

极寒温度下输电线路动态增容运行预测技术的研究

以实测极寒温度下架空输电线路参数为依托,研究了导线自身参数与周围环境气象参数对导线运行温度的影响规律,在此基础上进一步展开研究了导线水平应力、弧垂以及潜在输电容量与运行温度升高后的变化关系。最后,结合实际运行的状态参数,对架空输电线路增容运行后的温度和弧垂进行了预测。

汪鹏¹ 章彬¹ 唐睿² 艾雷鸣²/1. 深圳供电局有限公司 2. 上海海能信息科技有限公司



汪鹏/工程师

关键词/Keywords

输电线路·
动态增容·
载流量·

0 引言

近年来,随着社会经济持续快速增长,用电负荷增长迅速。市场对用电量的需求连年加大,虽然国网公司对电网发展不断做出新的规划,但我国电网输电能力不足的问题仍然日益凸显。在经济发达地区用电高峰期及部分输电线路出现故障的情况下,大部分输电线路都存在输电能力受限的问题,然而建设新的线路走廊则投资巨大、建设周期长。基于此,近几年来输变电线路增容技术已不断得到推广,输变电设备的增容问题得到了广泛关注^[1-5]。

目前,各个国家结合自身所处地理环境以及气候变化的特点,选取适合本国地理与气候特点的单根导线载流量计算边界条件,包括日照强度、风速、环境温度以及导线最大运行温度。对于同一型号的单根架空导线,由于所选边界条件的差异性,各个国家计算的载流量相差较大。我国与IEC标准由于边界条件的不同,导致单根导线载流量相差可

达15%~20%^[6-8]。

实际的架空输电线路运行经验表明,导线稳态热容量极限值是根据最恶劣的气象条件下维持输电线路安全运行确定的,是一种比较保守的估计值。以我国为例,220 kV电压等级的架空输电线路,其导线载流量计算的边界条件为环境温度取40℃,风速0.5 m/s,日照为1 000 W/m²。实际情况中,这些边界条件出现的可能性较小,文献[11]表明,这种计算条件出现的概率约0.02%,由此可知,在此种边界条件下计算得到的导线载流量是一种比较保守的估计值^[9-10]。

1 国内外研究水平综述

通过实时监测线路运行参数以及导线周围气象条件来提高输电线路短时输送能力的动态增容技术,具有不突破现有规程中关与导线最大允许温度的巨大优势,并且能够根据线路运行的实际情况,灵活的提高输电线路的实时输送容量,因此备受国内外学者关注,展开许多相关研究的同时也获得了诸多研究成果^[11-15]。

国外在提高架空线输电线路动态输送容量技术领域的相关研究展开较早,并取得了显著成就。20世纪初,利用实时监测的输电线路状态参数以及实际气象条件,美国电力研究协会(EPRI)成功研发了确定输电线路实时输送容量的架空线路动态容量监测系统(Dynamic Thermal Circuit Rating)^[14-18]。该系统的核心技术是依据现场实测的环境参数和导线温度,利用载流量数学模型获得被

监测架空线路的最大输送电流^[5]。

面对国内电能供需矛盾日益加剧的现状，输电线路动态增容技术不改变架空线路网络结构而增加架空线路短时输送能力的优点，该项技术得到了国内学者、高校以及电力科研单位的广泛关注。各大电网公司、高校就此项技术独立或者相互合作展开了许多研究工作，并获得了一些显著的成果。

2 架空线路载流量和弧垂计算的数学模型

2.1 架空线载流量的计算

尽管考虑不同的影响因素，各国的载流量计算公式具体表达式有所差异，但本质上都是依据导线发热和散热的热平衡方程。尽管普遍采用具有实验基础的英国摩尔根公式来计算导线给定边界条件下的载流量，但是其数学表达式较为复杂。为了能够快速而且不失准确性的获得已知型号导线的最大允许电流，本文综合考虑摩尔根公

