

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.022

典型高风险植被火条件下导线—板间隙击穿特性

周恩泽¹, 饶章权¹, 刘琦¹, 黄勇¹, 向淳¹, 王华清², 黄道春²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要: 为准确评估山火条件下架空输电线路的跳闸风险,提升电网安全运行水平,文中对南方电网典型高风险植被火条件下导线—板间隙击穿特性进行了研究。搭建模拟植被火燃烧特征试验平台和模拟山火间隙击穿试验平台,研究了云南松、水杉、速生桉、灌木和茅草5种植物的火焰燃烧特征参数和间隙击穿特性,对不同植被的火焰温度、火焰高度、灰分含量和可燃物热值与导线—板间隙击穿特性的关系进行研究。研究结果表明上述因素与间隙平均击穿电压梯度近似呈线性关系,并拟合得到其多元线性回归公式。使用熵权法得到火焰温度在植被燃烧特征中所占权重最高,上述5种植物中云南松的山火跳闸风险最高。文章研究结果可为架空输电线路山火跳闸风险评估提供参考。

关键词: 架空线路; 跳闸风险; 山火; 植被种类; 间隙击穿特性

Breakdown Characteristics of Conductor-plane Gap Under Typical High Risk Vegetation Fire Condition

ZHOU Enze¹, RAO Zhangquan¹, LIU Qi¹, HUANG Yong¹, XIANG Zhun¹,
WANG Huaqing², HUANG Daochun²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: For predicting accurately the trip risk of overhead transmission lines under the condition of mountain fire and improve safe operation level of power grid, the breakdown voltage characteristics of conductor-plane gap under the condition of typical high-risk vegetation fire of Southern Power Grid are studied. The fire combustion characteristics simulation test platform and mountain fire gap breakdown simulation test platform are set up for the study of flame combustion characteristics and gap breakdown characteristic of such five vegetations as the pinus yunnanensis, metasequoia, eucalyptus, shrubs, and thatch, and the relationship between the flame temperature of different vegetation, flame height, ash content, and fuel heating value and breakdown characteristic of conductor-plane gap is studied. The study results show that the relationship between the above factors and the average gap breakdown voltage gradient is approximately linear and its multiple linear regression formula is obtained by curve fitting. It is found by using the entropy-weight method that flame temperature has the highest weight in vegetation combustion characteristics, and pinus yunnanensis has the highest risk of fire trip among the five vegetations. The study results can provide a reference for predicting risk assessment of mountain fire trips of overhead transmission lines.

Key words: overhead lines; risk of tripping; mountain fire; vegetation type; gap breakdown characteristic

收稿日期:2023-10-05; 修回日期:2023-12-03

基金项目:南方电网科技项目(GDKJXM20198386);国家自然科学基金资助项目(51677138)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GDKJXM20198386), National Natural Science Foundation of China(51677138).

0 引言

为了满足电能的长距离输送以及清洁能源的异地消纳问题,需要建立大容量、远距离的输电线路。截至2021年,国家电网建成投运“十四交十二直”26项特高压工程,南方电网公司已经形成八交十一直的西电东送重要输电通道。远距离架空输电线路不可避免地会经过林地、草原或山脉等区域,当架空输电线路下方的植被发生火灾时,会产生高温火焰导致空气密度降低,且植被燃烧产生的带电粒子、碱金属以及碱土金属和灰烬颗粒等均可能导致输电线路对地间隙的导电性能增加,从而引发线路跳闸事故,危害电网运行安全^[1-9]。

