

中压线路树木接地故障放电特性试验

杨淳岚¹, 陈天翔¹, 杨博闻¹, 张星海², 范松海²

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610000)

摘要:近年森林火灾频发导致重大人员伤亡事故与国民经济重大损失, 影响电网的运行安全。发生森林火灾的原因除了雷电、人为等因素外, 电力线路树木接地故障引发与否也是事故原因调查时争议很大的问题。以中压线路为主要研究对象, 搭建火焰和树线放电试验平台, 研究树木临近线路放电、树木因外部因素搭靠线路上放电和线路下方出现火焰时线路放电的故障特征, 提出山火引发线路故障与线路树木故障的辨识依据; 提出树木接地故障理论模型, 预测树木接地时泄漏电流等电气参量幅值, 为制定防范电网树线故障引发山火事故措施提供思路。

关键词:中压线路; 树木放电; 放电特性; 故障模型; 试验研究

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.005 中图分类号:TM852 文章编号:1673-9140(2022)04-0038-07

Discharge characteristic test of tree grounding fault of medium voltage line

YANG Chunlan¹, CHEN Tianxiang¹, YANG Bowen¹, ZHANG Xinghai², FAN Songhai²

(1. The College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Electric Power Science Research Institute, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: The frequent occurrence of forest fires in recent years has led to major casualties and significant losses of the national economy, affecting the operational safety of the power grid. Besides lightning, human and other factors, whether the power line tree failure triggered is also a highly controversial issue in the investigation of the cause of the occurrence of forest fires. This paper takes the medium-voltage line as the main research object, a flame and tree-line discharge test platform is built. The fault characteristics of tree discharge near the line, tree discharge due to external factors hitching on the line and line discharge when the flame appears below are studied, and the identification basis of line fault causes by mountain fire or tree is proposed. Finally a theoretical model of tree grounding fault, which can predict the amplitude of electrical parameters such as leakage current is proposed. This study can provide ideas to the prevention of tree line faults in the power grid caused by mountain fire.

Key words: medium voltage transmission lines; tree discharge; discharge characteristics; fault model; experimental study

收稿日期:2021-09-10; 修回日期:2022-03-07

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目(U19A2080)

通信作者:陈天翔(1966-),男,博士,教授,高级工程师,主要从事高电压试验技术、电力设备绝缘在线监测技术等研究;E-mail:chentianxiang17@cdut.edu.cn

导线对树木放电(树线放电)是电力系统运行中常见的故障,树木在没有人管理的情况下自然生长,最后的高度会离输电导线越来越远引起树木放电和树木闪络^[1-3]。在川西等地,如果因为树线放电而导致森林火灾,其扑灭难度和代价是非常大的^[4]。文献^[5-7]研究了高压输电线路下树木临近时电场的变化规律。当树木高度达到一定程度时,树木顶端表面场强达到一定,输电线路和树木间会先产生电晕放电,然后进一步演化为局部电弧放电^[8-10]。

国内外许多机构及专家从不同角度对树木故障等高阻接地故障进行了研究。2005 年加拿大卡尔加里大学以遗传算法和人工神经网络法 2 种人工智能算法为基础,同时结合故障电流小波变换后的高频暂态分量作为神经网络法的输入进行高阻接地故障的检测,但实际成功率不高^[11]。2020 年印度国家技术学院提出了一种基于希尔伯特—黄变换(HHT)的高阻抗故障检测技术^[12]。2003 年,西安交通大学提出的暂态无功功率法,利用特定频段内故障线路的无功功率方向与健全线路相反进行选线,能够实现 200 Ω 接地故障的检测,但高阻情况下暂态过程不明显,容易出现误判^[13]。2004 年上海交通大学利用故障相与中性点电压之差与零序电流的积分获得暂态能量,提出了暂态有功能量法,该方法能够实现 2000 Ω 以下接地故障的检测,但有功分量在高阻接地的情况下含量较低^[14]。2015 年清华大学基于交叉小波变换理论,将行波选线的时频窗自适应地定为零模电流行波具有最强相关性时的时频窗,在 500 Ω 左右时也具有良好的选线效果,但在较大的过渡电阻下,行波初始波头的幅值较小,捕获较为困难,会影响选线的可靠性与灵敏性^[15]。2021 年山东理工大学对树线故障进行了研究,但限于其研究条件,其电压等级有限且没有模拟真实情况下线路电容的存在^[16]。

