

基于模拟实验和真实场景参数的山火输电线路间隙电场畸变特性分析

李磊¹, 张雷¹, 富梦迪¹, 黄登一¹, 林柏森², 周晓静², 谢从珍²

(1. 国家电网有限公司华北分部, 北京 100053; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 目前山火影响输电线路间隙电场的模拟研究中, 燃烧颗粒与导线间距和电场畸变效应的关系尚不明确, 同时没有考虑气象因素和植被特性对燃烧颗粒空间分布的影响。为此, 搭建了基于模拟实验和真实场景参数的热-流场-电-粒子运动多物理场强耦合优化仿真模型, 结合微观和宏观的角度分析山火导致输电线路电场畸变的内在机理。经过模型准确性验证, 所提出的模型能从微观程度模拟野外不同阶段的火焰燃烧和输电线路间隙的颗粒运动, 并为宏观角度分析植被特性以及气象因素对间隙绝缘性能影响提供理论支撑。结果表明: 发生山火时导线表面的电场约为未发生山火时的 7.14 倍; 燃烧颗粒与输电导线的间距会影响颗粒的电场畸变效应, 当间距在 0.2~0.15 m 时最大电场畸变比和畸变范围开始显著上升并逐渐趋于稳定。植被特性以及气象因素通过改变燃烧颗粒在山火间隙的空间分布进而影响间隙的绝缘性能。研究成果有助于评估输电线路在山火灾害下的安全性, 为应急响应策略提供理论依据。

关键词: 输电线路; 山火; 燃烧颗粒; 电场畸变; 粒子运动

Analysis of Electric Field Distortion Characteristics in Power Line Gaps During Wildfires Based on Simulation Experiments and Real-Scenario Parameters

LI Lei¹, ZHANG Lei¹, FU Mengdi¹, HUANG Dengyi¹, LIN Baisen², ZHOU Xiaojing², XIE Congzhen²

(1. State Grid Company Limited North China branch, Beijing 100053, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In current simulation studies on the impact of wildfires on the electric field of transmission line gaps, the relationship between burning particles and conductor spacing, as well as the electric field distortion effect, remains unclear. Additionally, the influence of meteorological factors and vegetation characteristics on the spatial distribution of burning particles has not been considered. To address this, a highly coupled multi-physics optimization simulation model integrating thermal, flow field, electric, and particle motion is developed based on simulated experiments and real-scenario parameters. This model combines micro- and macro-scale perspectives to analyze the intrinsic mechanisms of electric field distortion in transmission lines caused by wildfires. After verifying the model's accuracy, the proposed model can simulate flame combustion at different stages of wildfires and particle motion in transmission line gaps at a microscopic level, while also providing theoretical support for macro-scale analysis of the influence of vegetation characteristics and meteorological factors on gap insulation performance. The results show that the electric field on the conductor surface during a wildfire is approximately 7.14 times that under normal conditions. The spacing between burning particles and transmission conductors affects the electric field distortion effect, with the maximum distortion ratio and range beginning to rise significantly and gradually stabilizing when the spacing is between 0.2 and 0.15 meters. Vegetation characteristics and meteorological factors influence the insulation performance of the gap by altering the spatial distribution of burning particles in wildfire gaps. The research findings contribute to evaluating the safety of transmission lines during wildfire disasters and provide a theoretical basis for emergency response strategies.

Key words: transmission lines; wildfire; combustion particles; electric field distortion; particle motion

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977084)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51977084).

0 引言

因我国超特高压线路多架设于野外,难免穿越植被茂密、人烟稀少的山火易发区域。全球范围内,植被火灾引发的线路跳闸事故每年均频繁发生^[1-4]。我国同样是输电线路跳闸事故的高发地区,据文献统计^[3-5],2015—2019年间,南方电网因植被山火导致的输电线路跳闸事故达304次,成功重合闸率为41.4%;2010年1月至2018年2月,湖南电网输电线路的山火告警信息高达4837条,山火跳闸事故126条次,其成功重合率仅为33.3%,远低于雷击故障的重合闸成功率。

已有大量学者采用机器学习方法开展输电线路山火风险评估研究^[5-8],而深入探究山火导致线路间隙击穿的内在机理有助于进一步提升算法模型的评估效果。现有研究表明^[9],输电走廊内的植被富含大量无机盐,燃烧时会释放大量的带电粒子,同时使灰烬颗粒携带大量电荷。这些高荷电量的燃烧颗粒会在输电线路附近形成颗粒链,严重畸变空间电场,最终导致间隙击穿,这也是山火引发线路跳闸的主要原因^[10]。

近年来,文献[11-16]通过搭建模拟实验平台,探究了植被燃烧颗粒对输电线路间隙击穿的影响。文献[11]对比3种植被模拟燃烧的实验结果后证实,燃烧颗粒可使棒-板间隙的击穿电压降至纯空气环境下的29%。文献[12]针对不同植被火焰下间隙的泄漏电流展开研究,认为叶状植被火焰对间隙绝缘强度的影响大于根状与垛状植被火焰。此外,文献[13-17]还统计了间隙温度分布、不同植被燃烧的热释放速率、燃烧颗粒的粒径大小及运动速度等数据,为建立仿真计算模型提供了参考。

由于观测手段的限制,颗粒的运动轨迹难以精准捕捉,文献[17-21]主要采用数值计算方法展开研究。文献[17]构建了山火条件下特高压直流输电线路合成电场的数学模型,通过仿真分析电荷数密度、颗粒物等因素对特高压直流输电线路电场的影响,指出固体颗粒的长轴与短轴长度会作用于电场畸变效应,但该研究仅考虑了电荷数密度变化时颗粒物对合成电场的影响,且未探究火焰对流作用对燃烧颗粒运动规律及分布特性的影响,因此难以通过该模型解析山火环境下输电线路间隙各物理量间的复杂关联。文献[18]通过搭建多物理场耦合的二维轴