国内外对植被火条件下导线—板间隙击穿电压和击穿特性的影响因素已开展了较多研究,测量了部分典型植被火焰的电导率和击穿电压^[10-12]。Lanoie R通过对 ± 450 kV条件下的桉树火焰间隙击穿电压和泄漏电流的研究,给出了火焰桥接不同比例间隙时的绝缘强度^[13]。Fonseca研究了1 m的导体—导体和导体—板间隙在甘蔗叶火焰下的耐受电压梯度为35 kV/m,并根据该耐受电压水平提出了不同电压等级线路在农作物火焰下的线路绝缘设计方法^[14]。Mphale采用微波法测量得到温度为730~1 000 K的林火电子数密度为 $0.32 \times 10^{16} \sim 3.21 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$,火焰中带电粒子对放电的影响类似于流注放电过程中产生的空间电荷^[15-16]。中国科学技术大学研究了工频电压下导线—板火焰间隙的击穿特性,得到在火焰作用下和火羽流作用下的平均击穿场强与空气的比值分别为27.3%~33.5%和39.4%~48.4%^[17]。华北电力大学提出了1种考虑降水、植被、风场等各种环境因素的线路跳闸概率实时计算模型^[18]。武汉大学利用模拟山火试验平台研究了短间隙条件下直流^[19]和交流导线—板间隙在典型植被火焰下的击穿特性,认为间隙在山火条件下击穿机理涉及火焰温度、电导率和灰烬等因素,同时提出了将植被火焰间隙划分成火焰区以及非火焰区的击穿电压评估模型^[20]。现有研究主要针对单一种类植被火焰条件下的间隙击穿特性研究,对长间隙条件下不同种类植被的燃烧特征参数和与击穿电压特性之间的关联研究较少,需要开展深入研究。

文中通过搭建模拟植被火燃烧特征和间隙击穿试验平台,研究云南松、水杉、速生桉、茅草和灌木5种高风险植被火焰下的燃烧特征参数和导线—板间隙击穿特性,得到其火焰温度、火焰高度和燃烧持续时间和间隙击穿平均电压梯度,并分析植被燃烧特

征参数与间隙平均击穿电压梯度之间的关系及各燃烧特征参数对平均击穿电压梯度的影响权重。

1 模拟植被火燃烧特征参数测量试验

1.1 试验平台

模拟植被火燃烧特征参数测量试验平台包括热电偶树、燃烧平台、标尺和显示仪表等设备,能够实现最大3 m $\times$ 3 m面积植被垛燃烧的温度特性测量。为保证试验的可重复性,试验所用植被均处理为1 m $\times$ 1 m $\times$ 0.25 m的方型植被垛。植被垛和试验平台见图1。试验采用热电偶树测量植被垛火焰不同高度的温度,并通过显示仪表记录数据。各热电偶所对应的火焰高度分别为0.25、0.5、1、1.5、2、2.5、3 m。试验时用秒表记录植被燃烧时间,标尺测量不同燃烧时刻的火焰高度。

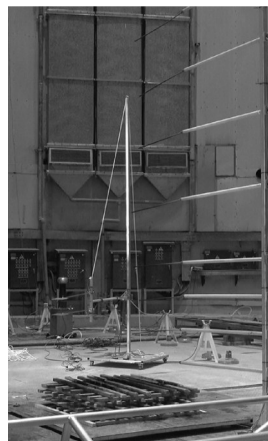


图1 模拟植被火燃烧特征参数测量试验平台

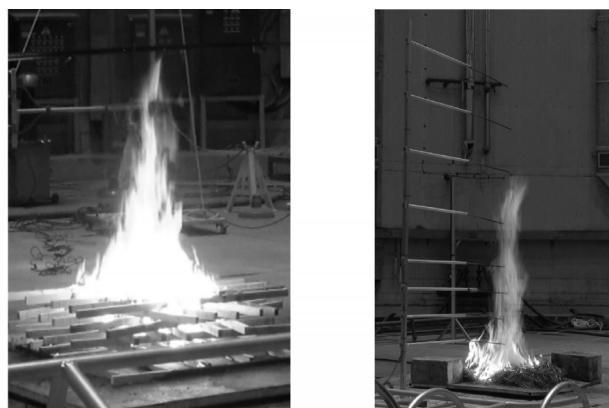
Fig. 1 Test platform for simulating vegetation fire combustion characteristics