较多研究聚焦于树线故障等高阻接地时故障波形的识别且实际运用成功率不高,但因为实际故障现场一些电气参量不可测的因素,对于树线故障时接地电阻的变化趋势和流经树木的泄漏电流变化趋势等还缺乏试验研究。同时,在输配电走廊内发生森林火灾时,除了雷电、人为等因素,是否为电力线路树木故障引发也是事故原因调查时争议很大的

问题。

针对上述问题,本文设计能够较为真实模拟实际故障现场的试验平台,对树线故障时的电气参量变化进行理论推导与实际测量。同时,提出故障相经过不同放电通道放电时故障特征的辨识依据。

1 试验平台

综合考虑长距离输电导线对地电容、绝缘耐受水平以及电网接地方式等因素,设计搭建如图 1 所示的试验平台。该试验平台选用不同的试验变压器,调整输电线路间距和互感器后可以模拟不同电压等级的中压线路;通过调节电容补偿装置可模拟真实情况下线路对地电容。金属容器的下方有一个精密的升降平台,可随时精确控制容器与线路的间距。在容器里填满土壤、插上树木样本后,可模拟树木的真实接地情况,且该容器体积足够大,具备在内部点燃木垛模拟线路下方火灾的条件。整个试验系统为中性点不接地系统。

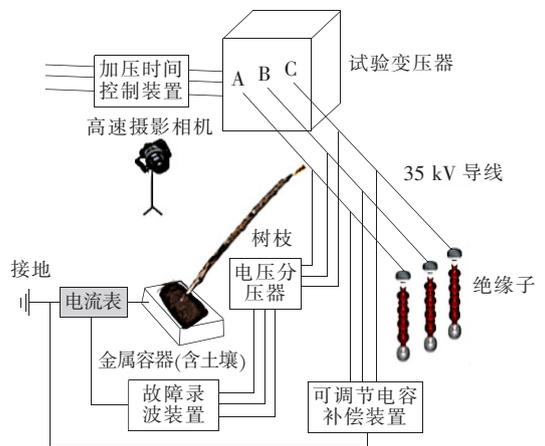


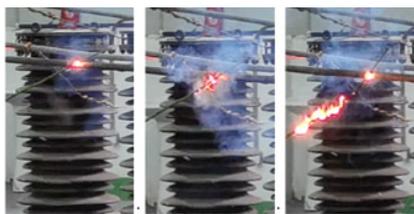
图 1 试验平台

Figure 1 Test platform

故障录波装置 4 个采样通道与电压互感器二次相连,记录树木放电时的 A、B、C 相和零序电压变化。其中,故障录波装置采集电压的瞬时值,而试验现场的电压表显示电压有效值,所以故障录波装置的电压信号幅值为电压表显示值的 $\sqrt{2}$ 倍。当试验变压器输出额定电压 35、10 kV 时,互感器二次电压均为 57.7 V,因此,加到额定电压后示波器显示电压幅值在 81.6 V 左右。

2 不同放电通道对比

当树木临近导线到一定距离时,导线会击穿空气间隙向树枝尖端放电,电流经过电弧通道和树枝,在电流和电弧的共同作用下会引燃树枝,如图 2(a)所示。当树木直接搭靠在导线上时,树木在电流的作用下也会引燃树枝。同时,在试验平台导线下方点燃木垛,模拟中压线路走廊下方发生火灾引发线路故障,如图 2(b)所示,导线也会击穿空气通过火焰内部导电通道对地放电。



(a) 树线放电引燃树枝



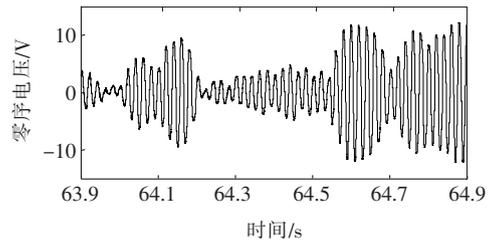
(b) 线路下方有火焰

图 2 不同放电通道

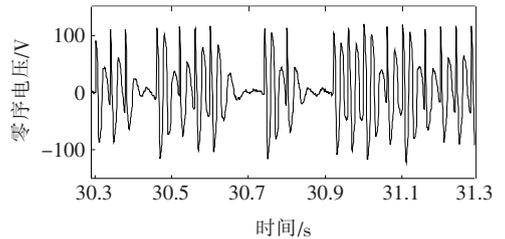
Figure 2 Different discharge channels

对于树木造成的高阻接地故障与导线下方火焰造成的类似接地故障,暂时没有区分依据。在调查森林火灾发生原因时,不能排除因树线故障引燃树木导致森林火灾的可能性。为了对比不同放电通道放电特性的不同,在试验平台上,分别模拟导线击穿空气间隙对树木放电、导线对搭靠在导线上的树木放电和导线因下方出现火焰而对地放电 3 种情况。将记录的数据进行处理,得到时域和频域下的零序电压,如图 3 所示。