对称模型,探究了颗粒相对介电常数与粒径对间隙电场的畸变作用,认为燃烧颗粒的运动存在显著极性效应,但该模型的湍流控制方程采用传统RNG $k-\varepsilon$ 模型,在中心火焰区域的计算精度较低;同时,模型在颗粒表面设置固定数量和极性的电荷,忽略了空间中带电粒子对合成电场的影响,因此无法准确表征真实山火环境下颗粒的电荷迁移过程。文献[19]发现山火输电线路间隙内不同荷质比与不同粒径颗粒的分布特性存在差异,但颗粒在间隙运动过程中,其极性与携带电荷量仍保持相对固定,导致燃烧颗粒与带电粒子之间的关系处于独立状态,难以深入研究二者对空间电场的协同作用。此外,现有研究未考虑植被特性与环境因素对电场畸变的影响,相关结论难以有效指导实际工程应用。因此,有必要结合模拟实验参数与真实场景参数搭建仿真模型,对交直流间隙电场的畸变特性开展数值分析。

综上所述,本文构建了山火条件下多物理场耦合的燃烧颗粒优化仿真模型。首先,基于模拟实验参数的仿真结果,从微观层面分析了灰烬颗粒相关物理量的变化及其对间隙电场的影响;其次,结合真实场景参数的仿真结果,从宏观层面剖析了植被特性与气象因素对间隙绝缘性能的作用。

1 模型机制和模型的搭建

1.1 数学模型基础

1.1.1 气体的湍流控制方程

目前模拟山火燃烧的方式主要有两种^[18-21],分别为设置热释放速率和利用化学反应的耦合机制。由于目前缺乏针对输电走廊典型植被组分热解反应速率的研究,同时在包含真实场景参数的三维仿真环境下搭建自洽的燃烧反应体系存在较大难度,因此本文采用设置热释放速率的方式模拟山火燃烧。

火焰的燃烧流体通常呈现湍流流动特性^[18],因此本文采用standard $k-\omega$ 模型对流体运动进行模拟。相较于目前应用广泛的RNG $k-\varepsilon$ 模型^[18-21],standard k -模型在处理火焰区域逆压梯度较大的流体运动时表现更优,计算精度更高,能够更准确地刻画射流火焰高速不规则的流动状态。

该模型对应的 k 方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; u_j 为流体各方向的速度 ($j=1, 2, 3$); μ 为动力黏度; μ_t 为模型参数; k 为湍动能; σ_k 为湍流普朗特系数; G_k 为平均速度梯度产生的湍流动能; Y_k 为输运方程耗散项; x_i, x_j 分别为第 i 和 j 个方向的位置坐标 ($i, j=1, 2, 3$)。

该模型对应的 ω 方程为:

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} G_k + Y_\omega \quad (2)$$

式中: ω 为比耗散率; σ_ω 为湍流普朗特系数; Y_ω 为输运方程耗散项; α 为模型参数。

1.1.2 颗粒受力控制方程

如图 1 所示, 在采用离散相对气固流动中的颗粒运动进行分析时, 仅考虑流体曳力、重力及电场力的作用。由于燃烧颗粒物大多从植被中心区域释放, 且受热对流影响, 其运动方向以垂直向上为主^[22], y 轴方向的受力远大于 x 轴方向, 因此本文仅针对 y 轴方向对颗粒开展受力分析。

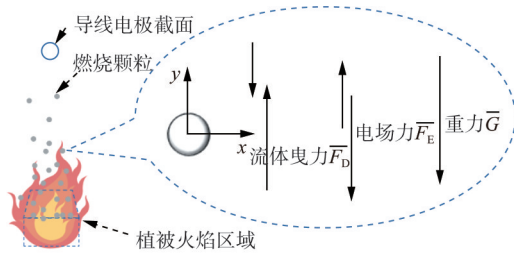


图 1 颗粒在间隙运动受力分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of particle movement force analysis in gap

颗粒的荷电量 Q 与背景电场 E_0 共同决定了电场力的大小 F_E , 具体表达式为:

$$F_E = QE_0 \quad (3)$$

在不均匀带电粒子浓度的影响下, Q 与饱和电荷量 Q_s 之间的关系与颗粒物和导线的距离 d 相关, 这一关系可通过修正函数 $\beta(d)$ 来表示, 具体如下。

$$Q = \beta(d)Q_s \quad (4)$$

$$Q_s = \frac{3\varepsilon_i}{\varepsilon_i + 2} E_0 \pi \varepsilon_0 d_t^2 \quad (5)$$

式中: ε_i 为颗粒内部区域(inner)的相对介电常数; ε_0 为空气间隙流域的相对介电常数; E_0 为背景电场强度; d_t 为颗粒的粒径。

由于本文考虑的燃烧颗粒粒径较大, 因此采用 Oseen 修正的斯托克斯曳力公式计算其受到的流体

曳力 F_D , 具体可表示为:

$$\overline{F_D} = \frac{3m_r C_o (u - v) |u - v|}{4\rho_r d_t} \quad (6)$$

式中: m_r 为颗粒的质量; u 和 v 分别为流体速度和颗粒运动速度; ρ_r 为颗粒密度; C_o 为 Oseen 修正系数, 和颗粒物的雷诺数相关。

颗粒自身重力 G 方向指向地面, 大小为:

$$G = m_r g \quad (7)$$

式中 g 为重力加速度。

颗粒运动的受力控制方程为:

$$m_r \frac{\partial u}{\partial t} = \overline{F_E} + \overline{F_D} + \overline{G} \quad (8)$$

式中 $\overline{G}$ 为重力的值。

1.1.3 环境湿度对热源强度影响的数学模型

环境湿度会使植被燃烧过程变得复杂。水分会导致燃烧反应的反应物浓度降低, 减少与氧气的接触面积, 同时植被组分需要消耗更多能量用于水分的加热和蒸发, 因此植被燃烧过程会变得异常困难。

