

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190296

# 高温天气下架空线路运行温度与弧垂越限预警方法

李明明<sup>1</sup>, 王建<sup>1</sup>, 熊小伏<sup>1</sup>, 冯长有<sup>2</sup>, 马超<sup>2</sup>, 廖峥<sup>3</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 国家电网有限公司国家电力调度控制中心, 北京 100032; 3. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

**摘要:** 由于我国导线长期运行的最高允许温度和杆塔设计时弧垂计算所取的导线温度不一致, 加上运行年限增加导致的蠕变和周围林木植被生长, 夏季高温天气下重载输电线路的导线温升和弧垂越限问题不容忽视。对此, 根据“电流增大→导线温度升高→弧垂增加→导线对跨越物净距减小”的电热耦合过程, 提出了表征输电线路运行安全的温升裕度和净距裕度安全指标。建立了基于实况天气监测和数值天气预报的运行安全指标估计方法, 提出了 $N-1$ 方式下重载输电断面运行温度和弧垂越限预警方法。通过某实际输电线路因温度和弧垂越限导致触树放电的事故反演, 验证了所提方法的可行性和有效性。研究结果有助于电网运行调度人员在夏季高温天气下校核架空线路的安全裕度, 防范因净距不足而发生触树放电和断面潮流转移引起的连锁故障。

**关键词:** 架空线路; 高温天气; 导线温度; 弧垂; 风险预警

## Operating temperature and sag off-limit warning method for overhead transmission lines in the conditions of high-temperature weather

LI Mingming<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, XIONG Xiaofu<sup>1</sup>, FENG Changyou<sup>2</sup>, MA Chao<sup>2</sup>, LIAO Zheng<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Power Dispatching and Control Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China)

**Abstract:** Due to the inconsistency between the maximum allowable conductor temperature for long-term operation and the conductor temperature taken into sag calculation for the tower design, and the influence of creep caused by the increase of operation life as well as the growth of surrounding forest and vegetation, the problem of conductor temperature rise and sag off-limit of the heavy-load transmission line in summer high temperature weather cannot be ignored. For this reason, the safety indexes consist of temperature rise margin and clearance margin that represent the safe operation of transmission lines are proposed according to the electrothermal coupling process of “current increase→conductor temperature rise→sag increase→clearance distance reduce”. The estimation method of safety indexes based on weather monitoring and numerical weather forecasting is established. The operating temperature and sag off-limit warning method of the heavy-load transmission section under the  $N-1$  operation mode is proposed. The feasibility and effectiveness of the proposed method is verified through the accident inversion of a tree-touch fault caused by the temperature and sag off-limit of a transmission line. The results can help power grid operators to check the safety margin of the overhead transmission lines in high-temperature weather of summer and prevent discharge fault caused by tree contact due to the insufficient of insolation clearance and cascading fault inducted by power flow transfer of transmission section.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGSDDK00KJJS1800210) and National Natural Science Foundation of China (No. 51707018).

**Key words:** overhead line; high temperature weather; conductor temperature; sag; risk early warning

## 0 引言

随着社会的不断发展和人民生活水平的日益提

高, 空调、制冷等气象敏感类负荷逐渐加重, 使得夏季时电网常常重负荷甚至超负荷运行<sup>[1]</sup>。架空输电线路承担着电能输送的任务, 是电力系统不可或缺的一环<sup>[2]</sup>。夏季高温天气下, 环境温度高, 风速相对较小, 导线散热差, 在重负荷或潮流转移时, 导线温度和弧垂相应增加, 可能不再满足电网安全

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(SGSDDK00KJJS1800210); 国家自然科学基金项目资助(51707018)

运行要求,存在触树放电等一系列安全隐患,危及电网安全运行和沿线群众生命安全。

夏季高温天气下因导线温度过高或弧垂超限引起的电网故障时有发生。2003年8月14日由于4条345 kV线路分别触树跳闸,美国东北部部分地区以及加拿大东部地区出现了大范围停电<sup>[3]</sup>;2012年7月30日和31日,印度北部和东部地区由于输电设施老化,对跨越物放电等原因连续发生两次大面积停电事故<sup>[4-5]</sup>;2018年7月21日我国西南某双回线路因一回线路过载触树,另一回线路于30 min之后也发生触树放电,导致该断面无法输电。可见,导线运行温度和弧垂超限已成为制约输电线路电能传输和威胁电网安全运行的重要因素之一。

夏季输电线路电流增加,早晚电力负荷波动很大,加之气温和日照随时间变化,一天内导线温度和弧垂也大幅变化。目前而言,电网调度运行关注更多的是线路载流量,一般以导线额定载流量的80%作为重载运行的安全边界。对于重负荷地区,为了缓解输电通道阻塞,也有采用输电线路动态载流量作为安全运行的边界<sup>[6-7]</sup>。但由于动态增容需要沿线测量导线温度或运行气象条件,此技术并未大范围应用<sup>[8-10]</sup>。由于存在“电流增大→导线温度升高→弧垂增加→对被跨越物净距减小”的电热耦合过程,加上我国钢芯铝绞线长期运行最高允许温度(70℃)与杆塔设计时弧垂计算所取的导线温度(40℃)<sup>[11]</sup>不一致,特别是运行年限较长(10年以上)的线路,因蠕变影响,其弧垂大于新架设线路<sup>[12]</sup>,如仅按架设条件校核,则不能满足安全运行条件。

