

# Dynamic Ampacity Evaluation and Operating Temperature Safety Warning of Overhead Lines under Continuous High Temperature Weather Conditions

Yao Ding, Xiaofu Xiong, Qiang Chen

School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing  
Email: 278023073@qq.com

Received: Sep. 15<sup>th</sup>, 2018; accepted: Oct. 10<sup>th</sup>, 2018; published: Oct. 17<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In recent years, Chongqing has undergone a series of extreme continuous high temperature weather in summer. The power load of air conditioning increases largely, while the ampacity of overhead lines decreases under extreme high temperature. Therefore, it is important to focus on the operation safety of overhead lines. In this paper, the safety margin of overhead lines is characterized by dynamic heat rating and operating temperature, and the real time operating temperature and dynamic thermal rating of overhead lines is estimated using operational meteorological environment parameters. And it can send dispatchers a safety alarm when the ampacity margin is not enough or the conductor temperature rise is off-limit. Furthermore, the temperature rise response time of the conductor is predicted after the preconceived N-1 power flow transferred, to remind power dispatchers to take load transfer measures within this time limit. Finally, the validity of proposed method is verified through a case analysis which considering a power flow section in Chongqing region. And the result of reliability evaluation which takes full advantage of the dynamic heat rating of the line under the premise of ensuring safety can provide reference for operation and dispatching in continuous high temperature weather conditions.

## Keywords

Overhead Line, High Temperature, Dynamic Thermal Rating, Safety Margin, Safety Warning

---

# 连续高温天气下架空线路动态载流能力评估与运行温度安全告警

丁尧, 熊小伏, 陈强

重庆大学, 电气工程学院, 重庆  
Email: 278023073@qq.com

收稿日期: 2018年9月15日; 录用日期: 2018年10月10日; 发布日期: 2018年10月17日

## 摘要

近年来重庆地区多次出现夏季连续极端高温天气, 空调电负荷大, 而高温天气下线路载流能力下降, 因此需要关注架空线路的运行安全问题。本文提出以动态载流量和运行温度共同表征架空线路的安全裕度, 结合运行气象环境在线辨识架空线路的实时运行温度和动态载流能力, 当载流裕度不足或导线温升越限时, 向电网调度人员发出安全告警。此外, 在预想的供电断面N-1潮流转移后, 预测导线温升响应时间, 提醒电网调度人员在此时限以内及时采取负荷转供措施。最后, 以重庆地区某供电断面为算例, 验证了所提方法的有效性和准确性。评估结果可以在确保安全的前提下, 充分利用线路动态载流能力, 为连续高温天气下的电网运行调度提供指导。

## 关键词

架空线路, 高温天气, 动态热容量, 安全裕度, 安全告警

Copyright © 2018 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

## 1. 引言

在全球气候变化和城市热岛效应的背景下, 夏季极端高温天气越来越普遍。例如, 2016年夏季(6~8月), 重庆全市平均气温较常年同期偏高 0.9℃, 35℃以上的高温日数较常年同期偏多 11.8 d, 共出现 6 次区域高温过程, 其中 8 月 10~26 日出现了连续 17 天的区域高温过程, 综合强度达特重等级[1]。夏季极端高温天气下空调用电量大幅度增长, 电网负荷屡创新高, 据相关数据显示, 8 月 25 日重庆电网统调最高负荷创历史新高, 达到 1815 万千瓦, 同比增长 37.1% [2]。期间重庆某供电公司出现多条 220 kV 断面部分时段不满足 N-1 安全准则, 7 条 110 kV 线路重载或过载, 36 座 110 kV 变电站的负载率高于 80%。连续极端高温天气下, 空调电负荷大, 而高温天气下线路载流能力下降, 因此架空线路的运行安全问题备受电网调度人员关注。

目前广泛使用的输电线路静态热极限值, 是按历史气象条件重现期内的最恶劣气象参数(例如 40℃ 的气温, 0.5 m/s 的风速)求取的保守数值[3] [4] [5], 利用线路的静态热极限值无法提高夏季连续高温天气下架空线路的载流能力[6]。为尽可能提高架空线路的电能输送能力, 应尽可能提高设备利用率, 故可在不进行电网结构改造的情况下利用架空线路的动态热容量实现电能输送的效能最大化[7] [8] [9] [10]。目前已开展了大量关于架空线路动态增容的研究, 文献[11]提出利用输电线路的动态载流量代替静态载流量, 利用在线热定值测量系统实时动态地计算输电线路的输送容量: 输入输电线路的实际环境参数, 即环境温度以及风速风向等参数, 利用输电线暂态热平衡方程计算输电线路的输送容量。结果表明, 输电线路的动态热容量相比于静态热容量, 可以大幅提高输电线路的输电能力。针对在线热定值测量系统设备成本太高, 难以广泛应用的缺点, 文献[12]提出利用参数估计的方法确定实时气象环境参数, 动态计算线路

的最大输送容量。文献[13]研究了不同气候因素对架空线路动态载流量的影响程度,仿真分析发现风速对架空线路的载流量影响程度最大,日照强度对架空线路的载流量影响最小,但其仅针对不同气候因素的影响进行了定性分析,并未进行定量分析。而文献[14]提出了一种架空线路能力在线评估的简化方法,通过线路温度的在线测量以及利用短时气候预报信息,采用辨识修正气象因子,实时获取线路的动态载流能力,在线预测架空线路的最大载流能力。