结合文献[1]的研究结论, 假设空气绝对湿度对植被热释放速率影响的修正系数 K_h 为:

$$K_h = k^w \quad (9)$$

式中: w 为修正指数, 与间隙长度有关, 模拟实验参数简化取 1, 真实参数模型取 0.98; k 为湿度修正底数, 可具体表示为:

$$k = 1 + 0.114 \left(\frac{h}{p} - 10.26 \right) \quad (10)$$

式中: h 为绝对湿度; p 为空气与颗粒物混合的烟气密度。

1.2 仿真模型搭建

1.2.1 多物理场耦合机制

本文仿真模型的多物理场耦合机制如图 2 所示。间隙流体的流动会引发温度变化, 而火焰的高温又会改变间隙空气的性质, 二者通过非等温流动形成流-热耦合场, 以流体电力的形式作用于燃烧颗粒。研究表明^[17], 植被燃烧产生的高浓度带电粒子与间隙击穿过程密切相关, 且火焰流体与间隙畸变电场均具有一定的震荡特性。可以认为, 空间电场通过影响带电粒子的运动状态来改变流体的流动速度, 而间隙流体的流动也会调整带电粒子的空间分布, 进而对初始背景电场产生影响, 二者形成流-电耦合场, 以电场力的形式作用于燃烧颗粒。

此外,燃烧颗粒还受到自身重力的作用。颗粒的受力情况决定了其空间位置及携带电荷量。

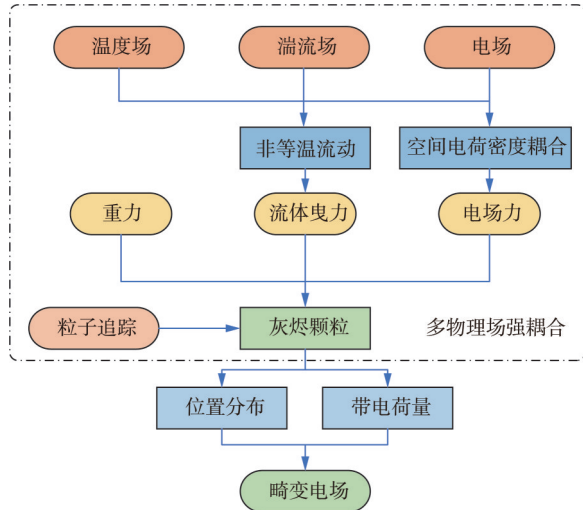


图2 多物理场耦合计算机制

Fig. 2 Multi-physics coupling calculation mechanism

本文构建了温度场-流场-电场-粒子运动强耦合的数值仿真模型,通过计算不同工况下燃烧颗粒的时空分布推导出间隙的畸变电场,并从微观与宏观双重视角分析山火导致输电线路电场畸变的内在机理。

1.2.2 物理模型

考虑到多物理场强耦合模型存在计算资源消耗大、模型收敛困难以及计算结果准确性与网格质量难以平衡等问题,本文的物理模型搭建分为模拟实验参数模型和真实场景参数模型两部分。如图3所示,为满足微观层面研究山火影响下输电线路电场畸变机理的需求,暂不考虑风速、坡度、湿度和植被类型等外部环境因素的影响,将导线电缆区域、大地区域、火焰区域、植被区域及空气区域简化为轴对称形式,并采用三维空间维度进行分析。

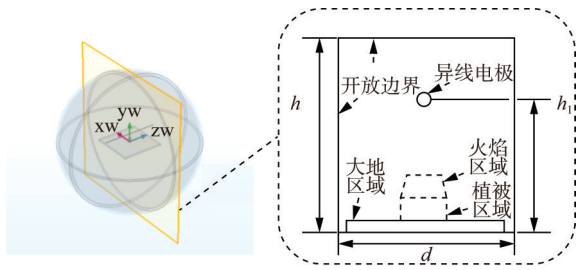


图3 模拟实验参数三维仿真模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 3D simulation model for scaling parameters

模型参数、热源参数、热释放速率修正系数及电荷量修正系数参考了研究^[13-16]的统计数据。本文仅考虑粒径为0.2~5 mm、相对介电常数为5~100的小固体燃烧颗粒。由于植被表面是火源的直接作用区域,其灰烬释放行为最为显著^[23],因此将颗粒释放入口设置为圆台表面。

几何参数:导线与植被间距 $h_1=0.5$ m,导线的曲率半径参考实际架空输电线路参数以及模拟实验参数进行等比缩放,计算空气域设置为宽度0.8 m高1 m的矩形,底部植被区域设置为0.21 m×0.21 m×0.1 m的圆柱,等效火焰体区域设置为上底直径为0.14 m,下底直径为0.21 m,高为0.1 m的等腰圆台,地面区域设置为高0.1 m的长方体,空间流体属性为弱可压缩流动,温度初始值设置为293.15 K。

如图4所示,本文结合实际交流输电线路参数及环境影响因素(植被类型、自然风向与湿度)搭建真实场景参数模型。建模采用二维轴对称空间维度,在不影响物理现象捕捉的前提下减少计算量,提升计算效率。鉴于杆塔为对称结构且双回路间距较大,不同回路间的影响可忽略不计,仅需对一组回路开展仿真建模。为更好地分析气象因素对山火环境下输电线路间隙颗粒运动的影响,本文模拟极端大风气象条件,自然风向固定为从右向左,风速参考真实平均自然风速。由于实际火焰存在不对称性,本文将流-热耦合结果中的不对称分量作为V扰,加入 x 轴风速表达式中进行合理简化。因地线通常处于最高地理高程,山火导致导线与地线间隙放电的事故极少,物理模型部分可省略地线建模步骤。常规8分裂导线结构易引发网格划分局部畸变,故将八分裂导线截面等效为圆形截面,以八边形截面的对角线作为圆形等效区域的直径。依据杉木的自然生长形态,将其区域划分为树干区与树冠区,并设置不同的热释放速率。目前我国杉木林地的个体间距较大,难以形成蔓延性山火,因此杉木区域相对偏细长。由于芦苇和秸秆各组分燃烧的热释放速率差异不大,可将平均热释放速率作为整体热源;且二者为集群生长,燃烧火焰呈蔓延型,因此芦苇和秸秆区域相对扁平。

几何参数设定如下: h 取值70 m, d 取值10 m; h_1 设置为18 m, h_2 设置为21 m, h_3 设置为21 m; d_1 设置为1.2 m, d_2 设置为1 m;导线等效半径设置为0.522 63 m。杉木枝干区域为宽4 m、高7 m的矩

