

基于年费用法的输电电缆选型研究

向宇¹, 罗楚军¹, 李健¹, 岳浩¹, 刘文勋¹, 刘鹏²

(1. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071;

2. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430071)

摘要:输电电缆具有不受自然条件影响、利于城市美观、输电安全性高维护成本小等优点,逐渐成为替代城市架空线路的优选方案。然而,在电缆规划选型时,传统规划仅考虑电缆的初始投资成本,对电缆运行期间通风散热费用的考虑较少。针对这一研究不足,提出了考虑年均投资运行维护成本的输电电缆选型方法,对降低电缆工程的综合成本具有重要意义。

关键词:输电电缆;通风散热;电缆选型;年费用法

中图分类号:TM751 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)02-0079-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210217

Study on Transmission Cable Selection Based on Annual Cost Method

Xiang Yu¹, Luo Chujun¹, Li Jian¹, Yue Hao¹, Liu Wenxun¹, Liu Peng²

(1. Central Southern Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group Corporation, Wuhan 430071, Hubei, China; 2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: Transmission cables, which are not affected by natural conditions and good for urban aesthetics, high transmission safety and low maintenance cost, etc., have gradually become the preferred alternative to urban overhead lines. However, traditional planning only considers the initial cost of the cable while selecting cables, less work have taken the cost of ventilation and heat dissipation during the cable operation into account. Aming at this lack of study, the selection method of transmission cable considering the annual investment operation cost is proposed, which is of great significance to reduce the comprehensive cost of cable engineering.

Key words: transmission cable; ventilation and heat dispersion; cable selection; annual cost method

0 引言

随着国民经济的快速发展和电力基础设施建设的提速,在城市电网中,电力电缆的应用越来越广泛^[1]。

与架空导线相比,输电电缆具有以下优点:1)节约地上空间,可以敷设在多种复杂地下环境中,便于缩短线路走廊长度;2)输电安全性高,人身触电的可能性较小;3)因外界扰动引起的相间短路和事故率较低;4)利于高电压深入负荷中心,提高

电压质量,减少电能损耗;5)电抗值仅为架空裸导线的三分之一,有助于提高功率因素,增大输送容量;6)维护工作量小,无需频繁检修。因此输电电缆受到了人们的普遍青睐,逐渐成为替代城市架空线路的优选方案^[2-3]。

输电电缆在正常运行环境中的寿命为30年左右。然而,由于电力电缆敷设环境不尽相同,有电缆沟、排管以及隧道等型式,其使用状态会对电缆寿命造成较大影响。电缆投入运行后,虽然正常运行状态下温度的影响不大,但在非正常的过热状态下,电缆绝缘老化的速度非常快^[4-6]。由于实际输配电负

荷并不恒定,负荷会不断地调整变化,一旦电缆发生过负荷非正常运行,将会导致导体温度的急剧上升,加速其绝缘老化,甚至发生热击穿。输电电缆一旦发生故障,故障定位十分困难,不仅会浪费大量的人力物力,还会引起较大的间接损失。如果故障得不到及时排除,将会造成严重的经济和社会影响。研究表明,当电缆的运行温度超过其允许值的 8% 时,其寿命将减半;如果超过 15%,电缆寿命仅为设计寿命的 25%^[7]。

随着电缆在输配电领域中的广泛应用,如何保证电缆隧道的可靠通风,提高输电电缆的可靠性和运行寿命,同时降低电缆工程的综合成本,已经成为输电电缆研究的重点方向之一。因此,下面针对电力行业电缆运行期间通风散热费用的研究不足,提出了考虑年均投资运行维护成本的输电电缆选型方法,对降低电缆工程的综合成本具有重要意义。

1 通风散热对电缆载流量的影响

电缆隧道内的通风情况对电缆隧道温度分布和电缆载流量有较大影响。为研究通风速度对电缆导体温度的影响规律,选取典型矩形明挖隧道 2.6 m (宽) × 2.9 m (高),隧道内敷设 6 回电缆,底层为 500 kV 电缆(截面 2500 mm²),中间层 220 kV 电缆(截面 2000 mm²),顶层 110 kV 电缆(截面 1000 mm²)。电缆隧道长度为 1000 m,进风口温度为 30 °C。在隧道入口分别通入 2 m/s、4 m/s、6 m/s、8 m/s 和 10 m/s 的风速,得出不同风速下沿导体轴向的温度分布曲线如图 1 至图 3 所示,电缆载流量随风速的变化规律如图 4 所示。