综上可知,基于实时气象环境参数的动态载流量,实现了架空线路的有效增容,有效地提升了线路的输送能力,但是并未在连续高温天气下实时兼顾线路的动态载流量和运行温度,缺少架空线路动态载流能力的评估与运行温度的安全告警。因此,本文利用实时气象环境参数,借助导线载流的热平衡方程,在线估计导线运行温度以及动态载流量,动态辨识架空线路的安全裕度,分析导线在供电断面 N-1 潮流转移后的温升响应时间。最后以重庆地区某供电断面为算例,对所提方法的有效性和准确性进行验证。评估结果可为连续高温天气下的电网运行调度提供指导。

## 2. 夏季连续高温天气及负荷特点

重庆地形以山地为主,地势由西向东逐渐升高,由南向北长江河谷倾斜,起伏较大,四周山地环绕,地面散热困难,夏季易形成高温区。其中沿江河谷地区是暑热天气的多发区,特别是东北部的巫山、巫溪一带,中部的涪陵、丰都附近地区,以綦江为中心的西部偏南的沿江地区,更是三个高温集中区[15][16][17]。重庆全年 42% 的高温都出现于 8 月,持续极端高温伴随伏旱,使得电力负荷激增,森林火险等级处于高位,给电网安全运行带来不利影响。2017 年夏季(6~8 月),重庆全市平均气温较常年同期偏高 0.7℃, 35℃ 以上的高温日数较常年同期偏多 12.4 d,共出现 5 次区域高温过程,其中 7 月 16 日~8 月 7 日的区域高温过程,综合强度达到特重等级。图 1 所示为重庆某气象站 2017 年 7 月 24 日到 7 月 30 日的环境温度数据,以及同时期某双回线路供电断面的负荷电流数据。

由图 1 可知,负荷电流大小与温度高低大致呈正相关的关系,负荷电流随着温度升高而增大。在连续高温天气下,空调负荷大幅度增长,部分线路将处于重载甚至过载的工作状态。在多回线路并联运行时,当出现断面 N-1 事故时,剩余健全线路的电流会超过额定最大载流量,可能不满足 N-1 安全准则。因此,作为电网调度以及变电运维部门,在迎峰度夏用电高峰期必须采取相关措施进行线路的载流能力评估,提前掌握架空线路的运行状态,保证供电断面和线路的运行安全。

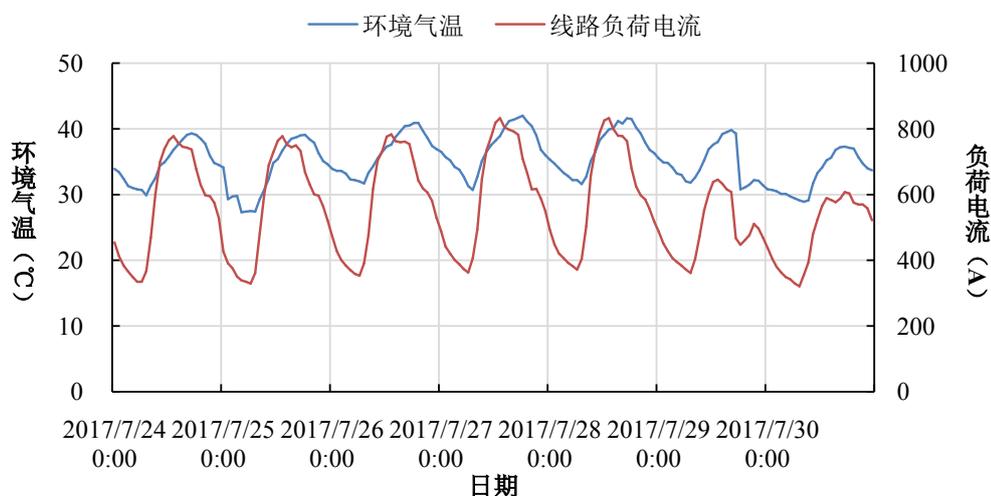


Figure 1. Ambient temperature and load current from July 24 to July 30, 2017

图 1. 2017 年 7 月 24 日~7 月 30 日环境温度与负荷电流

### 3. 架空线路的安全裕度

#### 3.1. 导线载流的热平衡方程

架空线路的运行温度取决于线路运行过程中的载流值及其周围的环境气象条件(环境温度、日照强度、风速风向), 导线温升响应满足暂态热平衡[18]:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_e}{dt} = q_s + q_J - q_c - q_r \quad (1)$$

式中,  $m$  是单位长度导线质量,  $\text{kg/m}$ ;  $c$  是导线的等效比热容,  $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ; 式中,  $T_e$  是导线温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $q_s$ 、 $q_J$ 、 $q_c$ 、 $q_r$  分别是单位长度导线的日照吸热功率、焦耳热功率、对流散热功率、辐射散热功率,  $\text{W/m}$ 。

对上式中  $q_s$ 、 $q_J$ 、 $q_c$  和  $q_r$  的计算公式, 简要说明如下:

##### 1) 日照吸热功率 $q_s$

每单位长度的导体获得的日照发热功率  $q_s$ , 正比于导线的吸热系数  $\alpha$ , 导体外径  $D_0$  (m), 导线所处地区海拔高度上的太阳辐射功率密度  $Q_s$  ( $\text{W/m}^2$ ) 以及太阳光入射方向与导线走向之间夹角  $\theta_s$  (rad)。可由下式计算得到:

$$q_s = \alpha D_0 Q_s \sin \theta_s \quad (2)$$

##### 2) 焦耳热功率 $q_J$

焦耳热由流过导体的电流决定:

$$q_J = I^2 R(T_c) \quad (3)$$

其中  $I$  为载流值,  $\text{A}$ ;  $R(T_c)$  为导线温度为  $T_c$  时的单位长度交流电阻值,  $\Omega/\text{m}$ , 可通过线性插值获得。

##### 3) 对流散热功率 $q_c$

对流散热功率可以表示为努塞尔数  $N_u$  的函数, 如式(4)所示:

$$q_c = \pi \lambda_f (T_c - T_a) N_u \quad (4)$$

其中  $\lambda_f$  是空气导热系数,  $T_c$  为导线表面温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_a$  为导线环境温度,  $^\circ\text{C}$ 。

对流散热是导体散热的重要方式, 导线的对流散热分为两种类型: 自然对流散热和强迫对流散热, 分别对应于无风和有风的情况。强迫对流散热功率取决于风速及风向角, 在风速较高的情况下, 强迫对流散热占主导地位, 可忽略自然对流散热; 在低风速下, 起主要作用的则是自然对流散热。

强迫对流散热功率可按式(5)计算:

$$q_{cf} = \pi \lambda_f (T_c - T_a) Nu_{\delta} \quad (5)$$

其中  $Nu_{\delta_w}$  为风向角为  $\delta_w$  时的努塞尔数。

自然对流散热功率可按式(6)计算:

$$q_{cn} = \pi \lambda_f (T_c - T_a) Nu_{nat} \quad (6)$$

式中, 其中  $Nu_{nat}$  为风速为零时的努塞尔数。

在计算导线的对流散热时, 取  $q_{cn}$  和  $q_{cf}$  的最大值作为其对流散热功率, 即:

$$q_c = \max \{ q_{cn}, q_{cf} \} \quad (7)$$

##### 4) 辐射散热功率 $q_r$

架空导线的辐射散热主要与导线和周围环境的温度差有关, 根据斯蒂芬 - 玻尔兹曼定律, 导线辐射散热功率为:

$$q_r = \pi D_0 \sigma_B \varepsilon \left[ (T_c + 237)^4 - (T_a + 237)^4 \right] \quad (8)$$

式中,  $\varepsilon$  是导线材料的辐射系数,  $\sigma_B$  是斯蒂芬 - 玻尔兹曼常数, 其值为  $5.6697 \times 10^{-8}$ 。

当式(1)左端等于零时, 则表示架空线路的载流值确定, 且周围气象条件处于稳定状态, 其发热量和散热量处于平衡状态。即

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T)_c}} \quad (9)$$

在极端气象环境参数条件下, 架空线路的运行温度则达到允许的最高温度, 按照中国国家标准, 钢芯铝绞线的最高允许温度为  $70^\circ\text{C}$ 。

### 3.2. 动态安全裕度表征方法

线路实际运行中, 线路电流以及周围的环境温度、日照强度以及风速风向是不断变化的, 线路的热平衡状态将会受到破坏, 但由于热惯性的存在, 导体的温度变化总是滞后于线路电流的变化。因此, 本文引入架空线路的实时载流和实时温度两个判断指标, 共同表征架空线路的动态安全裕度[19]。

#### 1) 线路载流安全裕度

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, 相比于架空线路的静态载流量, 可以极大程度地挖掘架空线路的输电潜力, 实现线路的有效增容, 解决夏季连续高温天气下架空线路载流能力不足的问题。为确保线路的运行安全, 并感知架空线路的载流能力, 引入载流安全裕度概念, 具体如图 2 所示。

线路载流安全裕度指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, 可用如下公式表示:

$$I_{margin} = I_{dy} - I_t \quad (10)$$

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

#### 2) 导线温度安全裕度

线路的载流能力受电流、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, 温度升高时, 线长增加, 弧垂变大, 安全距离减小, 可能不满足对地或其他跨越物的电气距离; 当线路温度进一步上升时, 导线会因强度降低而断线, 仅以电流表征输电线路的动态安全裕度会带来保守或者冒

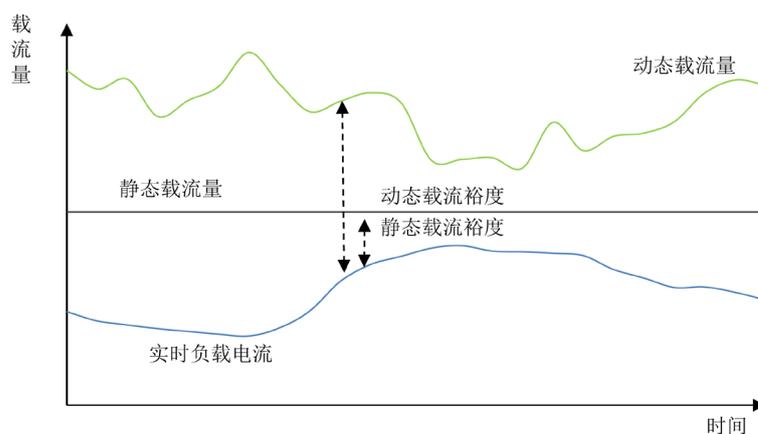


Figure 2. Diagram of current carrying safety margin  
图 2. 载流安全裕度示意图

进的结果。因此，在挖掘线路送电能力需求以及准确把握线路动态安全裕度的驱使下，还应充分考虑制约线路载流能力的物理本质，从运行温度的角度对线路的安全运行状态进行评估。故引入线路的温度安全裕度概念，即