1.2 不同植被的燃烧特征参数

根据南方电网近年架空输电线路山火跳闸事故的数据统计,得到其典型高风险植被为云南松、水杉、速生桉、灌木和茅草,因此将上述植被作为试验对象。典型植被燃烧的火焰燃烧形态见图2。其中速生桉的树干质地紧密,燃烧阶段有少量黑烟,火焰高度最高为1.7 m;云南松由于树干含有松油且质地疏松从而易燃,火焰最高高度为2.2 m,燃烧时有大量黑烟产生;水杉质地疏松,燃烧时有少量白烟产生,最大火焰高度2.3 m;灌木燃烧时有少量白烟,最大火焰高度2 m;茅草燃烧阶段有大量白烟,最大火焰高度2 m。

5种植被在燃烧过程中的火焰形态变化趋势大致相同,可分为快速上升阶段、最大火势阶段、稳步下降阶段和熄灭阶段。由于火焰熄灭时的线路跳闸风险较小,因此文中主要统计了每种植被在前

3个阶段的持续时间,见图3。



(a) 云南松

(b) 茅草

图2 云南松和茅草火焰形态

Fig. 2 Pinus yunnanensis and thatch flame forms

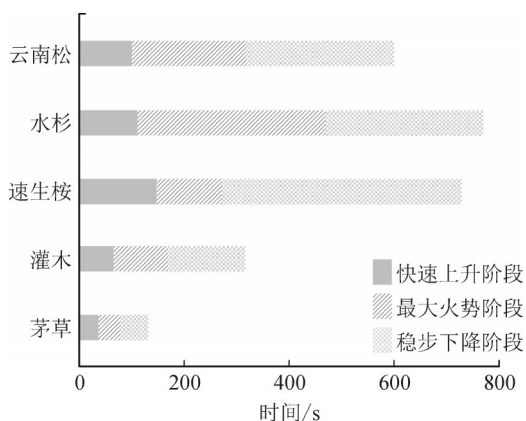


图3 不同植被的燃烧阶段及持续时间

Fig. 3 Burning stages and time of different vegetation

图3表明,木本类植被的燃烧持续时间均长于草本类植被,其中水杉的最大火势阶段持续时间最长,而速生桉的快速上升阶段最长。云南松、水杉、速生桉、灌木和茅草的最大温度分别为829、812、721、498、304℃,且火焰温度随高度均近似线性降低,见图4。

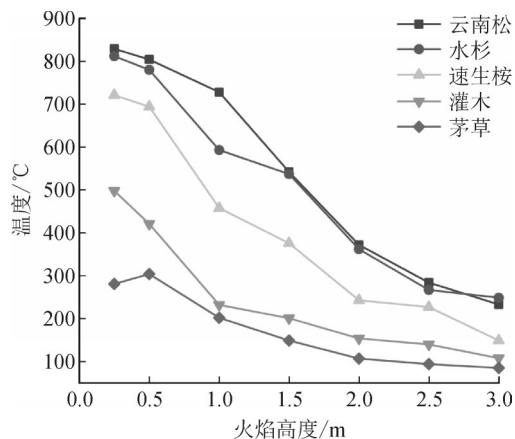


图4 不同植被火温度随高度的分布

Fig. 4 Temperature distributions with flame height of different vegetation

通过对不同植被种类的燃烧阶段持续时间和火焰高度、火焰最高温度的分析,结果表明在相同植被垛体积下植被种类对火焰高度、火焰各阶段持续时间和火焰温度均具有一定影响,从而导致不同植被火焰间隙的击穿电压具有一定差异。