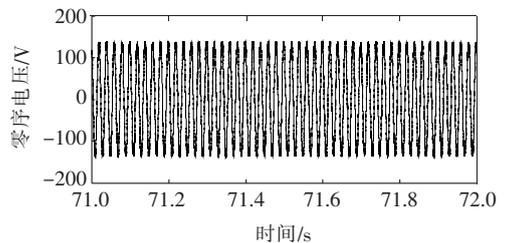
对比图 3(a)、(b)、(d)可知,火焰引发线路故障时零序电压幅值变化较为连续,零序电压的低频分量频率较为集中,主要分布在 50 Hz 工频附近;而树枝临界放电导致线路故障时零序电压幅值变化剧烈,零序电压的低频分量频率很不连续,分散性很



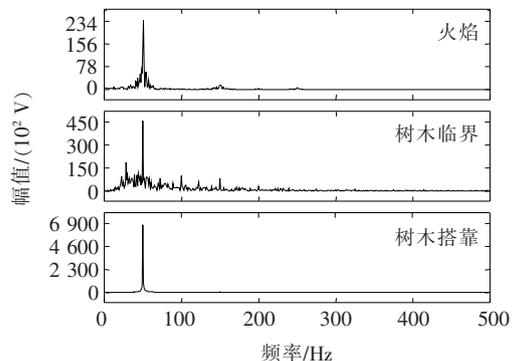
(a) 线路下方有火焰时零序电压波形



(b) 树木临界放电零序电压波形



(c) 树木搭靠放电零序电压波形



(d) 不同放电通道零序电压幅频对比

图 3 不同放电通道下零序电压波形与幅频

Figure 3 Zero sequence voltage waveform and amplitude-frequency diagram under different discharge channels

大。这是因为在线路下方出现火焰时,火焰是一种等离子体通道,而伴随着火焰产生的高温会显著降低线路对地的击穿电压^[17-18]。当火焰高低不断变化时,温度仍是一个变化较为平缓 and 滞后的变量,故当线路下方出现火焰时,线路的故障能够比较好地持续而不随着火势的大小瞬间出现变化,体现在零序电压平缓的变化上。而当导线击穿空气间隙对树枝放电时所产生的的是高频的电弧,导电通道随着电

弧的产生而产生,随着电弧的熄灭而消失。因此,产生的故障也是一个间歇性的高频故障,具体体现在系统零序电压的间歇性变化以及波形的陡峭。

对比图 3(a)、(c)可知,较线路下方的火焰引发线路故障,树木直接搭靠在导线上时引发的线路故障更加为稳定。体现在树木搭靠在导线上时系统零序电压变化更加连续,且幅值变化十分缓慢。这是因为当树枝搭靠在导线上时是一种稳定的接触,导电通道也十分的稳定。同时从图 3(d)上可以看出,在树木搭靠在导线上放电时,零序电压的低频分量以 50 Hz 为主,体现在频谱图上只在 50 Hz 下出现了明显的波峰。

在调查输配电走廊森林火灾事故原因时,可以通过对比故障波形的特征判断线路初始故障的放电类型。若初始故障波形符合树线放电特征,则可能是因树线放电引燃树枝造成森林火灾;若初始故障波形符合火焰放电特征,则线路下方应先发生了森林火灾而后导致了线路故障。

3 树木故障电气参量演化

建立中性点不接地系统单相触树故障模型,如图 4 所示, $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ 表示三相电源电动势; $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ 表示三相对地电压; \dot{U}_N 表示三相电压平衡被打破后中性点产生的偏移电压; R_f 表示故障点对地电阻; C_a, C_b, C_c 表示三相输电线路的对地电容; $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ 表示三相电流; \dot{I}_f 表示流经树木的泄漏电流。

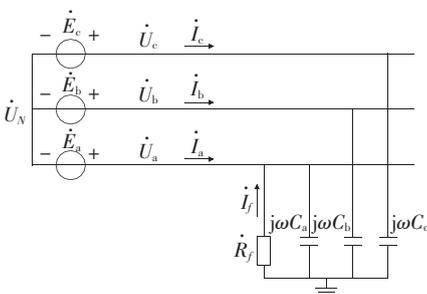


图 4 中性点不接地系统单相触树故障等效电路

Figure 4 Equivalent circuit of single-phase contact tree fault in ungrounded neutral system