式和IEEE 标准中导线载流量数学公式，将二者结合从而获得可以简单快速求取适合目标要求的导线载流量计算公式。

导线材料和几何截面确定后，架空导线载流量的计算公式很多，有日本、苏联、美国及英国等有关部门或人士提供的公式，但其计算原理都是由导线的发热和散热的热平衡推导出来的，热平衡方程式为

$$W_j + W_s = W_r + W_f$$

式中， W_j 为单位长度导线电阻产生的发热功率， W/m ； W_s 为单位长度导线的日照吸热功率， W/m ； W_r 为单位长度导线的辐射散热功率， W/m ； W_f 为单位长度导线的对流散热功率， W/m 。

不同的国家，考虑各自的实际情况选择不同的关于导线载流量的计算公式。载流量公式确定后，所考虑的影响因素和选取的参数对导线载流量的计算影响较大。现将收集到的有关国家载流量计算的参数如下表所示^[4-7]。

表 有关国家载流量计算的参数

国家 条件 边界	英国有关专家建议							
	中国	日本	法国	美国	IEC	冬季	夏季	酷热地区
环境温度/℃	40			20~40	40	5	20	35
风速/(m/s)	0.5	0.5	1.0	0.61	1.0	0.45	0.45	0.22
日照强度(W/m ²)	1 000	1 000	900	1 000	900	850	850	1 050
吸热系数	0.9	0.9	0.5	0.5	0.5	0.9	0.9	0.9
辐射系数	0.9	0.9	0.6	0.5	0.6	0.9	0.9	0.9
导线温度/℃	70	90	85	90	70	15~100	30~120	50~120

2.2 架空线弧垂的计算

架空线是输电网络的主要构成部分。导线弧垂作为架空输电线路设计和安全运行重要的表征参数之一，其大小直接取决于导线的水平应力和比载。实际运行中，架空线的弧垂大小直接影响到输电线路的安全可靠运行。计算弧垂较为常用的方法为抛物线法。

抛物线法也是根据架空线上任意一点的静力平衡原理来计算导线弧垂的数学方法。其计算的依据为：①架空线为悬挂的柔索，且能够承受张力。②架空线的单位载荷沿两端悬挂点的连线均匀分布，如图1所示沿线段AB均匀分布。图中A、B为不等高的两悬挂点，AOB为架空线，P为线上某任一点，O为架空线的最低点，且取O为X-Y直角坐标系的原点。假设架空线单位长度

自重W是线段AB均匀分布的。

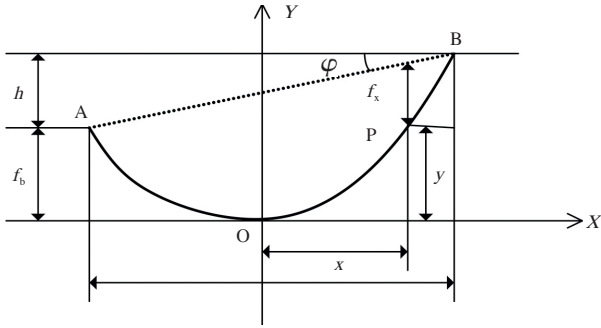


图1 两悬挂点不等高的架空线

根据图1，直角坐标系原点为架空线最低点，通过求解AB连线的直线函数关系式，推算可得距离架空线最低点水平距离x处的线路弧垂为 f_x 为

$$f_x = \frac{l^2 W}{8 H \cos \varphi} - \frac{H \cos \varphi}{2 W} \left(\frac{h}{l} \right)^2 + \frac{h}{l} x - \frac{W}{2 H \cos \varphi} x^2 \quad (1)$$

令 $x=0$ ，从而可得线路最低点的弧垂为

$$f_0 = \frac{l^2 W}{8H \cos \varphi} - \frac{H \cos \varphi}{2W} \left(\frac{h}{l} \right)^2 \quad (2)$$