形；树冠区域为上底 3 m、高 2 m 的等腰梯形；秸秆区域为宽 8.75 m、高 1.5 m 的矩形；芦苇区域为宽 7 m、高 3 m 的矩形。

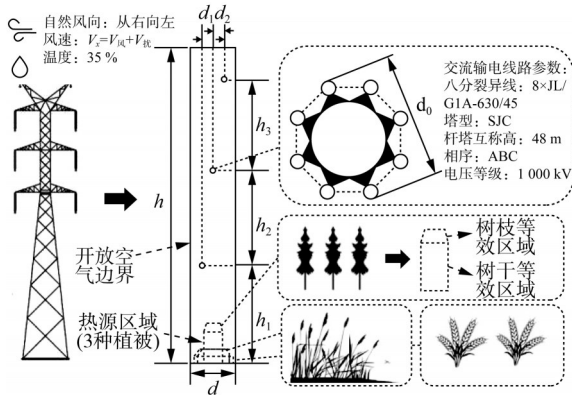


图 4 真实场景参数模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of real scene parameters model

1.2.3 基于火焰形态的网格方案

文献[17-21]通过预判物理场的大致分布，在物理量变化剧烈的区域进行网格精细化处理，其余区域则适当加粗网格。为提升仿真计算的准确度，本文提出基于火焰形态的网格划分方案。如图 5 所示，以模拟实验参数的仿真模型为例，通过对比流-热耦合场的仿真结果确定大致的火焰形态，随后手动添加网格划分线以设置不同精度的区域（真实场景参数模型的网格方案按等比例放大）。

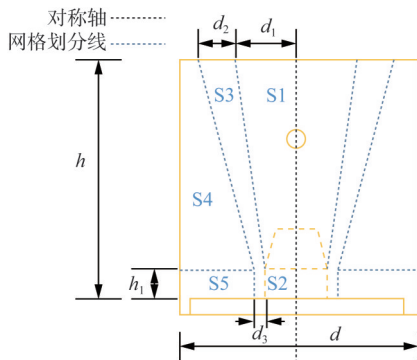


图 5 网格划分示意图

Fig. 5 Grid division diagram

具体的几何参数如式(11)所示。

$$\begin{cases} d_1 = 0.07 + (h - d_3 + 0.15h_1) \tan\left(\frac{\pi}{180}\right) \\ d_2 = 0.07 + d_3 + (h - d_3 + 0.15h_1) \tan\left(\frac{\pi}{36}\right) \\ d_3 = 0.02, h_1 = 0.1 \end{cases} \quad (11)$$

式中： d_1 、 d_2 、 d_3 分别为相对于对称轴设置的三组水平特征尺寸，依次对应外层火焰影响区边界、内层高梯度加密区边界以及底部近火源加密区边界； h 和 h_1 分别为整体网格划分区域和近地面局部加密区域的竖向特征高度。

如图 6 和表 1 所示，随着网格不断细化，计算精度提升幅度逐渐减小，但是仿真计算时间大幅增加，因此本文最终采用 52 800 个域单元的网格方案。

本文模拟实验参数仿真模型的计算总耗时为 26 h 32 min 44 s，真实场景参数仿真模型的计算总耗时为 59 h 47 min 25 s，计算耗时满足模型调控和数据分析需求。本文网格方案网格单元参数（长：宽）为：区域 S1 最大网格为 0.005 m，最小网格为 1.5×10^{-5} m，单元增长率为 1.1；区域 S2 单元映射为 20 : 20，大小比为 200 : 4；区域 S3 单元映射为 200 : 20，大小比为 250 : 4；区域 S4 单元映射为 200 : 20，大小比为 250 : 400；区域 S5 单元映射为 20 : 20，大小比为 200 : 400。

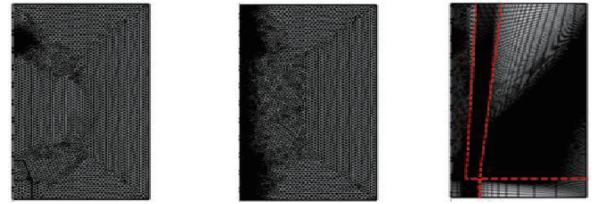


图 6 xy 截面网格剖分示意图

Fig. 6 xy cross section grid distribution diagram

1.1.1 模型准确性验证

由图 7—8 可见，本文构建的仿真模型能够模拟野外植被在不同燃烧阶段的过程。其仿真结果既符合火焰温度分区的相关结论^[24]，又与文献[19]中模拟燃烧试验的统计数据呈现出一致的变化趋势和相近的幅值，这验证了该仿真模型在燃烧模拟方面的准确性与实用性。 $t=1.15$ s 时火焰间隙内颗粒的分布情况如图 9 所示：颗粒刚脱离植被表面时，受对流作用影响，速度持续上升；随着轴向高度增加，流体速度逐渐下降，灰烬以减速状态向导线靠近；当灰烬进一步接近导线时，在吸引力作用下速度迅速增大，部分颗粒能够附着于导线表面，另一部分则进入导线上方的流域。

对 $t=1.15$ s 时刻所有颗粒的运动速度分布区间进行统计。如表 2 所示，超过 70 % 的颗粒运动速度

表 1 网格质量及流-热耦合场计算效率对比
Tab. 1 Comparison of mesh qualities and computational efficiencies

划分情况	网格域单元	网格边界单元	网格的平均单元质量
根据几何手动划分	3 423	191	0.924 3
根据结果手动划分	13 200	580	0.834 9
根据结果手动细分	52 800	1 160	0.836 3
根据结果手动更细分	118 800	1 740	0.836 8

划分情况	网格单元质量	结果变化比/%	计算时间
根据几何手动划分	0.522 5	12. 1	2 h 4 min 31 s
根据结果手动划分	0.288 7	15. 7	3 h 23 min 12 s
根据结果手动细分	0.290 6	16. 2	4 h 57 min 13 s
根据结果手动更细分	0.291 2	<16. 3	7 h 31 mis 29 s