3.1 电压

在忽略导线电阻和电感的情况下,因在中性点处电流满足 KCL 定理,故由节点电压法可得:

$$(\dot{U}_N + \dot{E}_c)j\omega C_c + (\dot{U}_N + \dot{E}_b)j\omega C_b + (\dot{U}_N + \dot{E}_a)\left(j\omega C_a + \frac{1}{R_f}\right) = 0 \quad (1)$$

等同于

$$\dot{U}_N \left(j\omega C_c + j\omega C_b + j\omega C_a + \frac{1}{R_f} \right) = - \left[\dot{E}_c j\omega C_c + \dot{E}_b j\omega C_b + \dot{E}_a \left(j\omega C_a + \frac{1}{R_f} \right) \right] \quad (2)$$

假设每相输电线路对地电容相等,令 $C_a = C_b = C_c = C_x, C_x$ 表示单相对地电容,可得:

$$\dot{U}_N \left(3j\omega C_x + \frac{1}{R_f} \right) = - \left[(\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c)j\omega C_x + \dot{E}_a \frac{1}{R_f} \right] \quad (3)$$

又因为三相电源对称,则有

$$\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 0 \quad (4)$$

于是有

$$\dot{U}_N \left(3j\omega C_x + \frac{1}{R_f} \right) = -\dot{E}_a \frac{1}{R_f} \quad (5)$$

进而得出:

$$\dot{U}_N = -\frac{\dot{E}_a}{1 + 3R_f j\omega C_x} \quad (6)$$

由图 4 可知,故障点处有

$$\dot{U}_a = \dot{E}_a + \dot{U}_N = -\dot{I}_f R_f \quad (7)$$

令 $\tan \theta = 1/3\omega C_x R_f$, 则式(7)可化为

$$\dot{U}_a = \dot{E}_a \cos \theta e^{j\theta} \quad (8)$$

从式(8)可以看出故障相的幅值与相位受 C_x 和 R_f 的共同影响。同理,非故障相和零序电压也会受到类似的影响。在试验平台下,以相同的树木样本作为试验对象,分别在 10、35 kV 线路下进行 A 相树线放电试验,10、35 kV 系统下三相共补偿电容分别约 23.76×10^{-6} 、 3×10^{-8} F,得到故障波形,如图 5 所示。

在 10 kV 电压下,树木搭靠在线路上引起的三相电压不平衡程度很小,零序电压幅值较小,整个试验过程中也无较大波动;在 35 kV 电压下,树木搭靠在线路上引起三相电压的严重不平衡,较 10 kV

而言,故障相的相位出现了明显的变化。试验结果符合理论推导。

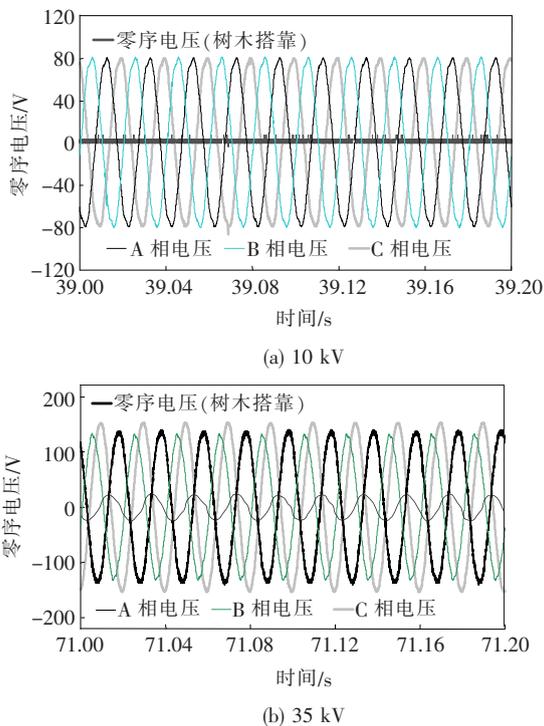


图5 不同电压等级树线故障波形

Figure 5 Tree-line fault waveform of different voltage levels

3.2 电流

将式(6)带入式(7)可得:

$$\dot{I}_f = -\frac{3\dot{E}_a j\omega C_x}{1 + 3R_f j\omega C_x} \quad (9)$$

将树木放置于试验平台中进行模拟 10 kV 单相树线放电试验,可调节电容补偿装置三相共投入 90.21 kVar 的补偿电容,实际测得流经树木的泄漏电流有效值 I_f 变化如图 6 所示,将 I_f 进行拟合,得到:

$$I_f = \frac{449.64}{1 + 37.53e^{-0.02569t}} \quad (10)$$

根据式(9)推算泄漏电流有效值表达式并与式(10)联立求解,可得 R_f 随时间 t 的表达式:

$$R_f = 12\ 832.37 + 481\ 562.76e^{-0.02569t} \quad (11)$$

将式(11)绘制如图 7 所示,随着时间的推移,故障点对地的电阻成指数下降。试验过程中树枝的温度不断上升。试验结果符合电介质理论中高损介质的电导率随着温度的升高而指数上升的结论^[19]。