2 不同植被火焰间隙击穿特性试验

2.1 试验平台

模拟植被火间隙击穿试验平台主要包括地电极、模拟导线、工频试验变压器和测量设备,见图5。

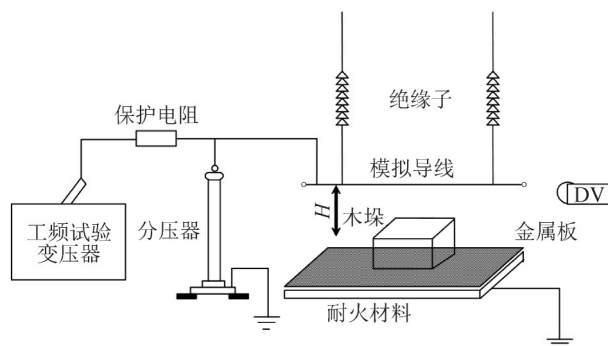


图5 模拟植被火焰间隙击穿试验平台

Fig. 5 Simulation vegetation flame gap breakdown test platform

其中工频试验变压器(6 000 kVA/1 500 kV)提供工频电压,经保护电阻连接至模拟导线,使用金属板作为地电极,将植被垛放置于金属板上并点燃,在最大火势阶段开展间隙击穿特性试验,并采用DV摄像机记录击穿时刻和火焰形态。3 m导线—板间隙长度条件下的典型击穿时刻电弧路径见图6。



(a) 松木

(b) 杉木

图6 典型植被火焰间隙击穿过程

Fig. 6 Breakdown process of typical vegetation flame gap

2.2 不同植被火焰间隙的平均击穿电压梯度

由于每种植被的火焰高度不同,且燃烧过程中火焰高度的变化具有一定随机性,为能比较不同植被种类对间隙击穿特性的影响,文中采用火焰桥接比作为基准,分析不同种类植被对间隙平均击穿电压梯度的影响。文中定义火焰桥接比例为间隙击

穿时刻火焰高度占导线与植被垛之间距离的比例。试验时的导线—板间隙长度包括1.7、3、4 m。间隙击穿电压与间隙距离之比为平均击穿电压梯度。试验所得不同植被火焰间隙在不同桥接比例下的平均击穿电压梯度见图7。

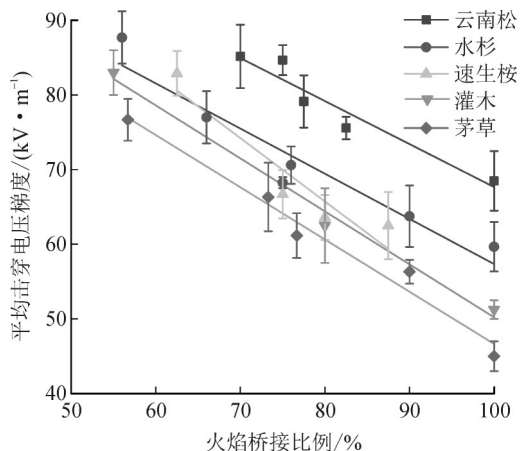


图7 不同植被火焰间隙的平均击穿电压梯度

Fig. 7 Average breakdown voltage gradient of flame gap of different vegetation

试验结果表明,在不同间隙长度下,平均击穿电压梯度随火焰桥接比例的变化趋势基本一致。图7表明,试验条件范围内平均击穿电压梯度从高到低分别为云南松、水杉、速生桉、灌木和茅草,且不同植被种类平均击穿电压梯度随着火焰桥接比的下降而上升,主要是由于火焰桥接比的降低使得非火焰区长度增加,导致平均击穿电压梯度升高。云南松、水杉、速生桉、灌木和茅草的平均击穿电压梯度拟合曲线的可决系数 R^2 分别为0.92、0.92、0.88、0.98、0.97,表明其变化趋近于线性。在相同的火焰桥接比下且桥接比例大于70%时,以水杉为基准,则云南松、速生桉、灌木、茅草的平均击穿电压梯度与杉木的比值分别约为1.13、0.96、0.93、0.88。