因此架空输电线路的最高允许温度和线路弧垂(或净距)是架空输电线路设计和运行的重要参数和指标。通过监视导线运行温度和弧垂增量<sup>[13-15]</sup>,可以为电网安全运行提供决策依据。然而,由于输电线路长距离分布、穿越多个区域和多种地形,仅通过少量的在线监测装置完整反映输电线路的温度和弧垂状况不大现实。而随着气象科学的发展,实况天气监测和数值天气预报的时空分辨率不断提升,1~10 km空间分辨率、10 min~1 h时间分辨率的气象数据已广泛普及<sup>[16-17]</sup>,因此通过气象监测和输电线路实时电流,动态估计导线运行温度和弧垂增量,校核线路净距,在技术上具有可行性。同时,通过输电线路负荷预测和数值天气预报<sup>[18]</sup>,预测未来短期内导线温度变化,进一步预测弧垂增长,进行输电线路运行风险预警,有助于电网运行和调度决策,预防导线对跨越物放电导致的故障。

关于导线运行温度计算,国外普遍采用IEEE Std.738标准<sup>[19]</sup>和CIGRE 601技术手册<sup>[20]</sup>,而我国

一般利用摩尔根公式校核线路最大载流量<sup>[11]</sup>,就本质而言,三种方法模型大同小异,主要是在考虑集肤效应、电晕损耗等细节以及个别参数取值存在差异。现有的架空输电线路弧垂计算模型主要有状态方程法和应变累积方法<sup>[21]</sup>。其中状态方程法将钢芯铝绞线视作整体,采用等效的弹性模量和热膨胀系数,关键假设是前后两状态已处于稳态,将导线看成等温圆柱体,以表面温度为计算温度,未考虑导线内外温差<sup>[22]</sup>,且认为钢芯的总长度等于铝线的总长度<sup>[23]</sup>。受模型假设局限,在超过“拐点温度”后的高温区域,由于铝线受力较少甚至不受力,状态方程的计算结果将产生一定的误差,特别是运行年限较久的线路,因长期运行的蠕变塑性伸长和偶尔受到大的冰/风荷载导致的塑性伸长,导线的“拐点温度”降低<sup>[24]</sup>,计算误差更大。应变累积法单独考虑钢芯和铝线的应变,先给钢芯假设一个初始应力,采用迭代法逐步增加钢芯的应力,直到钢芯的总长度等于铝线的总长度,弥补了状态方程法的计算误差<sup>[25-26]</sup>。

因此,针对高温天气下架空输电线路安全运行需要,本文首先分析我国规程规定导线长期运行最高允许温度和杆塔设计时弧垂计算所取的导线温度不一致给输电线路运行安全带来的问题,然后提出表征线路安全运行的运行温度裕度和净距裕度等安全指标,给出利用实况天气监测和数值天气预报在线估计输电线路载流能力和运行温度的方法,综合考虑导线长期运行导致的蠕变对弧垂的影响和沿线林木植被生长对净距的影响,进一步提出N-1方式下重载输电断面运行温度和弧垂超限预警方法,最后通过某实际案例反演和论证分析,对所提方法的可行性和有效性进行验证。结果表明,本文方法有助于电网运行调度人员在夏季高温天气下校核架空线路的安全裕度,防范重载线路因温度过高和弧垂超限而导致的故障。

## 1 导线允许温度和弧垂设计不一致问题

架空输电线路设计时,一般是在特定气象条件(如环境温度40℃,风速0.5 m/s,太阳辐射功率1 000 W/m<sup>2</sup>)和导线最高允许温度(如70℃)下进行载流能力计算<sup>[11]</sup>。对于线路弧垂,设计规范在确定导线对地及交叉跨越安全距离时,除了大跨越和跨越干线铁路、高速公路按导线允许的最高温度计算弧垂外,其他都是按照导线运行温度40℃(若导线按允许温度80℃设计时,导线运行温度取50℃)情况或覆冰无风情况求得的最大弧垂计算线路对跨越物净距。设计规范条文说明里给出上述规定的解

释是: 考虑到常年运行时导线温度并不高, 只在系统事故线路短期过载运行时导线温度才能达到 70 °C, 如果按导线允许温度来计算弧垂, 势必抬高了标准, 增加基建投资。

可见, 在线路设计时, 是按线路长期运行的“有利条件”来计算弧垂, 通常情况下, 实际环境温度小于设计环境温度, 实际风速大于规定的风速, 当负荷在静态载流量以内时, 导线温度没有达到最高允许温度。但是当提高导线载流量以增加输送容量, 或者出现极端高温天气时, 导线运行温度和线路弧垂便成了制约条件。研究表明, 对代表档距为 300 m 的输电线路, 导线温度每增加 10 °C, 弧垂会增加 0.36 m<sup>[27]</sup>。因此, 温度升高后的线路弧垂问题不容忽视, 即使将杆塔呼高设计裕度考虑进去, 在夏季高温或短时事故过负荷情况下, 线路弧垂将不满足安全要求, 存在导线对地或被跨越物体绝缘距离(即线路净距)不足的安全隐患。