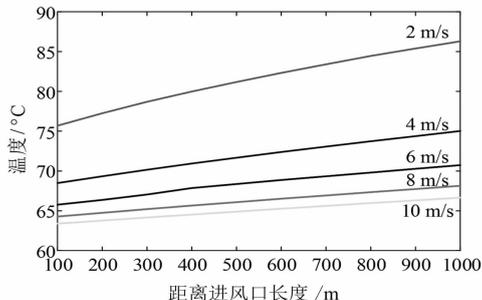


图 1 不同风速下 110 kV 导体纵向温度分布

由图 1 至图 3 导体温度分布结果可知,在电缆隧道通风情况下,离进风口越远,导体的温度越高。随着风速的增加,导体的温度逐渐下降,且开始下降速度较快,然后下降速度变缓。

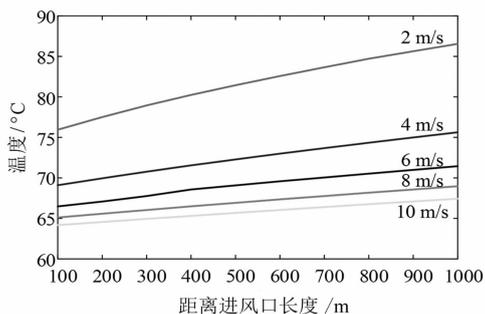


图 2 不同风速下 220 kV 导体纵向温度分布

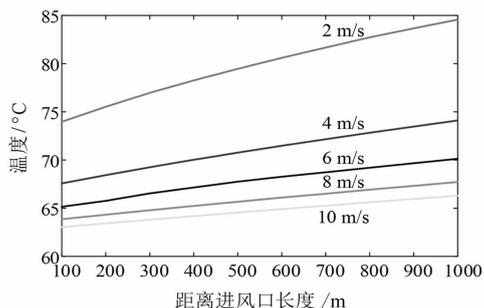


图 3 不同风速下 500 kV 导体纵向温度分布

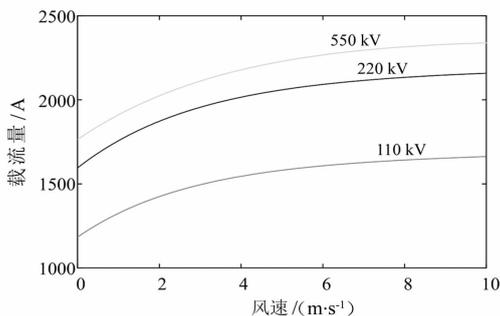


图 4 不同风速下电缆载流量

由图 4 电缆载流量仿真结果可知,随着风速的增加,电缆载流量逐渐升高,但当风速超过一定值时,电缆载流量的变化趋于平稳。当风速为 10 m/s 时,相比静止状态下 110 kV、220 kV、500 kV 电缆载流量分别提升了 467.05 A、549.18 A、573.4 A。由此可知,提高通风风速对电缆载流量有一定提高,但是风速越大,提升效果越不明显。因此,控制风速在 10 m/s 范围内较为合适,风速大于 10 m/s 后,对载流量的提升很微弱。

由上述结果分析可知,通风散热对降低电缆导体温度和提高电缆载流量具有重要意义。因此,在对电缆工程进行投资选择时,必须充分考虑电缆运行期间通风散热费用对整体项目经济性的影响。

2 年均投资运行维护成本计算方法

年费用法作为一种常用的审计投资效益的方

法,能反映工程投资的合理性和经济性。在对项目方案进行审计时,主要是通过计算和分析投资项目的年均成本,实现对投资经济效益的比较评价。收入一定的情况下,投资方案的年均成本越低,该方案的经济效益就越好。电缆项目的年均成本主要包括年均投资成本、年运行维护成本、年电能损耗成本。年均成本的计算方法如下:

$$F_a = \lambda(Z + U) + C_w \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \quad (2)$$