$$T_{margin} = T_{max} - T_t \quad (11)$$

式中， $T_{margin}$ 表示线路温度安全裕度， $T_t$ 表示线路实时运行温度， $T_{max}$ 表示线路运行最高允许温度(中国标准一般采用  $70^{\circ}\text{C}$ )。

## 4. 导线安全裕度评估与告警

### 4.1. 导线载流裕度评估

在连续高温天气下，空调负荷大幅度增长，部分线路将处于重载甚至过载的工作状态，电网调度以及变电运维部门必须完成架空线路动态载流能力的评估，实时掌握架空线路的运行状态，在线辨识架空线路的动态载流量，分析供电断面的载流安全裕度，校核供电断面的 N-1 风险水平，进行超前预控，确保供电断面的安全稳定运行与电力平稳有序供应。因此，需要进行架空线路动态载流量的实时计算以及线路载流安全裕度的确定。

由于各个气象环境参数与导线动态载流量之间的非线性关系，对线路动态载流量的影响是不同的，故必须对各种气象影响因素均进行考虑。风速是对线路动态载流量影响最大的环境因素，线路动态载流量对风速变化的灵敏度最高，同时环境温度与日照强度对线路动态载流量也有不同程度的影响。架空线路周围的气象环境参数是实时变化的，因此线路动态载流量的估计需要利用负荷电流以及短期气象环境参数。线路动态载流能力评估的框架具体如下(图 3)。

借助短时气象预报系统，等时间间隔采集架空线路周围的气象环境参数值以及负荷电流大小，利用式(1)的导体暂态热平衡方程实时在线计算导体的动态载流量，构成一个等时间间隔的载流量随机序列，以此确定架空线路的动态载流值，再依据式(10)确定架空线路的载流安全裕度，完成架空线路的载流能力评估。评估精度由时间间隔决定，时间间隔越短，灵敏性越高；时间间隔越大，灵敏性越低。

### 4.2. 供电断面 N-1 事故时导线温升告警

供电断面 N-1 事故是电网运行方式校核必须考虑的情况。当两条或多条线路构成的供电断面中的一条线路因为故障或其他原因退出运行时，潮流会转移到其他健全线路上，相当于在原有电流的基础上叠加了一个阶跃电流。由于热惯性的存在，架空线路的温度变化滞后于电流的变化，因此在输电线路负荷电流越限一段时间之后，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。电网调度工作人员可利用这段时间对电网结构进行优化，对将要达到最高允许运行温度的架空线路进行负荷转供，确保供电断面的安全稳定运行和电力平稳有序供应。因导线的热时间常数为 min 级，故可以假设

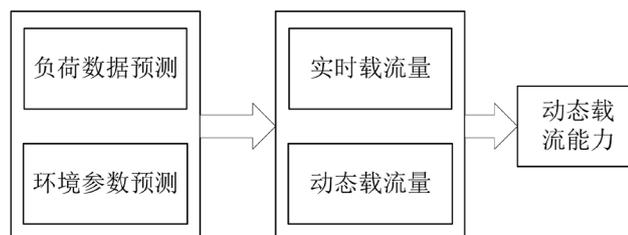


Figure 3. Framework of dynamic current carrying calculation  
图 3. 线路动态载流能力评估框架

该段时间的气象环境参数以及负荷电流不改变,利用式(1)计算得到线路从当前运行温度  $T_{c0}$ ,即电流越限时刻  $t_1$ ,上升至线路最大允许温度所需时间  $t_{cs}$ :

$$t_{cs} = \frac{1}{B} \ln \left( \frac{T_{\max} - T_a + \frac{A}{B}}{T_{c0} - T_a + \frac{A}{B}} \right) \quad (12)$$

对系数  $A$ 、 $B$ 、 $K$  详细说明如下:

$$A = (I^2 R_a + \alpha_s Q_s D_o \sin \theta_s) / mc \quad (13)$$

$$B = (I^2 \beta - \pi \lambda_f Nu_\delta - \pi D_o \varepsilon \sigma_B K) / mc \quad (14)$$

$$K = \left[ (T_c + 273)^2 - (T_a + 273)^2 \right] \times (T_c + T_a + 546) \quad (15)$$

其中:  $T_{\max}$  为钢芯铝绞线的最高允许运行温度,为  $70^\circ\text{C}$ ;  $\beta$  为电阻随温度的变化率。

除获取完成负荷转供的时间裕度以外,还应实时辨识线路的温度安全裕度,进行线路运行温度的安全预警。可以以越限时刻为初始时刻,等时间间隔采样架空线路的运行电流以及实时气象环境参数,利用式(10)计算得到线路从越限时刻的运行温度  $T_l$  到最大允许运行温度  $T_{\max}$  的安全裕度  $T_{margin}$ 。利用实时安全裕度  $T_{margin}$  完成运行温度的安全预警:

1) 当  $T_{margin}$  逐渐减小时,且小至  $5^\circ\text{C}$  时,则发出告警信号,告知作业人员线路的安全运行裕度不足,需要采取相关措施保证配电网的稳定与安全;当  $T_{margin}$  逐渐增大时,且大于  $5^\circ\text{C}$  时,则解除告警信号,告知作业人员输电线路的安全运行裕度充足。

2) 当  $T_{margin} \leq 0^\circ\text{C}$  时,调度运行人员必须完成负荷切除或者负荷转供,确保整个配电网的安全稳定。

电网调度工作人员可借助上述架空线路的运行温度预警方法准确地感知架空线路的温度安全裕度,以及利用热惯性提供的时间裕度对将要达到安全运行边界的输电线路完成负荷转供或者负荷切除,实现连续高温下配电网的协调控制,确保整个配电网的安全性及稳定性。

## 5. 算例分析

以图 4 所示的电气接线图为例,对连续高温天气下架空线路的动态载流能力进行评估以及运行温度的安全预警。选取重庆地区某 110 kV 供电断面作为算例,该断面通过双回线路向本地负荷以及下一级线路供电,其中架空线路的型号是  $2 \times \text{LGJ-300/25}$ ,根据国家标准《GB/T1179-2017 圆线同心绞架空导线》[20],该线路的具体参数如表 1 所示。以图 1 中的 2017 年 7 月 27 日为例,其温度和风速数据如图 5 所示。

Table 1. Parameters of LGJ-300/25

表 1. LGJ-300/25 参数

导线参数	值	导线参数	值
导线外径 $D_0/\text{mm}$	23.80	$20^\circ\text{C}$ 钢的比热容/( $\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ )	481
线芯钢线(直径/mm)	6.67	$20^\circ\text{C}$ 钢比热容温度系数	$1 \times 10^{-4}$
铝线直径/mm	2.85	$20^\circ\text{C}$ 铝的比热容/( $\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ )	897
截面积/ $\text{mm}^2$	333.31	$20^\circ\text{C}$ 铝比热容温度系数	$3.8 \times 10^{-4}$
辐射系数 $\varepsilon$	0.9	单位长度钢质量/( $\text{kg}/\text{m}$ )	212
吸热系数 $\alpha$	0.9	单位长度铝质量/( $\text{kg}/\text{m}$ )	845
$20^\circ\text{C}$ 交流电阻/( $\Omega/\text{m}$ )	$9.7201 \times 10^{-5}$	长期运行时的最高允许温度( $T_N/^\circ\text{C}$ )	70
$70^\circ\text{C}$ 交流电阻/( $\Omega/\text{m}$ )	$11.6836 \times 10^{-5}$	短时最高允许温度( $T_N/^\circ\text{C}$ )	100

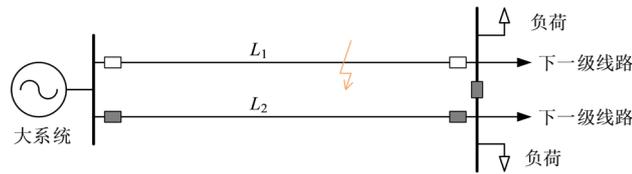


Figure 4. Diagram of power flow section

图 4. 供电断面示意图

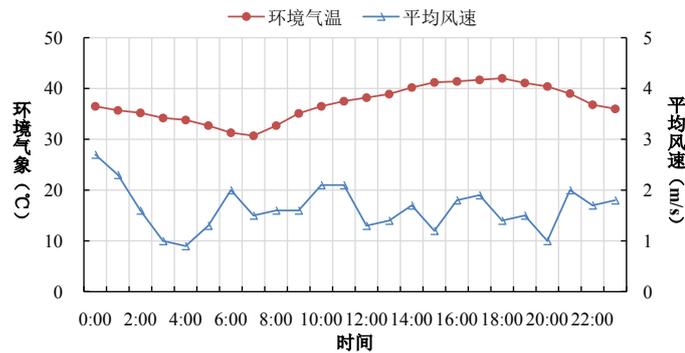


Figure 5. Weather parameters on July 27, 2017

图 5. 2017 年 7 月 27 日气象参数

连续高温天气下，当系统通过双回线路向负荷供电时，由气象环境参数实时确定的线路动态载流量如图 6 所示，可知连续高温天气下的日负荷与温度的变化呈正相关，在下午 13:00 达到了峰值 836 A，在架空线路采用静态热定值运行方式下，该时刻留有 178 A 的载流安全裕度，而在动态热定值运行方式下则留有 451 A 的载流安全裕度，提高了近 153%。由实时气象环境参数确定的动态载流量，相比于极端气象环境参数确定的静态载流值，可充分地提高输电线路的送电能力，即使在气象环境最恶劣的情况下，也留有 438 A 的载流安全裕度，相比于静态热定值运行方式的 210 A，也提高了 108%。因此，动态载流量可有效地提高输电线路的载流安全裕度，深度挖掘输电线路的输电潜力，确保该供电断面在迎峰度夏期间电力的平稳供应。