3 植被种类对火焰间隙击穿特性的影响

3.1 植被燃烧特征参数与平均击穿电压梯度的关系

植被的主要化学组成成分包括纤维素、半纤维素、木质素、灰分及有机溶剂提取物。纤维素、木质素、半纤维素属于多糖、芳香族化合物等有机成分,而灰分由能溶于水和不能溶于水的无机盐组成。森林可燃物的燃烧特性主要受其自身理化性质的影响,其中生物质的热解过程与纤维素、半纤维素和木质素的含量密切相关^[21]。同时植被燃烧时,火焰产生的热气流为典型湍流,而植被灰分中含有大量碱金属和碱土金属,其电离能较低,易于随热流卷入高温区发生热电离,形成带电粒子影响火焰体

电导率的大小。

由植被热解过程可知,不同植被中的木质素、纤维素含量主要影响了植被火焰的燃烧持续时间、火焰高度和火焰温度。而植被中无机盐含量、种类的不同,导致了不同种类植被火焰的电导率有所区别。上述因素的共同作用导致了不同植被火焰间隙击穿特性出现差异^[22]。根据植被化学组成成分的不同,不同植被对间隙击穿特性的影响的差异主要表现在以下两个方面:

1)相同尺寸的植被垛燃烧产生的火焰高度不同,从而对间隙的分区方式有一定的影响,其火焰形态和燃烧时间长短也存在一定的差异。

2)不同植被燃烧产生的火焰的温度和电导率不同,其散发出的烟雾的成分和浓度也不同,从而会使不同植被火焰体部分和烟雾部分的间隙击穿特性存在差异。

因植被燃烧在最大火势阶段跳闸风险最高,因此文中选取该阶段内的植被燃烧特征参数,分析其与间隙平均击穿电压梯度之间的影响。通过文献调研^[23-25],文中得到5种植被的灰分质量分数和可燃物热值,并综合试验所得火焰高度、火焰温度,得到南方电网典型高风险植被的燃烧特征参数,见表1。

表1 不同植被火焰燃烧特征参数

Table 1 Flame characteristics parameters of different vegetation

参数	云南松	水杉	速生桉	灌木	茅草
灰分质量分数/%	2.360	1.500	2.490	1.415	2.960
火焰最高温度/℃	829	812	721	498	304
火焰高度/m	2.2	2.3	1.7	2.0	2.0
可燃物热值/(kJ·g ⁻¹)	19.05	19.20	18.50	19.70	16.23

观察图4和图7中曲线,其变化规律均近似为线性,因此采用多元线性模型^[26-27]对上述4个影响因子进行分析,得到不同植被种类燃烧特征参数对火焰间隙击穿特性的影响。以火焰桥接比例100%和75%条件下的平均击穿电压梯度为例,分别得到其线性回归模型如下:

$$y_{100} = 2.19x_1 - 0.02x_2 - 1.89x_3 - 4.5x_4 + 164.88 \quad (1)$$

$$y_{75} = -18.34x_1 - 0.016x_2 - 10.15x_3 - 6.15x_4 + 240.03 \quad (2)$$

式(1)、(2)中: y_{100} 与 y_{75} 分别为100%和75%火焰桥接情况下的平均击穿电压梯度; x_1 为火焰高度; x_2 为

火焰最高温度; x_3 为灰分质量分数; x_4 为可燃物热值。拟合结果中式(1)、(2)的可决系数 R^2 为 1, 表明植被种类既能够影响火焰体的平均击穿电压梯度, 同时也可以影响非火焰体部分的平均击穿电压梯度, 且各影响因素与平均击穿电压梯度间的线性相关性较强, 可根据植被燃烧特征参数, 使用线性模型对其平均击穿电压梯度进行预测。

3.2 基于熵权法的植被燃烧特征参数权重判别

上节通过多元线性回归方法得到了火焰高度、火焰温度和灰分含量与平均击穿电压梯度之间的关系。为了进一步明确上述 4 个因素对平均击穿电压梯度的影响权重, 需要采用熵权法进行计算。