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

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

式中: F_a 为年均费用(平均分布在从 $m+1$ 到 $m+n$ 期间的几年内); λ 为数列求和系数; Z 为工程总投资; U 为运行总费用; C_w 为年电能损耗费用; Z_t 为折算到 t 年的工程投资; r_0 为电力工业投资回收率或称电力工业投资利用率; m 为施工年数; n 为工程使用年限; u_t 为折算到 t 年的运行费用; t 为从工程开工这一年起年份; t' 为工程部分投产的年份。

电缆工程运行期间的费用主要包括电能损耗费用和运行维护费用。电能损耗费用 C_w 主要包括电缆总损耗(含导体损耗、护套损耗和绝缘介质损耗)费用和风机通风散热运行费用。在计算允许范围内,电缆工程的设备运行维护费用可以认为是一个定值。按照线路工程的一般评价方法,年运行维护费用 λU 可按照工程总投资 Z 乘以一定的运行维护费率进行计算。运行维护费率一般取1.4%~1.5%,若取1.4%,则年运行维护费用计算式为

$$\lambda U = 0.14 \times Z \quad (5)$$

3 典型截面电缆经济性对比分析

3.1 一次性投资成本对比

选取典型圆形电缆隧道,隧道内径3 m,隧道通风长度400 m;隧道内敷设220 kV电缆,三相电缆成品字形布置。选取4组不同的电缆截面+通风风速方案组合,进行经济性比选。方案1电缆截面为2500 mm²,风速为2.0 m/s;方案2电缆截面为2000 mm²,风速为4.0 m/s;方案3电缆截面为1800 mm²,风速为5.5 m/s;方案4电缆截面为1600 mm²风速为10.0 m/s。比选方案相关参数如表1所示。

表1 比选方案相关参数

方案参数	方案1	方案2	方案3	方案4
电缆截面/mm ²	2500	2000	1800	1600
风速/(m·s ⁻¹)	2.0	4.0	5.5	10.0
进风温度/℃	40.0	40.0	40.0	40.0
出风温度/℃	46.6	43.7	43.0	41.6
风量/(m ³ ·h ⁻¹)	50 894	101 788	139 958	254 469
载流量/A	1 980.6	1 979.0	1 980.8	1 979.0
单机风量/(m ³ ·h ⁻¹)	14 000	28 000	38 000	44 060
单机功率/kW	2.0	4.0	4.0	4.0
风机数量/台	4	4	4	6

在隧道规模已经确定的情况下,对比不同方案的一次性投资情况,主要包括电缆本体和风机价格。将方案1(电缆截面为2500 mm²、隧道风速为2 m/s)作为基准,4组比选方案的一次性投资差额对比如表2所示。

表2 一次性投资差额对比

对比参数	方案1	方案2	方案3	方案4
电缆截面/mm ²	2500	2000	1800	1600
隧道风速/(m·s ⁻¹)	2	4	5.5	10
通风长度/m	400	400	400	400
单机风量/(m ³ ·h ⁻¹)	14 000	28 000	38 000	44 060
单机功率/kW	2.0	4.0	4.0	4.0
风机数量/台	4	4	4	6
投资差额/万元	0	-39.71	-19.85	-6.41

由表2的对比结果可知,在载流量相近的情况下,电缆截面为2500 mm²方案的一次性投资最大,这主要是由电缆本体造价的差异引起的。而在4种方案中,电缆截面为2000 mm²方案的一次性投资最小。电缆截面为1800 mm²和1600 mm²方案虽然电缆本体造价相对较低,但为了满足载流量要求,隧道的通风风速更大,所需的风机规格更高,因此一次性投资也就随之增加。

3.2 比选方案年均成本对比

为对比不同方案的优劣,在多种电价和最大负荷利用小时情况下,计算比选方案的年均投资运行维护成本。以折现率8%为例,比选方案的年均投资运行维护成本对比结果如表3所示。

由表3不同方案对比结果可知:方案4,即电缆截面为1600 mm²和隧道风速为10 m/s的组合方案仅在最大负荷利用小时数 τ 为2500 h,且电价为0.3元/kWh时年费用最低;其他情况下经济性最优的均为方案3,即电缆截面为1800 mm²和隧道风速为5.5 m/s的组合方案,随着电价的提高和年最大负荷利用小时的增加,该优势越来越明显。