在1~3 m/s 范围内, 其平均运动速度大小为2.14 m/s. 文献[13]中实验观测到颗粒不同位置的运动速度为2.15 m/s、2.25 m/s 和1.78 m/s, 与本文计算出的平均速率误差不超过8.3%; 与文献[17]的仿真模型对比, 准确率提高了近7.7%, 进一步说明了本文模型的可靠性。

2 仿真结果分析

2.1 模拟实验参数仿真结果分析

未发生山火时原始背景电场分布如图10(a)所示。可以看出, 间隙位置与输电导线的距离越近, 背景电场强度越大, 且这一上升趋势呈指数形式, 在输电导线表面达到峰值, 为 1.86×10^6 V/m。山火稳定燃烧阶段的畸变电场分布如图10(b)所示, 此时随流体运动的电子和离子加剧了间隙背景电场的不均匀性, 同时燃烧颗粒导致其周围场强急剧增大, 在颗粒表面达到峰值 6.49×10^6 V/m, 约为未发生山火时的7.14倍, 显著降低了间隙的绝缘强度。

本文依据文献[13-14, 18, 25-26], 采用以下两个指标表征电场畸变效应: 1)燃烧颗粒轴线方向电场畸变范围: 山火发生时, 燃烧颗粒畸变电场与

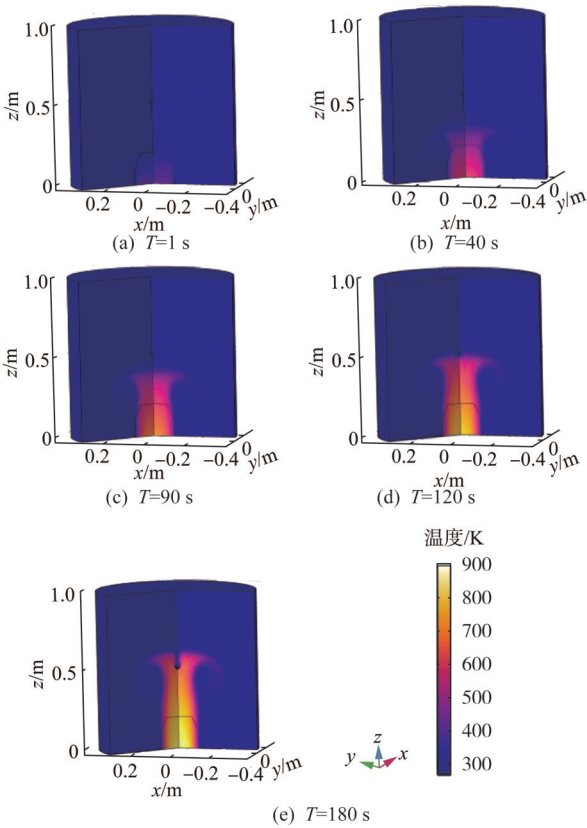


图7 不同时刻的三维截面温度热力图

Fig. 7 Three dimensional cross-section temperature thermal maps at different times

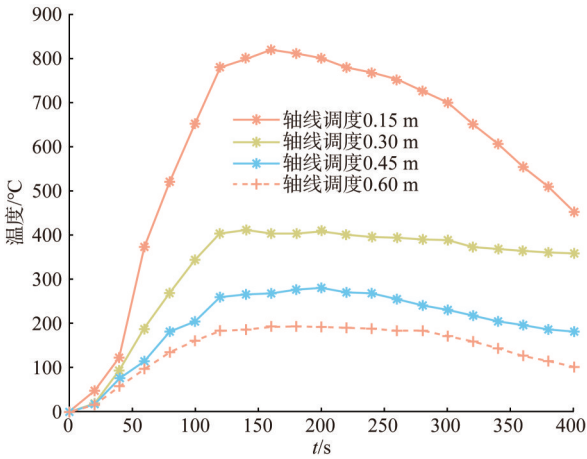


图8 对称轴不同高度温度随时间的变化关系

Fig. 8 Variation of temperatures at different heights of symmetry axis with time

无燃烧颗粒初始电场相差2%的两点间距; 2)最大电场畸变比: 燃烧颗粒轴线方向畸变场强与初始场强的比值。

如图11和12所示, 燃烧颗粒与输电导线的间距会对电场畸变效应产生影响。当间距处于0.25~0.2

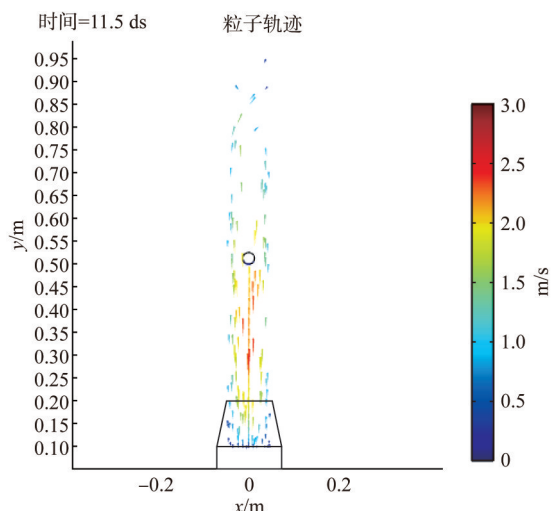


图9 $t=1.15$ s时仿真模型xy截面燃烧颗粒物分布图

Fig. 9 When $t=1.15$ s, combustion particle distribution in xy section of simulation model

表2 颗粒运动速度分布统计图

Tab. 2 Statistical diagram of particle velocity distribution

运动速度大小 $v/(m \cdot s^{-1})$	所占比例/%
$0 \leq v < 1$	9.10
$1 \leq v < 2$	12.50
$2 \leq v < 3$	56.50
$3 \leq v < 3.5$	21.80