熵权法^[28]是按照评价体系中各指标的差异程度, 利用信息熵的方法计算出各指标的熵权, 通过熵权对评价指标的权重进行修正, 得到客观的指标权重。熵权法的基本流程为选择 n 个样本, 以及对应的 m 个指标, 将指标进行标准化处理, 然后计算各指标的信息熵, 再通过信息熵确定各指标的权重, 其主要计算式为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (3)$$

$$w_{ij} = \frac{1 - e_j}{-\frac{1}{\ln m} - \sum e_j} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: e_j 为某一指标的信息熵; p_{ij} 为第 j 项指标下第 i 方案指标值的比重; w_{ij} 为指标权重。根据课题组前期研究经验, 火焰高度、火焰温度、灰分质量分数和可燃物热值越高, 火焰间隙平均击穿电压梯度则越低, 因此设定 4 个影响因素均为负向指标^[29]。根据熵权法求得火焰高度权重为 0.21, 火焰温度比重为 0.32, 灰分质量分数为 0.19, 可燃物热值为 0.28, 因此可以得到在植被因素中, 植被火焰温度所占权重最高, 其对于平均击穿电压梯度的影响同样最大, 其次则为可燃物热值和火焰高度。

得到每个指标的权重后, 即可根据指标权重与指标数值的乘积之和得到各指标的综合评分, 在此基础上计算得到云南松的评分为 16.09, 水杉评分为 22.86, 速生桉评分为 42.68, 灌木评分为 49.34, 茅草评分为 70.76。由于文中采用负向指标评价, 因此上述 5 种植被中云南松的山火跳闸风险相对最高, 而茅草的山火跳闸风险相对最低。

4 结论

文中模拟植被火灾燃烧特征试验平台和模拟山火间隙击穿试验平台, 对云南松、水杉、速生桉、灌

木和茅草 5 种植被的火焰燃烧特征和平均间隙击穿电压梯度进行了测量。分别采用多元线性回归方法和熵权法对火焰高度、火焰温度、灰分质量分数和可燃物热值与平均击穿电压梯度之间的关系和各影响因素的权重进行了分析, 所得结论如下:

1) 不同种类植被火焰的高度、温度与燃烧时间均不相同, 其中植被燃烧火焰温度与其高度近似呈线性关系。在不同火焰间隙桥接比例下, 各植被火焰间隙的平均击穿电压梯度不同, 从高到低分别为云南松、水杉、速生桉、灌木和茅草, 表明植被种类对火焰间隙的击穿特性具有明显影响。

2) 多元线性回归结果表明, 火焰高度、火焰温度、灰分质量分数和可燃物热值 4 种植被参数与平均击穿电压梯度之间具有较为明显的线性关系, 可以通过植被参数对其平均击穿电压梯度进行预测。

3) 通过熵权法对火焰高度、火焰温度、灰分质量分数和可燃物热值 4 种植被参数的权重进行判别, 表明火焰温度所占权重最高, 可达 0.32, 而灰分质量分数相对最低, 为 0.19, 综合上述 4 种参数结果, 得到云南松的山火跳闸风险最高。

参考文献:

- [1] 刘世涛, 杨凯, 伍弘, 等. 基于多维信息特征映射的电网风险区段路径匹配模型研究[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 87-93.
LIU Shitao, YANG Kai, WU Hong, et al. Research on path matching model of power grid risk section based on multidimensional information feature mapping[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 87-93.
- [2] 宋耐超, 王瑞琦, 李明明, 等. 多自然灾害下的架空输电线路运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 65-71.
SONG Naichao, WANG Ruiqi, LI Mingming, et al. Risk assessment of overhead transmission lines under multiple natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 65-71.
- [3] 周恩泽, 黄勇, 陈洁, 等. 基于图模型的架空输电线路山火风险等级预测模型[J]. 南方电网技术, 2020, 14(4): 8-16.
ZHOU Enze, HUANG Yong, CHEN Jie, et al. Graph theory based fire risk prediction level model of overhead transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(4): 8-16.
- [4] ANAGNOSTATOS S D, HALEVIDIS C D, POLYKRATI A D, et al. High-voltage lines in fire environment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 2053-2054.
- [5] 李吉侗, 王洲, 达紫祺, 等. 计及恶劣天气时空相关性