## 2 高温天气下输电线路的安全指标

架空输电线路存在“运行电流-导线温度-弧垂/净距”电热力耦合过程, 并且相互影响。其中, 运行电流和气象环境参数共同决定导线运行温度, 导线运行温度进一步决定线路弧垂, 弧垂最终影响线路净距。因此, 可以用载流裕度、运行温度和净空距离三个指标衡量线路运行状态。

### 2.1 载流裕度

按历史气象条件重现期内的最恶劣气象参数计算得到的静态载流量, 是目前调度运行人员广泛采用的安全指标。而输电线路的动态载流量是根据实时气象环境参数以及线路运行最高允许温度所确定的<sup>[28]</sup>, 更能体现输电线路的实际载流能力。

为确保线路的运行安全, 并感知架空线路的载流能力, 引入载流安全裕度, 即当前线路的实时载流量到线路动态载流量之间的变化区间, 可用式(1)表示。

$$I_{\text{margin}} = I_{\text{dy}} - I_t \quad (1)$$

式中:  $I_{\text{margin}}$  表示线路的载流安全裕度, 单位为 A;  $I_{\text{dy}}$  表示动态载流能力, 单位为 A;  $I_t$  表示实时电流, 单位为 A。

### 2.2 运行温度

输电线路的安全运行除了受到载流量的限制, 还受到运行温度等因素限制。虽然运行时导体的温度与电流之间存在密切关联, 但电流在表征线路载流能力上并不等同于运行温度的限制, 制约线路载流能力的本质应是运行温度。同时由于存在热惯性,

导线温度变化滞后于电流的变化, 即阶跃变化的电流并不立即引起导线温度超限, 而是要经过一段时间之后, 导线温度才会上升至最高允许运行温度, 到达输电线路安全运行的边界。为此引入线路的温度安全裕度为

$$T_{\text{margin}} = T_{\text{max}} - T_t \quad (2)$$

式中:  $T_{\text{margin}}$  表示线路温度安全裕度, 单位为(°C);  $T_t$  表示线路实时运行温度, 单位为(°C);  $T_{\text{max}}$  表示线路运行最高允许温度, 单位为(°C)。

### 2.3 净空距离

根据 GB 50545-2010《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》, 输电线路承受高电压需要满足一定的绝缘距离, 特别是导线带电部分与树木<sup>[29]</sup>、建筑物等的净距, 如表 1 所示。

表 1 导线与各类植被之间安全距离

Table 1 Safety distance between conductor and vegetation		
标称电压/kV	220	500
导线与树木之间垂直距离/m	4.5	7
导线与绿化带或防护林木之间净空距离/m	4	7
导线与城市绿化灌木及街道树之间垂直距离/m	3.5	7

杆塔呼高  $H_h$  是杆塔的基本高度, 它对杆塔的绝缘安全性、投资经济性起着重要作用。影响杆塔呼高的因素有很多, 主要影响因素包括绝缘子串长度、最大弧垂、导线与地面及被跨越物体之间的安全距离, 设计时按式(3)计算杆塔呼高。

$$H_h = L_\lambda + L_{S\text{max}} + h + \Delta h \quad (3)$$

式中:  $L_\lambda$  表示悬垂绝缘子串的长度, 单位为 m;  $L_{S\text{max}}$  表示线路最大弧垂, 单位为 m;  $h$  表示导线到地面及被跨越物体的安全距离, 单位为 m;  $\Delta h$  表示设计裕度, 单位为 m。

对于建成后的输电线路, 其导线对地或交叉跨越物体的绝缘距离  $H_s$  可以表示为

$$H_s = H_h - L_\lambda - L_s \quad (4)$$

式中:  $H_h$  表示杆塔呼高, 单位为 m;  $L_\lambda$  表示悬垂绝缘子串的长度, 单位为 m;  $L_s$  表示当前状态的导线实际弧垂, 单位为 m。

## 3 基于数值天气预报的安全指标估计

### 3.1 导线载流裕度估计

根据 IEEE Std.738-2012 标准以及 CIGRE 601 技术手册中关于架空线路载流量与导线温度的计算关系, 导线的热平衡方程可表示为

$$m \cdot C \cdot \frac{dT_c}{dt} = I^2 \cdot R(T_c) + q_s - q_c - q_r \quad (5)$$

式中:  $m$  为单位长度导线质量, 单位为 kg/m;  $C$  为

导线的等效比热容, 单位为  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $T_C$  为导线温度, 单位为  $^\circ C$ ;  $q_c$  为导线的对流散热功率, 单位为  $W/m$ ;  $q_r$  为导线的辐射散热功率, 单位为  $W/m$ ;  $q_s$  为单位长度导线的日照发热功率, 单位为  $W/m$ ;  $R(T_C)$  表示导线温度为  $T_C$  时的交流电阻值, 单位为  $\Omega/m$ 。  $q_s$ 、 $q_c$ 、 $q_r$  以及  $R(T_C)$  的计算方法可查阅 IEEE Std.738-2012 标准或 CIGRE 601 技术手册, 此处不再赘述。