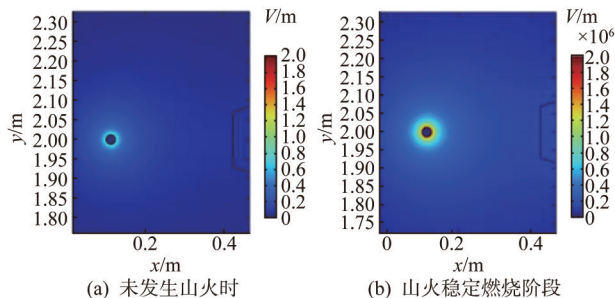


图10 模拟实验参数仿真结果的截面间隙电场分布

Fig. 10 Cross section gap electric field distribution of the simulation results of simulation experiment parameters

m时最大电场畸变比呈下降趋势,但变化幅度较小;当间距在0.2~0.15 m时最大电场畸变比开始显著上升;当间距处于0.15~0.05 m时最大电场畸变比趋于稳定。电场畸变范围的变化规律与之类似,仅幅度更大且存在一定延迟性。这是由于导线周围的带电粒子分布不均匀,燃烧颗粒向导线运动时,携带电荷量逐渐增大直至达到饱和值,因此产生的电场畸变效应不断加剧,最终趋于稳定。由此可推测,当燃烧颗粒与导线的距离为0.15 m时能够与外部环

境充分进行电荷交换并进入饱和荷电状态。

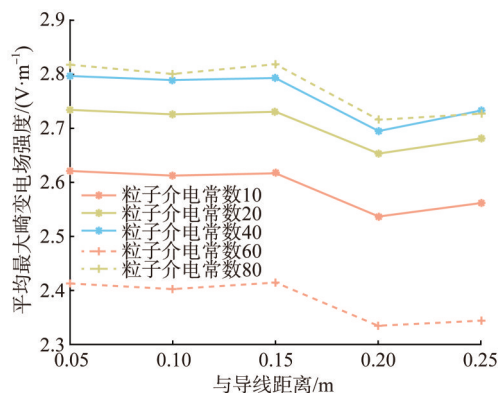


图11 颗粒与输电导线间距和最大畸变电场强比的关系

Fig. 11 Relationship between particle and transmission wire spaces and the maximum distortion field intensity ratios

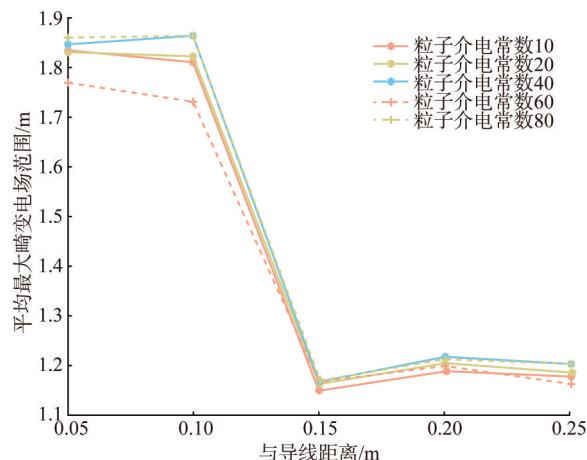


图12 颗粒与输电导线的间距和电场畸变范围的关系

Fig. 12 Relationship between combustion particles and the distance of transmission wire and the range of electric field distortion

2.2 真实场景参数仿真结果分析

在真实的山火燃烧过程中,植被类型与气象因素均会影响山火的燃烧强度及燃烧颗粒的运动轨迹。

首先分析植被类型对颗粒空间分布的影响。图13展示了考虑气象因素作用下,输电走廊内4种典型植被(秸秆、芦苇、杉木、油松)引发山火时,1 000 kV交流输电线路间隙中颗粒运动的仿真结果。从植被区域附近的颗粒分布可见,仅植被中心区域释放的颗粒能被高速热上升气流推送至高空,而植被边缘的颗粒则残留于灰烬之中。从颗粒整体空间分布来看,由于灌木自然生长高度较低,且燃烧反应强度弱于乔木,即便其引发的蔓延型山火燃

烧面积更大、颗粒物释放密度更高,最终进入导线附近区域的颗粒数量仍相对较少。只有当颗粒与导线距离足够近时,畸变的电场强度才会达到触发放电的击穿场强阈值,此时局部放电不断增强,进而出现局部电晕放电现象,最终导致间隙发生电气击穿。因此,当输电线路周边植被为灌木时,线路发生山火跳闸故障的可能性较低。

相比之下,乔木虽难以引发蔓延型山火,但因其自然生长高度较高(成年杉木和油松最高可达25~30 m),且燃烧反应更为剧烈,大量燃烧颗粒物会接近甚至粘附于导线表面。这不仅会严重畸变导线周围的电场,还会降低导线表面材料的绝缘性能,使输电线路更易发生跳闸事故,这与文献[2]的事故统计结果一致。与杉木相比,油松的自然生长高度更高、个体占地面积更大,且组分含油量更高、燃烧更剧烈,因此油松燃烧产生的大粒径颗粒更易分布在导线附近及其上方区域,对线路安全的威胁更大。

如果植被区域与导线距离足够近,致使秸秆和芦苇产生的颗粒物同样能抵达导线周围,那么在颗粒物对间隙放电的影响方面,灌木燃烧产生的颗粒影响要比乔木更大。这是因为当颗粒物的空间密度更高时,颗粒间的距离更小,放电更易在颗粒之间逐级发展:流注被下一个颗粒捕获并形成电弧,在电场作用下,颗粒与高压导线之间、颗粒与颗粒之间触发放电形成的电弧,会使火焰上端与电线的间隙部分短接,最终导致间隙的绝缘程度大幅下降。

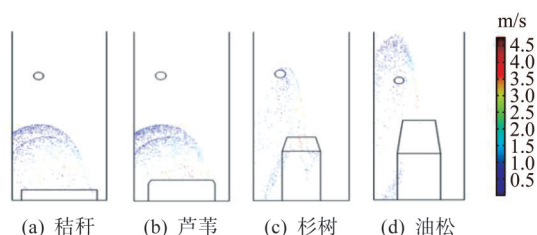
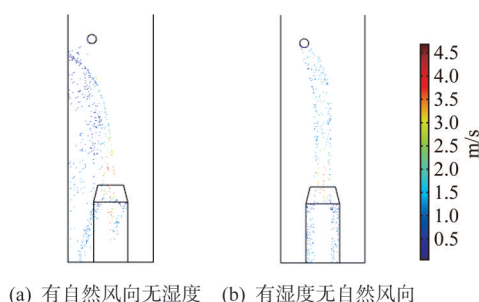