当送出线 L1 退出运行时，供电断面仅通过送出线 L2 向本地负荷以及下一级线路供电，L2 将会承受因潮流转移引起的接近于 2 倍的负荷电流，供电断面通过单回线路供电时的动态载流量如图 6 所示。可知当供电断面发生 N-1 潮流转移之后，8:00~9:00 之间的某个时刻架空线路的载流值将会超过静态最大载流值，但是并未越过架空线路的动态载流量，仍留有一定的载流安全裕度，在动态热定值下仍可以安全可靠运行。但是 12:00~18:00 当供电断面发生 N-1 潮流转移之后，该供电断面不再满足 N-1 准则，电网调度人员需要在该时间段内采取负荷转移或者切负荷等措施，保证架空线路留有足够的安全裕度，保证供电断面的可靠运行。例如，在 13:00 时，电网调度人员应该切除或者转移至少 832.59 A 负荷电流，才可以保证架空线路运行在载流安全边界之内。

由于热惯性的存在，架空线路的温度变化滞后于电流的变化，而运行温度又是制约架空线路安全运行间的物理本质，故还应实时辨识架空线路的运行温度。架空线路的实时温度如图 7 所示。

由图 7 可知，当系统通过双回线路向负荷供电时，输电线路具有充足的温度安全裕度，不存在越限时刻。当系统仅通过单回线路向负荷供电时，针对 0:00 到 11:00 之间供电断面发生 N-1 潮流转移之后，单回线路在动态热定值运行方式下能确保电力的平稳供应；但部分时段供电断面发生 N-1 潮流转移后，线路不再满足 N-1 安全准则。例如，当线路 L1 在 12:00 发生跳闸时，L2 将会承受因潮流转移引起的负荷电流 1642.68 A，发生了电流越限，不再满足 N-1 准则，故需要确定当前时刻上升至线路最大允许温

度时刻的时间长度  $t_{cs}$ ，为电网调度人员完成负荷转供或者负荷切除提供参考。

利用式(12)计算如下可知  $t_{cs} = 4.52 \text{ min}$ ，采用 IEEE 提供的导线温度对阶跃电流的响应曲线对该时间裕度的准确性进行验证[21]，计算的温升响应曲线如图 8 所示。

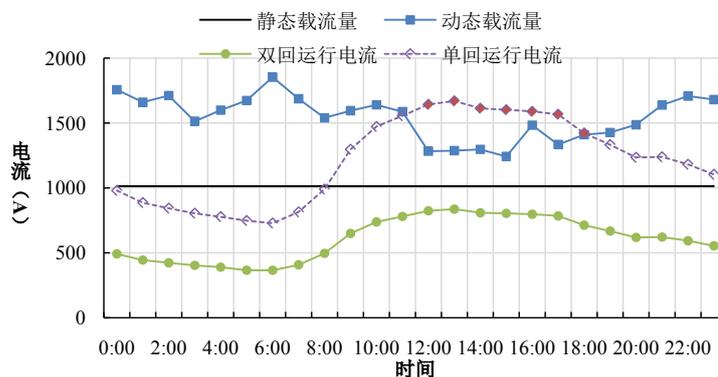


Figure 6. Dynamic capacity of overload lines

图 6. 架空线路的动态载流能力

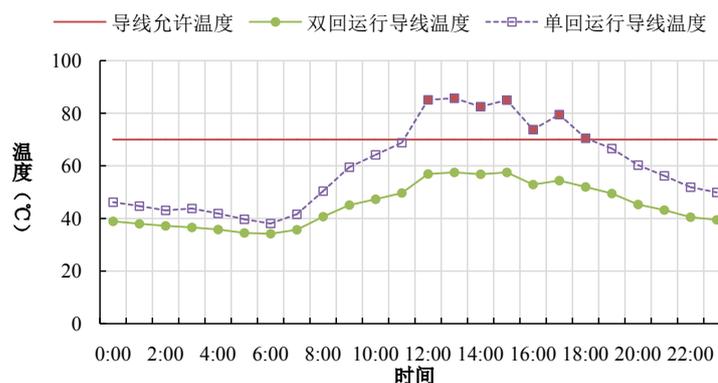


Figure 7. Real-time temperature of the overhead line

图 7. 架空线路的实时温度

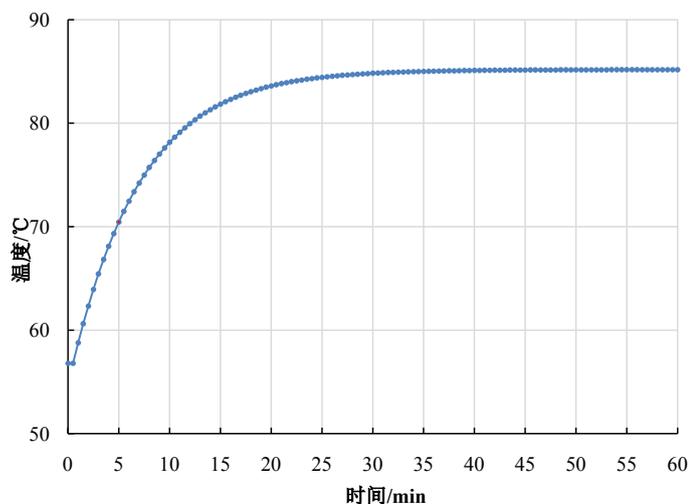


Figure 8. Response curve of transmission line temperature to step current

图 8. 导线温度对阶跃电流的响应曲线

由图 8 可知, 利用 IEEE 提供的导线温度对阶跃电流的响应曲线计算所得的时间裕度为 4.75 min。由式(12)推导过程中假设  $\lambda_f$  与  $v$  为常数, 但导线在实际运行中  $\lambda_f$  与  $v$  是随着导线温度提高而增大的, 故式(12)计算的时间裕度相比于 IEEE 标准计算的时间裕度会偏小, 但误差范围是可接受的, 故本文提出的时间裕度简化估算方法是合理的。以 12:00 越限时刻为初始时刻, 开始进行线路气象环境参数的等时间间隔采样, 进而计算输电线路的温度安全裕度, 实现输电线路运行温度的安全告警, 确保配电网的稳定安全运行。