因此, 根据数值天气预报, 导线运行在最高允许温度时的动态载流可用式(6)计算。

$$I_{dy} = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_{cmax})}} \quad (6)$$

计算得到动态载流量后, 通过式(1)可以计算得到载流裕度指标。

### 3.2 导线运行温度估计

导线在某气象环境条件下流过某一数量的电流而达到稳态热平衡时, 由于热平衡方程中含有导线温度的 4 次方和 2 次方项, 且导线电阻随导线温度变化, 因此无法直接推导导线温度的解析表达式, 可采用数值方法求解, 例如使用经典四阶 Runge-Kutta 公式, 其解具有四阶精度。

计算得到导线表面温度  $T_C$  后, 钢芯温度  $T_{sc}$  可用式(7)计算。

$$T_{sc} = T_C + \frac{I^2 R(T_C)}{2\pi\lambda} \left[ \frac{1}{2} - \frac{D_1^2}{D^2 - D_1^2} \ln\left(\frac{D}{D_1}\right) \right] \quad (7)$$

式中:  $\lambda$  表示径向导热系数, 单位为  $W/(m \cdot K)$ ;  $D$  表示钢芯铝绞线直径, 单位为  $m$ ;  $D_1$  表示钢芯直径, 单位为  $m$ 。

### 3.3 线路弧垂估计

对于钢芯铝绞线, 在钢芯和铝线温度均已知的情况下, 通过对钢芯应力进行迭代, 可得到导线温度与导线应力、钢芯和铝线总应变及弧垂之间的关系<sup>[21]</sup>。对于某一给定的钢芯应力, 可得出钢芯总应变  $X_s$  为

$$X_s = D_s + E_s + C_s \quad (8)$$

式中,  $D_s$ 、 $E_s$ 、 $C_s$  分别为钢芯受热应变、弹性应变和蠕变应变。

此时导线的平均张力为

$$F = \frac{F_H}{1 - \frac{1}{6} \left( \frac{W l_h}{F_H} \right)^2} \quad (9)$$

式中:  $F_H$  为张力的水平分量;  $l_h$  为档距的一半;  $W$  为导线单位长度质量。

在钢芯和铝线截面积分别已知的情况下, 通过

式(10)可求出铝线应力。

$$F = A_s \sigma_s + A_A \sigma_A \quad (10)$$

式中:  $\sigma_s$ 、 $\sigma_A$  分别为钢芯和铝线的轴向应力;  $A_s$ 、 $A_A$  分别为钢芯和铝线的截面积。

求得铝线应力后, 相应可得出铝层应变  $X_A$ 。由各自应力分别得出钢芯和铝层应变后, 通过对钢芯和铝层应变进行比较, 当钢芯应变和铝层应变相等时, 退出迭代; 当钢芯应变不等于铝层应变时, 改变初值, 继续迭代, 直到应变相等为止。此时线路弧垂可由式(11)得出。

$$L_s = \frac{F_H}{W} \left( \cosh\left(\frac{l_h W}{F_H}\right) - 1 \right) \quad (11)$$

对于运行十年以上线路, 导线会发生蠕变变形, 使得导线伸长, 弧垂增加。因影响蠕变变形的因素十分复杂, 无法直接进行计算, 目前通常的做法是通过试验得出经验公式或实际测量进行考虑。如图 1 所示, 导线的蠕变伸长率与时间的关系是按指数规律变化的, 在双对数坐标上绞线蠕变伸长率与时间是线性关系<sup>[21]</sup>, 因此方程可表示为

$$\log \varepsilon = \log \alpha + \beta \times \log t \quad (12)$$

式中:  $\varepsilon$  为由于蠕变产生的伸长(应变);  $t$  为时间, 单位为  $h$ ;  $\alpha$  和  $\beta$  为经验常数。

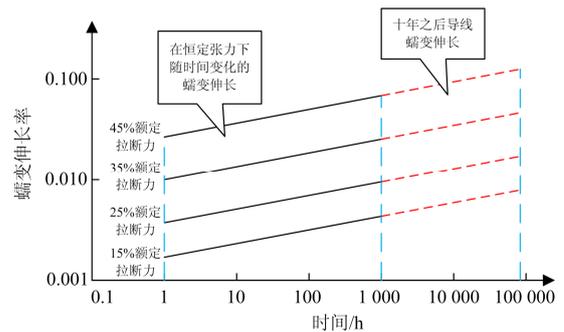


图 1 导线蠕变伸长率随时间变化趋势图

Fig. 1 Diagram of conductor creep elongation rate changing with time

此外, 输电线路交叉跨越时, 对于跨越铁路、公路、其他杆塔等重要跨越物时, 按照设计规程都会在设计 and 建设期间把被跨越物的高度考虑进去, 并按导线最高允许温度校核弧垂。但对于自然环境中周期性生长的植被树木, 特别是南方的灌木, 其高度常常发生周期性变化。我国因土地政策原因, 无法对被跨越植被进行全部砍伐, 如未及时进行树枝修剪, 植被增长高度会进一步减小线路净距, 威胁电力系统的安全运行<sup>[30]</sup>。