当A、B两悬挂点等高时，根据导线受力平衡分析可知，线路弧垂的最低点位于档距的中央，此时弧垂

$$f_0 = \frac{l^2 W}{8H} \quad (3)$$

式中， x 代表架空线任意点对其最低点的水平距离， m ； y 代表架空线任意点对其最低点的竖直高度， m ； H 代表最低点的水平张力， N ； W 代表架空线的单位载荷， N/m ； h 代表两悬挂点A、B的高度差， m ； l 代表相邻两杆塔的档距， m 。

3 线路增容运行的预测技术

实际运行的架空线路，由于裸露在自然环境中以及导线中电流因负荷变化而变化，导致导线的温度处于不断的变化中。然而传热学相关理论表明，监测对象的温度是一个缓慢变化的状态变量。将一特点与工程要求相结合，实际运行中导线温度的连续变化进行离散化，假设在一个相对时间段内导线温度认为是恒定值，从而可以实现线路增容运行后的导线温度准确预测。

结合蒙东根河的某条具体线路，线路型号为LGJ300/25，为了能够保证线路增容运行的可靠性和安全性。对该线路处在最寒冷的冬季的线路运行的状态参数和周围气象条件进行了全天24 h的实时监测，监测对象主要包括导线电流、导线温度、环境温度和日照强度。

为了使结果具有实际工程意义，通过仿真计算，对导线每隔10 min进行一次温度预测，具体结果如图2所示。从图2中可以看出，预测温度与导线实测温度有着相同的变化趋势，并且在一些局部的时间段内二者的重合性较好。图3为根据蒙东根河地区最寒冷时已有的导线、环境参数，一天范围内线路运行电流提高不同百分比后导线温度的变化情况。

图3表明，一天内线路当前电流提高2.2、2.5倍时，导线运行30 min最高温度都没有超过70℃，说明在极寒天气下线路具有很大的增容空间。图中曲线有着与实际监测的导线温度有着相同的变化趋势，进一步佐证了仿真计算结果具有

一定的可靠性。

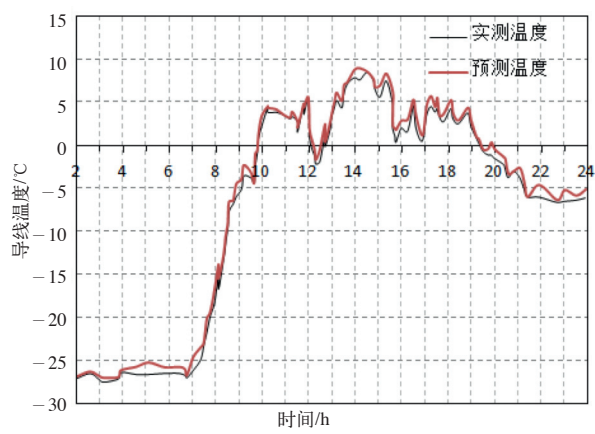


图2 导线一天内温度变化与实测温度变化曲线

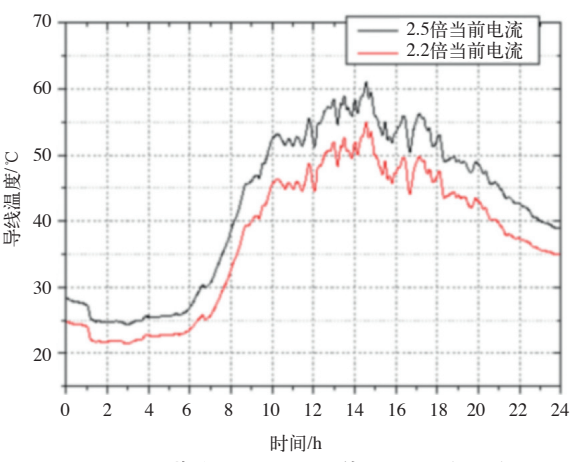


图3 不同载流量下，预测导线30 min运行温度

4 结束语

本文对现行输电线路潜在输送能力进行了定量的分析研究。结合实际亟需提高输送容量的架空线路，分别以架空线能量守恒定律和静力平衡建立了符合目标要求的导线载流量计算数学模型和弧垂计算数学模型。在实时监测蒙东极寒地区输电线路运行状态的基础上，逐个研究了导线温度与各个影响因素之间的变化关系。得出极寒天气下输电线路具有极大地增容潜力和较大的经济及社会价值可以挖掘。