- 的弹性配电网储能电站多层规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9):128-137.
- LI Jitong, WANG Zhou, DA Ziqi, et al. Multi-level planning method of energy storage stations for resilient distribution networks considering spatio-temporal correlation of severe weather[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9):128-137
- [6] 郭伯森, 李天友, 王连辉, 等. 基于层次分析法的中压配电线路森林火灾故障预警辨识模型[J]. 供用电, 2023, 40(3):55-62.
- GUO Bosen, LI Tianyou, WANG Lianhui, et al. An early warning evaluation model for forest fire faults in medium-voltage distribution lines based on analytic hierarchy process[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(3):55-62.
- [7] 王开正, 付一桐, 钱国超, 等. 基于时空上下文的输电线路山火自动识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18):83-91.
- WANG Kaizheng, FU Yitong, QIAN Guochao, et al. An automatic identification algorithm for wildfire occurrences near transmissionline corridors based on spatio-temporal context[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18):83-91
- [8] 舒胜文, 张深寿, 许 军, 等. 基于新一代天气雷达组网监测的输电线路山火自动识别算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13):4200-4208.
- SHU Shengwen, ZHANG Shenshou, XU Jun, et al. Study on automatic identification algorithm of wild fire near transmission lines based on CINRAD-net monitoring[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13):4200-4208.
- [9] 鞠冠章, 王靖然, 崔 琛, 等. 极端天气事件对新能源发电和电网运行影响研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(11):77-93.
- JU Guanzhang, WANG Jingran, CUI Chen, et al. Impact of extreme weather events on new energy power generation and power grid operation[J]. Smart Power, 2022, 50(11):77-93.
- [10] 王 建, 姚江宁, 刘泽青, 等. 恶劣天气下配电网故障统计分析及其概率分布拟合[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17):143-153.
- WANG Jian, YAO Jiangning, LIU Zeqing, et al. Fault statistical analysis and probability distribution fitting for a power distribution network in adverse weather conditions [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17):143-153.
- [11] 黄道春, 黎 鹏, 阮江军, 等. 山火引发输电线路间隙放电机理与击穿特性综述[J]. 高电压技术, 2015, 41(2):622-632.
- HUANG Daochun, LI Peng, RUAN Jiangjun, et al. Review on discharge mechanism and breakdown characteristics of transmission line gap under forest fire condition[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2):622-632.
- [12] 胡 毅, 刘 凯, 吴 田, 等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术, 2014, 40(11):3491-3499.
- HU Yi, LIU Kai, WU Tian, et al. Analysis of influential factors on operation safety of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11):3491-3499.
- [13] LANOIE R, MERCURE H P. Influence of forest fires on power line insulation[C]//Sixth International Symposium on High Voltage Engineering. New Orleans, LA, USA: ETDEWEB, 1989:1-4.
- [14] FONSECA J R, TAN A L, SILVA R P, et al. Effects of agricultural fires on the performance of overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2):687-694.
- [15] KGAKGAMATSO M, MAL H, RICHARD K, et al. Interferometric measurement of ionization in a grassfire[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2010, 106(2-3):191-203.
- [16] 王新宇, 杨朋威, 程 林, 等. 基于多目标约束的特高压直流配套火电接入系统升压变挡位选择方法及校验[J]. 变压器, 2022, 59(10):1-6.
- WANG Xinyu, YANG Pengwei, CHEGN Lin, et al. Step up transformer tap selection method and verification of UH-VDC supporting thermal power access system based on multi-objective constraints[J]. Transformer, 2022, 59(10):1-6.
- [17] 尤 飞, 陈海翔, 张林鹤, 等. 木垛火导致高压输电线路跳闸的模拟实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34):192-197.
- YOU Fei, CHEN Haixiang, ZHANG Linhe, et al. Experimental study on flashover of high-voltage transmission lines induced by wood crib fire[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34):192-197.
- [18] 周志宇, 艾 欣, 陆佳政, 等. 山火灾害引发的输电线路跳闸风险实时分析方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18):5321-5330.
- ZHOU Zhiyu, AI Xin, LU Jiazheng, et al. A real-time analysis approach and its application for transmission-line trip risk due to wildfire disaster[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18):5321-5330.
- [19] 普子恒, 阮江军, 黄道春, 等. 火焰条件下间隙的直流电压击穿特性研究[J]. 中国电机工程报, 2014, 34(3):453-459.
- PU Ziheng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on DC voltage breakdown characteristics of gap under fire conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3):453-459.
- [20] 黎 鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 典型植被火焰下导线-板间隙击穿特性及放电模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14):4001-4011.

- LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on breakdown characteristic and discharge model of conductor - plane gap under typical vegetation flame[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 4001-4011.
- [21] 李兆国, 瓮岳太, 石炳东, 等. 森林燃烧剩余物研究进展[J]. 世界林业研究, 2021, 34(2): 33-38.
- LI Zhaoguo, WENG Yuetai, SHI Bingdong, et al. Research progress in forest - fire residues[J]. World Forestry Research, 2021, 34(2): 33-38.
- [22] 闫想想, 王秋华, 李晓娜, 等. 昆明周边主要林型地表可燃物的燃烧特性研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(5): 135-142.
- YAN Xiangxiang, WANG Qiuhua, LI Xiaona, et al. Study on flammability of 7 typical tree species in southern China [J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2020, 40(5): 135-142.
- [23] 袁雨. 两种氧化预处理下不同植物生物质基质特性及酶解产糖差异研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- YUAN Yu. The study on difference in substrate characteristics and enzymatic hydrolysis performance of different plant biomass under two kinds of oxidation pretreatment[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [24] 王明峰, 徐建宇, 蒋恩臣, 等. 桉树木屑成型颗粒成分变化和热解特性研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 355-360.
- WANG Mingfeng, XU Jianyu, JIANG Enchen, et al. Study on composition change and pyrolysis properties of eucalyptus sawdust pellets[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(10): 355-360.
- [25] 张雨鉴, 宋娅丽, 王克勤, 等. 滇中亚高山人工林凋落物分解对模拟氮沉降的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2523-2532.
- ZHANG Yujian, SONG Yali, WANG Keqin, et al. Responses of litter decomposition in two subalpine plantations to simulated Nitrogen deposition in central Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2523-2532.
- [26] 王惠文, 孟洁. 多元线性回归的预测建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(4): 500-504.
- WANG Huiwen, MENG Jie. Predictive modeling on multivariate linear regression[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(4): 500-504.
- [27] 陈翔宇, 胡军. 基于多元线性回归的变电设备状态评价权重修正模型[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 14-19.
- CHEN Xiangyu, HU Jun. Weight correction model of condition assessment for substation equipment based on multiple linear regression method[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 14-19.
- [28] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1228.
- CHENG Qiyue. Structure entropy weight method to confirm of the weight of evaluating index[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2010, 30(7): 1225-1228.
- [29] 赵书涛, 李云鹏, 王二旭, 等. 基于电—振信号熵权特征的断路器储能机构故障诊断方法[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 204-210.
- ZHAO Shutao, LI Yunpeng, WANG Erxu, et al. Fault diagnosis method of circuit breaker energy storage mechanism based on electro - vibration signal entropy weight feature[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 204-210.
- 周恩泽(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电网防灾减灾、电力设备状态监测与故障诊断相关工作(E-mail: zhou_dky@163.com)。