为此, 需要对跨越林区的重点地段或重点档的

植被高度进行量化处理, 一种可行的方法是根据近期人工巡检结果或无人机航拍、机载雷达图像辨识所得植被高度进行安全校核, 也可根据该地段的植被生长规律估算其高度, 本文选用经典准确的Richards方程<sup>[31]</sup>对植被树木增长高度进行预测, 如式(13)所示。

$$h_{\text{tree}} = k(1 - \delta \exp(-\eta t))^{\zeta} \quad (13)$$

式中:  $t$  为增长时间(月), 月内的各天可用对应的小数表示, 且以每年 1 月份为时间起点;  $k$  为生长极限;  $\delta$  与生长因子有关;  $\eta$  为形状参数;  $\zeta$  为生长速度。

需要指出的是, 因植被生长与当年的雨水及土壤等自然条件密切相关, 对于跨越多个区域和多种地形的输电走廊, 应根据各段不同的植被类型分别求取拟合参数, 并注意使用最近的巡线结果进行高度修正。

#### 4 N-1 方式下重载输电断面风险预警

当输电断面的部分线路处于重载或者即将过载的工作状态时, 如果断面出现  $N-1$  事故, 电网调度以及变电运维部门需要实时掌握输电线路的运行状态, 分析输电断面的载流能力, 根据负荷预测曲线计算导线温度和弧垂, 校核导线温度和弧垂是否越限, 提前进行预控, 确保输电断面的安全与互联电网稳定运行。

由于导线载流量、运行温度和线路净距(弧垂)依次递进影响, 其中导线温度是中间纽带, 它既制约导线动态载流能力, 又影响线路弧垂。实际中, 电网运行人员更习惯于关注导线电流是否越限, 因此可以在输电线路动态载流能力的基础上乘以一个可靠性系数, 作为重载运行的边界, 当电流超过重载阈值后<sup>[32]</sup>, 校核导线温度和弧垂安全裕度。

$$I_{\text{alert}} = K_{\text{rel}} \times I_{\text{dy}} \quad (14)$$

式中:  $I_{\text{alert}}$  表示重载警戒电流阈值;  $I_{\text{dy}}$  表示输电线路动态载流量;  $K_{\text{rel}}$  为可靠系数, 可取 0.8~0.9。

当输电断面发生  $N-1$  事故导致潮流转移, 或者负荷剧烈变化时, 将导致导线电流突变, 导线将处于暂态热平衡状态。考虑到导线的热时间常数较小(min 级), 因此可假设导线的气象环境参数不发生改变<sup>[33]</sup>, 且认为输电线路的初始电流和跃变后的电流已知, 可将式(5)化为一阶差分方程, 如式(15)所示。

$$\Delta T_C = \frac{q_j + q_s - q_r - q_c}{mc} \Delta t \quad (15)$$

式中:  $\Delta t$  的步长取 1~10 s, 则在时间间隔  $\Delta t$  之后, 导线温度为

$$T_C(i) = T_C(i-1) + \Delta T_C \quad (16)$$

式中:  $T_C(i)$  表示第  $i$  步计算之后的导线温度;  $T_C(i-1)$  表示第  $i$  步计算之前的导线温度。

如此迭代, 直到导线温度误差小于设定的收敛精度(如 0.1 °C), 则结束计算。

导线温度到达  $T_{\text{max}}$  的所有步长时间之和, 即为导线温度安全耐受时间。

$$t_{\text{sc}} = \sum_{T_i}^{T_{\text{max}}} \Delta t \quad (17)$$

在迭代计算导线温升增长的过程中, 同时采用应变累加法同步计算弧垂增量, 当净空距离大于绝缘安全裕度时, 线路处于安全运行状态。

$$\begin{cases} H_s > h_x, & \text{安全} \\ H_s \leq h_x, & \text{不安全} \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $h_x$  表示绝缘安全裕度, 单位为 m。

综上, 输电线路运行温度和弧垂越限预警的流程如图 2 所示。

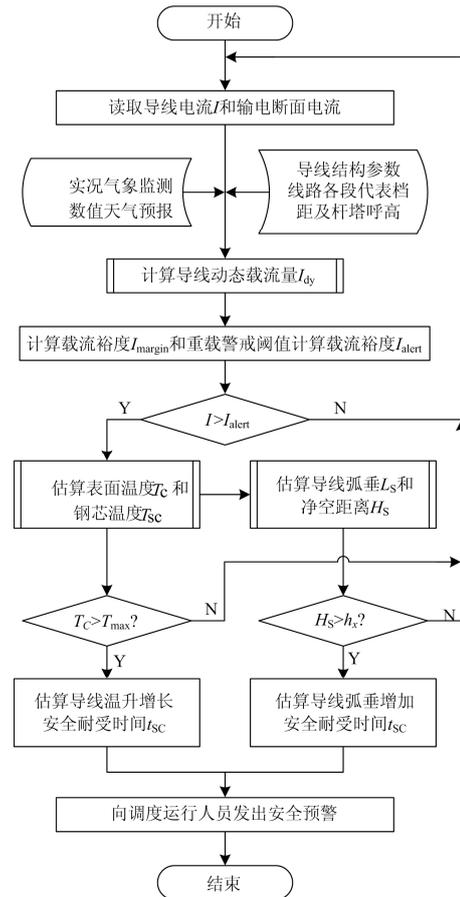


图 2 输电线路运行温度和弧垂越限预警流程图

Fig. 2 Flowchart of conductor operating temperature and sag off-limit warning for overhead line