## 6. 结论

针对连续高温天气下高负荷带来的线路运行安全问题, 本文提出以动态载流量和运行温度共同表征架空线路的安全裕度, 结合运行气象环境在线辨识架空线路的实时运行温度和动态载流能力, 当载流裕度不足或导线温升越限时, 向电网调度人员发出安全告警。通过研究得出以下结论:

1) 在连续高温天气下高负荷时, 部分线路将处于重载甚至过载的工作状态, 在多回线路并联运行时, 当出现断面 N-1 事故时, 剩余健全线路的电流会超过额定最大载流量, 不满足 N-1 安全要求, 因此必须采取相关措施保证供电断面和线路的运行安全。

2) 以动态载流量和运行温度共同表征的线路动态安全裕度, 相比于静态安全裕度, 可实时掌握输电线路的运行状态, 进行超前预控, 实现临近安全边界线路的负荷转移或者负荷切除, 确保配电网的安全稳定运行与电力平稳有序供应。

3) 本文所提方法以架空线路的安全运行为前提, 充分地利用了线路动态载流能力, 可为连续高温天气下的电网得运行调度提供指导。

## 参考文献

- [1] 重庆市气象局. 2016 年夏季重庆市气候影响评价[EB/OL]. [http://183.230.183.17:8090/cqgf\\_portal/](http://183.230.183.17:8090/cqgf_portal/), 2018-08-16.
- [2] 国网重庆市电力公司. 重庆高温: 电网负荷连日创下历史新高[EB/OL]. [http://www.cq.sgcc.com.cn/html/main/col8/2017-08/24/20170824093846037709709\\_1.html](http://www.cq.sgcc.com.cn/html/main/col8/2017-08/24/20170824093846037709709_1.html), 2017-08-24.
- [3] Adapa, R. and Douglass, D.A. (2006) Dynamic Thermal Ratings: Monitors and Calculation Methods. 2005 *IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa*, Durban, 11-15 July 2005, 163-167.
- [4] Holbert, K.E. and Heydt, G.T. (2001) Prospects for Dynamic Transmission Circuit Ratings. The 2001 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Sydney, 6-9 May 2001, 205-208
- [5] Roberts, D., Taylor, P. and Michiorri, A. (2008) Dynamic Thermal Rating for Increasing Network Capacity and Delaying Network Reinforcements. *CIREN Seminar 2008: SmartGrids for Distribution*, Frankfurt, 23-24 June 2008, 1-4.
- [6] Foss, S.D., Lin, S.H. and Fernandes, R.A. (1983) Dynamic Thermal Line Ratings; Part I: Dynamic Ampacity Rating Algorithm. *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, **3**, 1858-1864. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1983.317795>
- [7] 钱之银. 输电线路实时动态增容的可行性研究[J]. 华东电力, 2005, 33(7): 1-4.
- [8] 张启平, 钱之银. 输电线路实时动态增容监测系统的可行性研究[C]//中国科学技术协会. 中国科学技术协会 2005 年学术年会 11 分会场暨中国电机工程学会 2005 年学术年会论文集. 北京: 中国科学技术协会, 2005.
- [9] 任丽佳, 盛戈喆, 李力学, 等. 动态确定输电线路输送容量[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 45-49.
- [10] Xu, B., Ulbig, A. and Andersson, G. (2013) Impacts of Dynamic Line Rating on Power Dispatch Performance and Grid Integration of Renewable Energy Sources. *IEEE PES ISGT Europe 2013*, Lyngby, 6-9 October 2013, 1-5.
- [11] Kim, S.D. and Morcos, M.M. (2013) An Application of Dynamic Thermal Line Rating Control System to Up-Rate the Ampacity of Overhead Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **28**, 1231-1232. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2234940>
- [12] Yang, Y., Harley, R.G., Divan, D., et al. (2009) MLPN based Parameter Estimation to Evaluate Overhead Power Line Dynamic Thermal Rating. 2009 *15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, Curitiba, 8-12 November 2009, 1-7.

- 
- [13] 杨帆, 刘浩军, 王少华, 等. 考虑实时气候对于输电线路载流量的影响[J]. 广东电力, 2017, 30(7): 70-75.
- [14] 熊小伏, 尹国涛. 输电线载流能力在线简化评估方法[J]. 华东电力, 2011(8): 1244-1248.
- [15] 重庆气象局. 重庆市气象灾害年鉴 2006-2010[M]. 重庆: 气象出版社, 2013: 1, 4, 21, 38, 53.
- [16] 程炳岩, 孙卫国, 郭渠. 重庆地区夏季高温的气候特征与环流形势分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(1): 73-80.
- [17] 郭渠, 孙卫国, 程炳岩, 等. 重庆夏季极端最高气温的时空变化特征分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(5): 98-105.
- [18] (2012) Guide for Application of Direct Real-Time Monitoring Systems.
- [19] 熊小伏. 电气设备主动保护与控制概念及功能架构[J]. 电力系统自动化, 2018(2): 1-10.
- [20] GB/T1179-2017 圆线同心绞架空导线[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [21] PE/T&D—Transmission and Distribution (2012) IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. IEEE, New York.