表 3 比选方案的年均投资运行维护成本对比

最大负荷利用小时/h	电价/(元/kWh)	年均投资运行维护成本/万元			
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
2500	0.3	27.78	24.18	21.88	21.75
	0.4	29.22	25.88	23.55	23.62
	0.5	30.66	27.59	25.22	25.48
	0.6	32.10	29.29	26.89	27.35
3000	0.3	28.99	25.61	23.28	23.32
	0.4	30.83	27.79	25.42	25.71
	0.5	32.67	29.97	27.56	28.09
	0.6	37.27	35.43	32.91	34.06
3500	0.3	30.37	27.25	24.89	25.11
	0.4	32.67	29.97	27.56	28.09
	0.5	34.97	32.7	30.23	31.08
	0.6	37.27	35.43	32.91	34.06
4000	0.3	31.75	28.88	26.49	26.9
	0.4	34.51	32.15	29.7	30.48
	0.5	37.27	35.43	32.91	34.06
	0.6	40.03	38.7	36.11	37.64
4500	0.3	33.48	30.93	28.5	29.14
	0.39	36.81	34.88	32.37	33.46
	0.5	40.15	38.83	36.25	37.79
	0.6	43.48	42.79	40.12	42.11

4 结 语

上面针对电缆规划时未考虑运行期间通风散热费用研究的不足,提出了考虑年均投资运行维护成本的输电电缆选型方法。在此基础上,对 4 种电缆截面和通风风速组合方案进行了经济性比选,得出如下结论:

1) 由于不同截面电缆本体造价的不同以及风机价格的影响,电缆截面为 2500 mm² 方案的一次性投资最大,电缆截面为 2000 mm² 方案的一次性投资最小。

2) 在最大负荷利用小时为 2500 h、电价 0.3

(上接第 61 页)

站的安全运行条件,提高了变电站所在地区电网系统的稳定性。

参考文献

- [1] 王中隆. 中国风雪流及其防治研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001.
- [2] 申加峰, 樊晓牧, 李论涛, 等. 变电站风吹雪灾害的研究与防治[J]. 电力勘测设计, 2018, 9(2): 43-53.

元/kWh、电缆截面为 1600 mm² 和隧道风速为 10 m/s 组合方案的经济性较好, 其他情况均为电缆截面为 1800 mm² 和隧道风速为 5.5 m/s 组合方案经济性最好。

3) 对于 220 kV 电缆隧道工程, 每回输送容量为 680 MVA (载流量约为 1980 A) 时, 推荐采用经济性更好的电缆截面为 1800 mm² 和隧道风速为 5.5 m/s 组合设计方案。

参考文献

- [1] 梁永春, 王忠杰, 刘建业, 等. 排管敷设电缆群温度场和载流量数值计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 763-768.
- [2] 杨永明, 程鹏, 陈俊, 等. 考虑空气流场影响的电缆散热研究及其影响因素与经济性分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 50-54.
- [3] 李攀峰, 李春筱, 冯炳. 排管敷设电缆的载流量计算与优化排列[J]. 浙江电力, 2015, 34(12): 19-23.
- [4] 孙仲民, 何正友, 戴铭. 基于灰色预测的电力电缆老化过程预警仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 55-60.
- [5] 刘刚, 张高言, 周凡. 基于等温松弛法的 110 kV 高压电缆老化状况评估[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 497-504.
- [6] 刘刚, 金尚儿, 梁子鹏, 等. 基于等温松弛电流法和活化能法的 110 kV XLPE 电缆老化状态评估[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2531-2540.
- [7] 程博. XLPE 绝缘电缆可靠性与寿命预测算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

作者简介:

向 宇(1988), 男, 硕士, 工程师, 从事输电线路设计工作;
罗楚军(1988), 男, 硕士, 工程师, 从事输电线路设计工作;
李 健(1980), 男, 硕士, 高级工程师, 从事输电线路设计及技术管理工作。

(收稿日期: 2020-10-28)

- [3] 武鹤, 朱光耀, 魏建军, 等. 防雪栅在公路风吹雪雪害防治中的应用[J]. 黑龙江工程学院学报, 2008, 22(1): 23-25.
- [4] 国家电网公司. 330~750 kV 智能变电站通用设计(2018年版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.

作者简介:

谈东林(1980), 男, 工程师, 主要从事电力设计工作。

(收稿日期: 2020-11-12)