### 5 算例分析

2018年7月21日14:28, 西南地区某220 kV双回线路其中一回线发生导线触树放电故障, 线路I跳闸停运, 由于是终端变电站, 潮流全部转移到另一回线路, 线路II因载流量增大, 导线温度升高, 弧垂增大, 30 min后也发生触树放电, 致使该输电断面全停, 造成该地区大范围停电。现以当天的气象参数和线路电流等数据, 对事故过程进行反演, 验证所提方法的可行性和有效性。

2018年7月21日当天事故时段该地区气象数据和导线电流如表2所示。

表2 事故时气象参数和导线电流

Table 2 Weather conditions and conductor current when the accident occurs

时间	14:30	15:00
最高气温/°C	38.4	39
风速/(m/s)	2.7	2.2
导线电流/A	289	577

该输电线路所用导线型号为LGJ 400/35, 其参数如表3所示。

表3 LGJ 400/35 导线参数

Table 3 Conductor parameters of LGJ 400/35

导线参数	值
导线外径/mm	26.82
钢芯直径/mm	7.5
导线截面积/(mm) <sup>2</sup>	425.24
70°C交流电阻/(Ω/m)	$9.150 \times 10^{-5}$
单位长度钢质量/(kg/m)	0.405 9
单位长度铝质量/(kg/m)	1.104 4
长期运行时的最高允许温度/(°C)	70

同时, 选取该线路事故段周边常见被跨越植被(以刺槐等灌木为主)在2015—2017年3年间历史同期月份观测的植被高度进行拟合, 并以2018年7月份该输电线路故障段所跨越植被高度进行校验修正, 可得Richards生长方程中各参数拟合值及其置信区间, 如表4所示。其确定系数为 $R_{\text{square}}=0.998\ 3$ , 标准差为 $\text{RMSE}=3.428$ 。

表4 拟合函数中待定参数的拟合值和置信区间

Table 4 Fitting values and confidence intervals of undetermined parameters in fitting function

参数	拟合值	95%置信区间
$k$	183.7	(177, 190.3)
$\delta$	1.138	(-2.113, 4.389)
$\eta$	0.552 7	(0.4009, 0.7045)
$\zeta$	7.799	(-20.71, 36.31)

表4中 $k$ (拟合高度)的95%置信区间上下限之差约为0.13 m, 等效于导线温度增加4.5 °C引起的弧垂增长, 或净空距离减小0.13 m, 可见Richards方程拟合满足工程要求。

对于该条线路, 现场实际代表档距为200 m, 为验证所述方法具有普遍性, 以100 m档距为起始档距, 以20 m为间隔, 分别计算新架设线路和运行年限较久已产生蠕变线路弧垂和安全裕度。因新线路架设初期和验收时期, 已经对所跨越植被进行砍伐, 植被树木高度一般不会对绝缘安全产生影响。因西南地区特殊地形地貌, 给巡线工作带来了巨大困难, 该条线路架设在交通困难区域, 车辆难以直达, 该时期西南地区处于高温闷热天气, 更是对巡线提出了巨大挑战, 因此未及时发现弧垂增加所产生的影响。对于14:28的第一次触树放电, 其计算验证结果如图3所示。

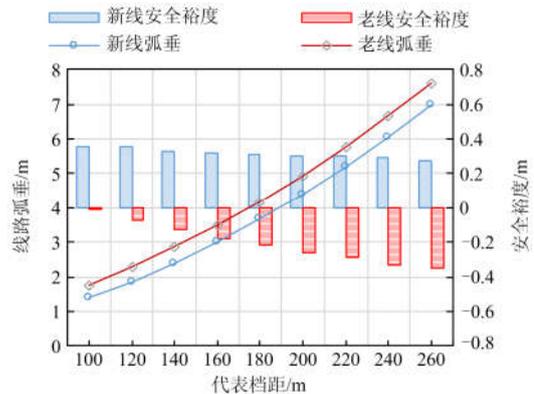


图3 14:28的导线弧垂和安全裕度

Fig. 3 Conductor sag and safety margin at 14:28

通过计算可以发现, 14:28发生第一次故障时, 对于新架设线路, 其导线温度为46.7 °C, 虽然环境温度较高, 但因为风速远大于设计风速0.5 m/s, 对流散热条件较好, 导线尚未达到最高允许温度, 对于新架设的线路, 因未记及导线蠕变和植被增长的影响, 代表档距为200 m的导线, 弧垂为4.39 m(以40 °C为弧垂设计温度, 200 m代表档距的导线弧垂为4.19 m), 由于留有施工裕度(220 kV线路200 m档距时取0.5 m), 绝缘安全距离满足要求, 可以正常运行。但对于该条运行年限较久线路(十年以上), 因蠕变影响, 线股之间间隙较小, 对流散热情况较差, 导线温度已达到67.2 °C, 虽未达到最高允许温度70 °C, 但因存在林木植被周期性生长和导线蠕变伸长, 安全距离进一步减小, 线路净距安全裕度为负值, 发生触树放电故障。