参考文献

[1] 张启平. 输电线路增容技术[M]. 北京：中国电力出版社，2010.
[2] 叶鸿声，龚大伟. 提高导线允许温度的可行性研究和工程实施[J]. 电力建设，2004，9(10): 1-8.
[3] 梁俭. 输电线路增容在线监测在电力系统中的应用

[J]. 广东电力, 2005, 18(8): 34-36.

[4] 任丽佳. 基于导线张力的动态提高输电线路输送容量技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

[5] DL/T5092. 110 kV架空送电线路设计技术规程[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[6] 张启平, 钱之银. 输电线路实时动态增容的可行性研究[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 31-32.

[7] 戴沅, 聂耸, 程养春. 输电线路动态增容载流量计算模型综述[J]. 广东电力, 2012, 25(11): 51-56.

[8] 钱之银. 提高华东电网500 kV输电线路输电容量的研究[J]. 华东电力, 2003(6): 339-341.

[9] Holbert KE, Heydt GT. Prospects for dynamic transmission circuit ratings[J]. In Proceedings IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Sydney, NSW, 2001(3): 205-208.

[10] Adapa R, Douglass DA. Dynamic thermal ratings: Monitors and calculation methods[C]. In Proceedings of the Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa, Durban, South Africa, 2005: 163-167.

[11] Foss SD, Lin SH, Fernandes RA. Dynamic thermal line ratings: Part 1: Dynamic ampacity rating algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1983, 102(6): 1858-1864.

[12] 叶自强, 朱和平. 提高输电线路输送容量的演技[J]. 中国电网技术, 2006, 30(9): 258-263.

[13] 黄新波, 孙钦东. 输电线路实时增容技术的理论计算与应用研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1138-1144.

[14] 廖添泉. 提高输电线路输送容量研究[D]. 成都: 西华大学, 2009.

[15] 杨鹏, 房鑫炎. 采用 DTCR 模型提高输电线路输送容量[J]. 华东电力, 2005, 33(3): 11-14.

[16] 张辉. 运行条件下输电线路热载荷能力研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.

[17] Douglass DA. Field studies of dynamic thermal rating methods for overhead lines[C]. In Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, New Orleans, USA, 1999, 2: 842-851.

[18] 毛先胤. 动态提高输电线路输送容量监测系统及其因更用分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

作者简介

汪鹏 (1985-), 男, 本科, 工程师, 从事变电一次设备工作。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**
(编辑: 崔文静)

(上接第484页)

华中科技大学出版社, 2002.

[2] 戴义平, 赵婷, 高林. 发电机组参与电网一次调频的特性研究[J]. 中国电力, 2006, 39(11): 37-41.

[3] 罗建裕, 王小英, 鲁庭瑞, 等. 基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 78-80.

[4] 郑涛, 高伏英. 基于PMU的机组一次调频特性参数在线监测[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 57-61, 71.

[5] 李端超, 陈实, 陈中元, 等. 发电机组一次调频调节效能实时测定及补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 70-72.

[6] 张艳军, 高凯, 曲祖义. 基于发电机出力曲线特性的一次调频性能评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 99-102.

[7] 齐文斌, 肖晓春, 李东平, 等. 调度中心SCADA与WAMS实时数据的差异. 南方电网技术, 2013, 7(5): 87-90.

作者简介

刘栋 (1983-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电网调度自动化分析与控制技术。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**
(编辑: 崔文静)