## 附录

公式(12)推导:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_c}{dt} = q_s + q_J - q_c - q_r \quad (1)$$

其中,日照吸热功率、焦耳热功率、辐射散热功率分别如下:

$$q_s = \alpha D_s Q_s \sin \theta_s \quad (2)$$

$$q_J = I^2 R(T_c) \quad (3)$$

$$q_r = \pi D_0 \sigma_B \varepsilon \left[ (T_c + 237)^4 - (T_a + 237)^4 \right] \quad (4)$$

强迫对流散热功率取决于风速及风向角,在风速较高的情况下,强迫对流散热占主导地位,可忽略自然对流散热,则

$$q_{cf} = \pi \lambda_f (T_c - T_a) Nu_\delta \quad (5)$$

其中:

$$\lambda_f = 2.42 \times 10^{-2} + 7.2 \times 10^{-5} T_f \quad (6)$$

$$T_f = 0.5(T_a + T_c) \quad (7)$$

$$Nu_\delta = 1.754(VD_0/\nu)^{0.45} \quad (8)$$

$$\nu = 1.32 \times 10^{-5} + 9.5 \times 10^{-8} T_f \quad (9)$$

上式之中,  $V$  为垂直于导线的风速,单位为 m/s。

将(2)、(3)、(4)、(5)代入(1)可得:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_c}{dt} = I^2 R(T_c) + \alpha D_s Q_s \sin \theta_s - \pi \lambda_f (T_c - T_a) Nu_\delta - \pi D_0 \sigma_B \varepsilon \left[ (T_c + 237)^4 - (T_a + 237)^4 \right] \quad (10)$$

(10)式中,  $R(T_c) = R_a + \beta(T_c - T_a)$ ,  $\beta$  为电阻随温度的变化率。令  $C = I^2 R_a + \alpha Q_s D_0 \sin \theta_s$ , 可知  $C$  为常数,且在动态变化中环境温度不发生改变。可得:

$$m \cdot c \cdot \frac{d(T_c - T_a)}{dt} = C + \left\{ I^2 \beta - \pi \lambda_f Nu_\delta - \pi D_0 \sigma_B \varepsilon \left[ (T_c + 237)^2 + (T_a + 237)^2 \right] (T_c + T_a + 546) \right\} (T_c - T_a) \quad (11)$$

令  $K = \left[ (T_c + 237)^2 + (T_a + 237)^2 \right] (T_c + T_a + 546)$  为  $T_c$  的函数。可知当温度变化时,  $K$ 、 $Nu_\delta$  以及  $\lambda_f$  均随温度的变化而变化。如(12)、(13)所示:

$$\frac{d\lambda_f/dT_c}{\lambda_f} = \frac{3.6 \times 10^{-5}}{2.42 \times 10^{-2} + 7.2 \times 10^{-5} \times (T_c + T_f)/2} \leq 1.49 \times 10^{-3} \quad (12)$$

$$\frac{d\nu/dT_c}{\nu} = \frac{4.75 \times 10^{-8}}{1.32 \times 10^{-5} + 9.5 \times 10^{-8} \times (T_c + T_f)/2} \leq 3.6 \times 10^{-3} \quad (13)$$

可知  $\lambda_f$  与  $\nu$  的变化很小,故可以近似认为  $\lambda_f$  与  $\nu$  为常数,则努塞尔数也可近似  $Nu_\delta$  为常数。

令  $A = I^2 R_a + \alpha Q_s D_0 \sin \theta_s / mc$  为常数,  $A = (I^2 \beta - \pi \lambda_f Nu_\delta - \pi D_0 \sigma_B \varepsilon K) / mc$ , 进一步简化方程(11)可得:

$$\frac{d(T_c - T_a)}{dt} - B(T_c - T_a) - A = 0 \quad (14)$$

解微分方程(10)的初始条件为越限时刻时  $t_1$  的运行温度  $T_{c0}$ ，当  $t = \infty$  时，根据静态导线载流平衡方程可以求得越限时刻的电流对应的导线稳态温度  $T_{\max}$ ，并且按此稳态温度求取  $K$ 、 $Nu_\delta$  以及  $\lambda_f$  的值进而得到  $B$  的值。导体的温度随时间变化轨迹的近似表达式如公式(15)：

$$T_c = T_a - \frac{A}{B} + \left( T_{c0} - T_a + \frac{A}{B} \right) e^{Bt} \quad (15)$$

导线通过的电流变大时，导线温度是慢慢上升，并最终达到静态平衡。由公式(15)求解可得导线电流增加时，导线温度上升至允许温度  $T_{\max}$  所需的时间为：

$$t_{cs} = \frac{1}{B} \ln \left( \frac{T_{\max} - T_a + \frac{A}{B}}{T_{c0} - T_a + \frac{A}{B}} \right) \quad (16)$$

#### 知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8763，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)