14:28之后发生潮流转移, II回线的导线温度和

弧垂进一步增大, 其导线温度和相比于初始安装时的弧垂增量曲线如图 4 所示。最后, 在 14:58 各代表档距的弧垂和安全裕度如图 5 所示。

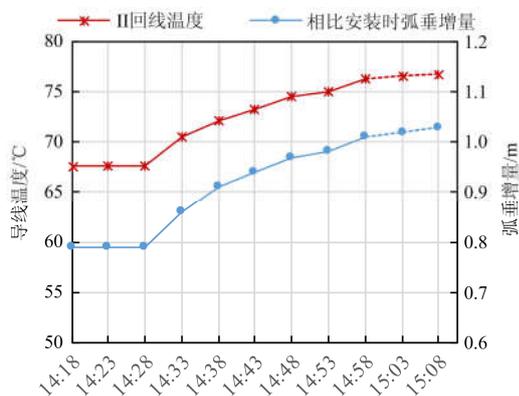


图 4 潮流转移后 II 回线的导线温升和弧垂增长曲线

Fig. 3 Curves of conductor temperature rise and sag increase of line II after power flow transfer

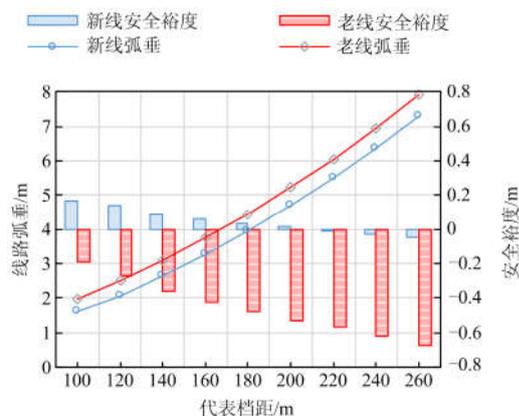


图 5 14:58 时的弧垂和安全裕度

Fig. 5 Conductor sag and safety margin at 14:58

同样可以发现, 因输电断面发生  $N-1$  潮流转移, 导线温度逐渐增大, 达到  $77.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 超过规定的最高允许温度, 在综合考虑蠕变伸长和植被生长的情况下, 线路绝缘距离已经不满足要求, 导致对树放电, 该输电断面无法继续承担输电任务。

## 6 结论

夏季高温天气下, 因负荷加重会导致导线运行温度升高和弧垂增大, 加上输电断面潮流转移, 可能出现运行温度和弧垂超限问题, 影响电网安全运行。本文以输电线路“电流增大→导线温度升高→弧垂增加→净距减小”的电热力耦合关系为基础, 分析了我国钢芯铝绞线长期运行允许温度( $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )与杆塔设计时弧垂计算所取导线温度( $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )不一致给输电线路电热安全带来的影响, 提出对于高温天气

下重载运行的输电线路, 特别是老旧线路, 需要综合考虑导线蠕变和植被生长情况, 校核导线运行温度和弧垂增长是否超限, 确保导线运行温度和线路净距等安全指标是否处于允许范围, 可以有效避免输电线路对树木等被跨越物放电, 保证输电线路的安全运行。利用实况天气监测和数值天气预报技术, 动态估计线路载流能力和运行温度, 校核输电断面  $N-1$  方式下的安全指标, 发出风险预警, 有助于电网运行和调度决策。

## 参考文献

- [1] 林晶怡, 李斌, 熊敏. 电力负荷影响因素研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [2] MEYER C, DE DONCKER R W. Solid-state circuit breaker based on active thyristor topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(2): 450-458.
- [3] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-11.  
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [4] 曾鸣, 李红林, 薛松, 等. 系统安全背景下未来智能电网建设关键技术发展方向——印度大停电事故深层次原因分析及对中国电力工业的启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 175-181.  
ZENG Ming, LI Honglin, XUE Song, et al. Key technologies of future smart grid construction based on power system security: a view of blackout in India and experience and enlightenment to power industry in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 175-181.
- [5] 董新洲, 曹润彬, 王宾, 等. 印度大停电与继电保护的三大功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 19-25.  
DONG Xinzhou, CAO Runbin, WANG Bin, et al. India blackout and three functions of protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 19-25.
- [6] KIM S D, MORCOS M M. An application of dynamic thermal line rating control system to up-rate the ampacity of overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 1231-1232.
- [7] CHEN S L, BLACK W Z, LOARD H W. High temperature ampacity model for overhead conductors[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(6): 62-72.
- [8] 国家电网公司. 输电线路导线温度监测装置技术规范:

- Q/GDW 244—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- State Grid Corporation of China. Technical specification for conductor temperature monitoring device on overhead transmission lines: Q/GDW 244—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [9] 曾祥君, 阳韬, 钟卓颖, 等. 基于弧垂实时测量的输电线路动态增容决策系统设计[J]. 电力科学与技术学报, 2015(2): 9-15.
- ZENG Xiangjun, YANG Tao, ZHONG Zhuoying, et al. Design of dynamic power capacity increasing decision system based on the real-time measurement of transmission line sag[J]. Journal of Electric Power Science & Technology, 2015(2): 9-15.
- [10] DOUGLASS D, CHISHOLM W, DAVIDSON G, et al. Real-time overhead transmission line monitoring for dynamic rating[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 31(3): 921-927.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 110~750 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.
- [12] KOPSIDAS K, BOUMECID B, COOPER I P. Overhead line design considerations for conductor creep mitigation[J]. IET Generation, Transmission, and Distribution, 2016, 10(10): 2424-2432.
- [13] 王孔森, 孙旭日, 盛戈峰, 等. 架空输电线路导线弧垂在线监测误差分析及方法比较[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 27-34.
- WANG Kongsun, SUN Xuri, SHENG Gehao, et al. Error comparison among three on-line monitoring methods of conductor sag of overhead transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 27-34.
- [14] MAHAJAN S M, SINGAREDDY U M. A real-time conductor sag measurement system using a differential GPS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 475-480.
- [15] KHAWAJA A H, HUANG Q, LI J, et al. Estimation of current and sag in overhead power transmission lines with optimized magnetic field sensor array placement[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(5): 1-10.
- [16] 周宁, 熊小伏. 电力气象技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [17] 李泽椿, 毕宝贵, 金荣花, 等. 近 10 年中国现代天气预报的发展与应用[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1069-1078.
- LI Zechun, BI Baogui, JIN Ronghua, et al. The development and application of the modern weather forecast in China for the recent 10 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(6): 1069-1078.
- [18] 范京艺, 毛安家, 刘岩, 等. 基于负荷和环境温度曲线的输电断面短时过载能力分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 116-121.
- FAN Jingyi, MAO Anjia, LIU Yan, et al. Analysis of the short-time overload capability of the transmission section based on the load and ambient temperature curve[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 116-121.
- [19] IEEE Power and Energy Society. IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors: IEEE Std. 738—2012[S]. New York, USA: IEEE, 2012.
- [20] CIGRE Working Group B2. 43. Guide for thermal rating calculation of overhead lines[S]. Paris, France: CIGRE, 2014.
- [21] CIGRE TB324. Sag-tension calculation methods for overhead lines[R]. Paris, France: CIGRE, 2016.
- [22] 刘刚, 李扬, 陈垣, 等. 基于电磁-热耦合模型的架空导线温度分布和径向温差的计算与实验验证[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 7-13.
- LIU Gang, LI Yang, CHEN Yuan, et al. Calculation and experiment verification on temperature distribution and radial temperature of overhead transmission line based on electromagnetic-thermal coupling fields[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 7-13.
- [23] 聂耸, 程养春, 戴沅. 基于导线温度的架空线路弧垂新算法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 27-32.
- NIE Song, CHENG Yangchun, DAI Yuan. A new sag calculation method based on the temperature of overhead transmission line[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2013, 40(6): 27-32.
- [24] DONG X. Analytic method to calculate and characterize the sag and tension of overhead lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2064-2071.
- [25] KOPSIDAS K, ROWLAND S M, BOUMECID B. A holistic method for conductor ampacity and sag computation on an OHL structure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1047-1054.
- [26] POLEVOY A. Impact of data errors on sag calculation accuracy for overhead transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2040-2045.
- [27] CIGRE WG B2.36. Guide for application of direct real-time monitoring systems[R]. CIGRE, Paris, 2012.

- [28] ALVAREZ D L, DA SILVA F M F, MOMBELLO E E, et al. Conductor temperature estimation and prediction at thermal transient state in dynamic line rating application[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2236-2245.
- [29] HU Zhuangli, He Tong, ZENG Yihui, et al. Fast image recognition of transmission tower based on big data[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 149-158. DOI: 10.1186/s41601-018-0088-y.
- [30] 张龙跃, 肖先勇, 马超, 等. 潮流转移诱导线路触树故障的时间与概率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 64-70.  
ZHANG Longyue, XIAO Xianyong, MA Chao, et al. Prediction of time and probability of line tree-related fault caused by power flow transferring[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 64-70.
- [31] 张少昂, 王冬梅. Richards 方程的分析和一种新的树木理论生长方程[J]. 北京林业大学学报, 1992(3): 99-105.  
ZHANG Shao'ang, WANG Dongmei. New theoretical growth model based on analysis of Richards's equation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1992(3): 99-105.
- [32] WANG Jian, XIONG Xiaofu, HU Jian, et al. Safety strategy of power transmission channel coordinated with transfer capability support for power system emergency[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 110: 232-245.
- [33] 王建, 熊小伏, 陈璟, 等. 振荡电流作用下的架空线路温升响应计算[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2416-2422.  
WANG Jian, XIONG Xiaofu, CHEN Jing, et al. Temperature rise response calculation of overhead conductor under power oscillation current[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2416-2422.

---

收稿日期: 2019-03-19; 修回日期: 2019-06-23

作者简介:

李明明(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网风险评估与气象灾害预警; E-mail: cqulmm@foxmail.com

王建(1986—), 男, 通信作者, 博士(后), 讲师, 硕士生导师, 研究方向为电网风险评估与气象灾害预警, 电力系统保护与控制; E-mail: wangrelay@foxmail.com

熊小伏(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制, 新能源并网故障分析, 电网风险评估与气象灾害。E-mail: cquxxf@vip.sina.com

(编辑 周金梅)