图13 4种植被燃烧颗粒运动分布图

Fig. 13 Movement distribution diagram of four planted burned particles

随后分析气象因素对颗粒空间分布的影响。图14展示了不同工况下杉木燃烧颗粒的空间分布图。结合图14(a)与图13(c)可见绝对湿度的降低减弱了燃烧强度与火焰流体速度,致使颗粒整体空间分布下移,减少了进入高空的粒子数量,进而削弱了电

场畸变效应。由此可推断,在夏秋等湿度较小且温度较高的季节,输电线路因山火跳闸的风险较大,这与文献[2]中山火跳闸事故的统计结果一致。结合图14(b)与图13(c)可见,当无水平风向作用时颗粒在接近导线时更易因电场力的吸引而吸附于导线表面;而实际三维环境中的自然风向复杂多变,颗粒更可能被扩散至远离导线的位置,且颗粒间距离增大,电场作用下由颗粒链触发的放电电弧难以形成,因此放电难以在燃烧颗粒间逐级发展,从而降低了间隙击穿放电的风险。



(a) 有自然风向无湿度 (b) 有湿度无自然风向

图14 不同工况下杉木燃烧颗粒空间分布图

Fig. 14 Spatial distribution diagram of Chinese fir combustion particles under different working conditions

3 结论

针对目前山火线路间隙放电研究工作的不足,本文搭建了基于多物理场耦合的间隙燃烧颗粒运动与电场分布优化仿真模型,并结合直流模拟实验参数及华北地区1 000 kV交流输电线路场景数据(含植被与气象数据)开展仿真模拟计算。基于仿真结果中的颗粒运动与电场分布特征,主要结论如下。

1)在带电粒子与燃烧颗粒的共同作用下,输电导线附近区域的电场畸变程度达到初始值的7.14倍。

2)燃烧颗粒进入间隙后并非始终处于饱和荷电状态,其与输电导线的间距会影响电场畸变效应。当间距处于0.2~0.15 m范围时最大电场畸变比及畸变范围开始显著上升并逐渐趋于稳定;若不考虑电荷传递损失与中和效应,当间距为0.15 m时颗粒进入饱和荷电状态。

3)植被特性与气象因素会显著影响山火间隙燃烧颗粒的空间分布。乔木燃烧颗粒对间隙绝缘性能的影响大于灌木,而灌木燃烧引发的蔓延型山火会释放更密集的燃烧颗粒,导致输电线路间隙的短接

风险增大。

参考文献

- [1] 周恩泽, 樊灵孟, 黄勇, 等. 基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸风险分布评估[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2778 – 2785.
ZHOU Enze, FAN Lingmeng, HUANG Yong, et al. Fire trip risk distribution assessment of transmission lines based on flame combustion model [J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2778 – 2785.
- [2] 周恩泽, 龚博, 刘淑琴, 等. 南方电网架空线路因山火跳闸故障统计分析[J]. 广东电力, 2022, 35(4): 80 – 86.
ZHOU Enze, GONG Bo, LIU Shuqin, et al. Statistical Analysis of overhead line trip fault due to mountain fire in China Southern Power Grid [J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(4): 80 – 86.
- [3] 周特军, 吴传平, 陈海翔, 等. 湖南电网输电线路山火跳闸时空分布规律[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(3): 417 – 420.
ZHOU Tejun, WU Chuanping, CHEN Haixiang, et al. Temporal and spatial distribution of mountain fire trip of transmission lines in Hunan Power Grid [J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(3): 417 – 420.
- [4] 谢从珍, 周晓静, 余松, 等. 基于先验知识与孪生网络监督的输电线路山火跳闸预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(21): 72 – 83.
XIE Congzhen, ZHOU Xiaojing, YU Song, et al. Wildfire-induced transmission line trip prediction model based on prior knowledge and Siamese network supervision [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(21): 72 – 83.
- [5] 刘晖, 向淳, 周恩泽, 等. 基于动态贝叶斯网络的输电走廊山火风险时空评估[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 148 – 158.
LIU Hui, XIANG Zhen, ZHOU Enze, et al. Temporal and spatial assessment of mountain fire risk in transmission corridor based on dynamic Bayesian networks [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 148 – 158.
- [6] 周恩泽, 黄勇, 向淳, 等. 基于物元可拓的输电线路山火风险评估模型[J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 145 – 154.
ZHOU Enze, HUANG Yong, XIANG Zhun, et al. Mountain fire risk assessment model of transmission line based on matter-element extension [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 145 – 154.
- [7] 周恩泽, 黄勇, 龚博, 等. 基于朴素贝叶斯网络的输电走廊山火风险评估模型[J]. 南方电网技术, 2021, 15(8): 120 – 129.
ZHOU Enze, HUANG Yong, GONG Bo, et al. Mountain fire risk assessment model of transmission corridor based on Naive Bayesian network [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(8): 120 – 129.
- [8] 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. Mountain fire risk level prediction model for overhead transmission lines based on graph model [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(4): 8 – 16.
- [9] MPHALE K M, HERON M, KETLHWAFAFETSE R, et al. Interferometric measurement of ionization in a grassfire [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2010, 106(3): 191 – 203.
- [10] 龙明洋, 黄道春, 黎鹏, 等. 典型植被灰烬颗粒对导线-板间隙放电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 627 – 633.
LONG Mingyang, HUANG Daochun, LI Peng, et al. Effect of typical vegetation ash particles on wire-plate gap discharge characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 627 – 633.
- [11] 黄道春, 卢威, 阮江军, 等. 典型植被燃烧灰烬对导线-板间隙直流击穿特性的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1668 – 1674.
HUANG Daochun, LU Wei, RUAN Jiangjun, et al. Effect of typical vegetation burning ash on DC breakdown characteristics of wire-board gap [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1668 – 1674.
- [12] 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. Research on gap breakdown characteristics and discharge model of wire plate under typical vegetation flame [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 4001 – 4011.
- [13] PU Z, ZHOU C, XIONG Y, et al. Two dimensional axisymmetric simulation analysis of vegetation combustion particles movement in flame gap under DC voltage [J]. Energies, 2019, 12(19): 3596.
- [14] 普子恒, 阮江军, 吴田, 等. 火焰中颗粒对间隙放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 103 – 110.
PU Ziheng, RUAN Jiangjun, WU Tian, et al. Effect of particles in flame on gap discharge characteristics [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 103 – 110.
- [15] ROBLEDO-MARTINEZ A, GUZMAN E, HERNANDEZ J L. Dielectric characteristics of a model transmission line in the presence of fire [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(4): 776 – 782.
- [16] 杨长河, 李劲, 刘宗辉. 高占空比颗粒电场荷电的计算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006(1): 53 – 56.
YANG Changhe, LI Jin, LIU Zonghui. Calculation of particle electric field charge with high duty ratio [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006(1): 53 – 56.
- [17] 祝贺, 刘程. 山火对±800kV输电线路下电场影响的仿真分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(6): 15 – 21.
ZHU He, LIU Cheng. Simulation analysis of effect of mountain fire on electric field under ±800 kV transmission line [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(6): 15 – 21.
- [18] ZHOU C, XIAO D, BAO Y. Numerical analysis of the motion characteristics of combustion particles in gap based on multi-physical field coupling [C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment, April 11 – 15, 2021, Chongqing, China. New York: IEEE, 2021.
- [19] 普子恒, 王子鸣, 史星涛, 等. 直流电压下燃烧颗粒在间隙中的运动和分布规律[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 612 – 619.
PU Ziheng, WANG Ziming, SHI Xingtao, et al. Motion and distribution of combustion particles in gap under DC voltage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 35(S2): 612 – 619.
- [20] 普子恒, 张隆, 叶宽, 等. 考虑化学反应强耦合的植被火焰条

