中： t_0 是工程部分投产的年份； m 为工程施工年数； μ 是折算年运行费用(万元)。

根据本工程的实际情况，进行最小年费用计算条件如下：

- 1) 经济使用年限为 40 年，施工期按 2 年计，前一年投资为 60%，后一年投资为 40%。
- 2) 年最大损耗小时数按 3200 h 计。
- 3) 设备运行维护费率为 1.4%。
- 4) 电力工程回收率按工程投资的 8% 计。
- 5) 电价按当地实际上网电价计。

计算结果如表 9。

8. 结论

8.1. 电气性能

1) 同截面的各种导线的载流量和允许输送功率基本相当，均可满足本工程的要求。

2) 五种节能导线均较普通钢芯铝绞线电阻热损失少，故节能效果显著。节能导线之间相比，中强度铝合金绞线 JLHA3-425 节能效果最佳、铝合金芯高导电率铝绞线 JL3/LHA2-210/220 次之；高导电率钢芯铝绞线 JL3/G1A-400/35-48/7 相对最差。

在电气性能方面，4 种导线的优先顺序如下：中强度铝合金绞线 JLHA3-425、铝合金芯高导电率铝绞线 JL3/LHA2-210/220、高导电率钢芯铝绞线 JL3/G1A-400/35-48/7、普通导线 JL/G1A-400/35。

8.2. 机械性能

1) 中强度铝合金绞线 JLHA3-425 弧垂特性最优。铝合金芯高导电率铝绞线 JL3/LHA2-210/220 弧垂特性位置居中。普通钢芯铝绞线 JL/G1A-400/35 和高导电率钢芯铝绞线 JL4/G1A-400/35 弧垂特性基本一致，相对最差。

Table 9. Annual expense of conductors

表 9. 导线的年费用

导线类型	普通导线		节能导线	
	JL/G1A-400/35	JL4/G1A-400/35	JL3/LHA2-210/220	JLHA3-425
静态投资 (万元/km)	511.89	516.61	514.82	514.75
前一年投资 (万元/km)	358.24	361.54	360.29	360.24
后一年投资 (万元/km)	221.14	223.18	222.40	222.37
折算总投资 (万元/km)	579.38	584.72	582.69	582.61
维修费用 (万元/km)	133.322	76.195	75.695	70.532
当地上网电价 (元/kW·h)			0.4496	
正常输送功率下的年费用 (万元/km)	204.75	202.35	199.45	198.95

2) 中强度铝合金绞线 JLHA3-425 导线过载能力在四种导线中相对最好。普通钢芯铝绞线 JL/G1A-400/35 仅次于中强度铝合金绞线,居于第二位。高导电率钢芯铝绞线过载能力一致,居于第三位。铝合金芯高导电率铝绞线过载能力相同,在四种导线中相对最差。

3) 节能导线具有良好的拉重比特性,在杆塔结构设计中较普通钢芯铝绞线有明显优势。在本工程使用条件下,4种导线结构 220 kV 采用 2×120 kN 耐张串、110 kV 采用单联 120 kN 即可满足要求。

4) 两种钢芯铝绞线水平荷载、垂直荷载相同;铝合金芯高导电率铝绞线和中强度铝合金绞线水平荷载、垂直荷载相同;均大于三种钢芯铝绞线。

5) 两种钢芯铝绞线风偏角相对较小,相互之间基本无差别。高导电率钢芯铝绞线以及中强度铝合金绞线风偏角相对较大,相互间差异很小。三种导线风偏角均能满足国网通用设计 1E6 模块铁塔风偏角使用条件要求。

在机械性能方面,4种导线的优先顺序如下:中强度铝合金绞线 JLHA3-425、普通导线 JL/G1A-400/35、高导电率钢芯铝绞线 JL3/G1A-400/35-48/7、铝合金芯高导电率铝绞线 JL3/LHA2-210/220。

8.3. 年费用法

1) 参与比选的三种节能导线的节能效果良好,其年费用相对普通钢芯铝绞线具有明显的优势。

2) 在正常输送功率下,当年最大损耗小时数为 3200 h、电力工程回收率为 8%、使用年限 40 年前提下,年费用按照:普通钢芯铝绞线 JL/G1A-400/35、高导电率钢芯铝绞线 JL4/G1A-400/35、铝合金芯高导电率铝绞线 JL3/LHA2-210/220 和中强度铝合金绞线 JLHA3-425 的顺序递减。

8.4. 结论

本工程所在地区地形为平地,海拔高度不超过 100 m;同时属于轻冰区。考虑到中强度铝合金绞线 JLHA3-425 机械性能较好,适合应用于本地区电力工程中。同时,该类导线电气性能较好,年费用最小;从经济性考虑,本工程推荐采用该类导线。

参考文献 (References)

- [1] 郭目彩. 加快电网建设新技术推广应用的研究与建议[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 23-29.
- [2] 黄伟忠, 叶鸿声. 耐热铝合金导线在 500 kV 交流输电线路中的应用[R]. 上海: 华东电力设计院, 2004.
- [3] 赵丽媛. 节能导线在输电线路工程中的经济效益分析[J]. 价值工程, 2012, 27(2): 130-131.
- [4] 张广玉, 等. 节能导线选型边界条件的选择[J]. 吉林电力, 2014, 42(2): 31-33.
- [5] 黄彭等. 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.
- [6] 赵建宇. 节能导线选型应用[J]. 电气应用, 2013(S1): 384-390.