- 件下直流间隙多物理场耦合模型[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 536 – 545.
- PU Ziheng, ZHANG Long, YE Kuan, et al. DC gap multi-physical field coupling model under vegetation flame condition considering strong coupling of chemical reactions [J]. High Voltage Engineering, 2019, 49(2): 536 – 545.
- [21] 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 gap discharge mechanism and breakdown characteristics of transmission lines induced by mountain fire [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 622 – 632.
- [22] 王子鸣. 山火条件下绝缘间隙电荷颗粒分布规律与合成电场畸变特性研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.
- [23] 罗燕来. 小尺度射流扩散火焰特性的实验研究和数值模拟[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [24] 王方. 火焰学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1994.
- [25] 盖顿. 火焰学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [26] 周昌杰. 山火对输电线路间隙放电影响的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.

收稿日期: 2024-05-15; 网络首发日期: 2024-07-20

作者简介:

李磊(1991), 男, 通信作者, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统调度运行控制、电网风险评估, lilei64lt@sina.com;

张雷(1983), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为大电网调度运行控制、电网风险评估;

富梦迪(1997), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为大电网优化运行。

(上接第106页 Continued from Page 106)

- [23] 陈天宇, 张粒子, 王澍, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 9 – 13.
- CHEN Dayu, ZHANG Lizi, WANG Shu, et al. Development of energy storage in frequency regulation market of united states and its enlightenment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 9 – 13.
- [24] 董超, 黄筱翌. 美国 PJM 电力市场及对广东电力改革的启示[J]. 云南电力技术, 2017, 45(1): 16 – 20.
- DONG Chao, HUANG Xiaozhao. Experiences in PJM market in the united states; a good reference for the power market reform in Guangdong power grid [J]. Yunnan Electric Power, 2017, 45(1): 16 – 20.
- [25] 陈中飞, 荆朝霞, 陈达鹏, 等. 美国调频辅助服务市场的定价机制分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 1 – 10.
- CHEN Zhongfei, JING Zhaoxia, CHEN Dapeng, et al. Analysis on pricing mechanism in frequency regulation ancillary service market of united states [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 1 – 10.
- [26] CUI L, MA B, ZENG D, et al. Review of research on electric energy market clearing model [C]//2020 International Symposium on New Energy and Electrical Technology, 18 – 20 September 2020, Changsha, China. London: IOP, 1 – 8.
- [27] 北极星售电网. 广东电力市场现货电能量交易实施细则发布[EB/OL]. [2023 – 03 – 21]. <https://m.bjx.com.cn/mnews/20230321/1295860.shtml>.
- [28] 何奇, 张宇, 邓玲, 等. 基于水电储能调节的风光水发电联合优化调度策略[J]. 广东电力, 2024, 37(3): 12 – 24.
- HE Qi, ZHANG Yu, DENG Ling, et al. Joint optimal scheduling strategy of wind, photovoltaic and water storage power generation considering hydropower storage regulation [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(3): 12 – 24.
- [29] 张海涛, 李文娟, 李雪峰, 等. 基于变分模态分解和时间注意力机制 TCN 网络的光伏发电功率预测[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12): 156 – 163.
- ZHANG Haitao, LI Wenjuan, LI Xuefeng, et al. Photovoltaic power forecasting based on TPA-TCN model and variational modal decomposition [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12): 155 – 163.
- [30] 董超, 郝文焕, 董锴, 等. 南方(以广东起步)调频辅助服务市场机制设计与运营实践[J]. 广东电力, 2020, 33(6): 12 – 19.
- DONG Chao, HAO Wenhuan, DONG Kai, et al. Mechanism design and operation practice of frequency regulation auxiliary service market in southern China (starting from Guangdong) [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(6): 12 – 19.

收稿日期: 2024-06-12; 网络首发日期: 2024-11-10

作者简介:

白云霄(1988), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力市场建设与运营, 516486451@163.com;

戴漫茹(2002), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场和信号处理, 3590597550@qq.com;

季天瑶(1981), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为信号与信息处理及其在电力系统和电力市场中的应用, tyji@scut.edu.cn。