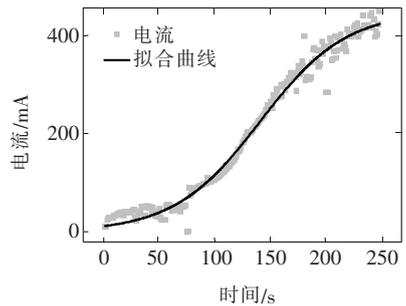


图6 泄漏电流变化与拟合

Figure 6 Leakage current variation and fitting graph

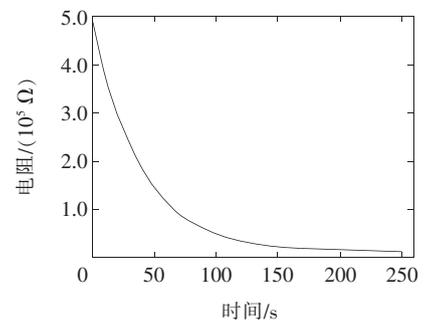


图7 故障点对地电阻变化

Figure 7 Resistance of fault point to ground

根据实际情况,将 R_f 按照公式拟合,即

$$R_f = k_1 + k_2 e^{k_3 t} \quad (12)$$

其中, k_1, k_2, k_3 为常数。将式(12)带入式(8)、(9),可得不接地系统树线故障零序电压、泄漏电流暂态变化公式,分别为

$$\dot{U}_N = -\frac{\dot{E}_a}{1 + 3(k_1 e^{k_2 t} + k_3)j\omega C_x} \quad (13)$$

$$\dot{I}_f = -\frac{3\dot{E}_a j\omega C_x}{1 + 3(k_1 e^{k_2 t} + k_3)j\omega C_x} \quad (14)$$

4 结语

本文通过设计试验平台并进行相关试验,得到了以下结论。

1) 试验模拟了树枝临界放电、树枝搭靠导线放电和线路下方出现火焰放电 3 种故障情况,对比了时域与频域下的零序电压并找到了各自的特征,可为山火事故成因调查提供参考依据。

2) 建立了中性点不接地系统单相触树故障的模型,对其电压和泄漏电流等电气参量变化进行了理论推导与试验模拟,并得出了相应的暂态变化公式。

在实际故障现场,泄漏电流不可测,通过本文提出的泄漏电流暂态变化公式可以预测故障点流过的电流值,为掌握故障演化阶段具有参考意义。同时,结合本文得到的故障点对地阻抗变化趋势以及零序电压暂态变化公式,可以为类似故障的识别和保护提供参考依据。

国内外对于非有效接地配电网单相接地故障的定位技术做了大量研究,仍有许多技术难点^[20]。研究树木故障定位技术并及时遏制山火的形成也是进一步需要展开的工作。

参考文献:

- [1] 刘怀东,陈伟,高晓辉,等. 从大停电观点分析一类输电线路树闪故障[J]. 电网技术,2007,31(S1):67-69.
LIU Huaidong, CHEN Wei, GAO Xiaohui, et al. Analysis of a class of transmission line tree faults from the viewpoint of large outages[J]. Power Grid Technology, 2007, 31(S1):67-69.
- [2] 林力辉,闫航瑞,岳鑫桂,等. 输电线路树闪故障的行波信号分析[J]. 南方电网技术,2014,8(3):47-51+99.
LIN Lihui, YAN Hangrui, YUE Xingui, et al. Traveling-wave analysis of transmission lines vegetation-related faults[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(3):47-51+99.
- [3] 胡海斌,黄康裕,钟建勇. 输电线路通道树木隐患点预警平台的研发[J]. 广西电力,2015,38(1):50-52.
HU Haibin, HUANG Kangyu, ZHONG Jianyong. Development of early warning platform for potential trouble points of trees under transmission line corridor[J]. Guangxi Electric Power, 2015, 38(1):50-52.
- [4] 达郎周,王嘉智,阿西,等. 川西北高原地区森林火灾防控的难点及对策[J]. 四川林业科技,2017,38(5):115-117.
DA Langzhou, WANG Jiazhi, A Xi, et al. The difficulties and countermeasures of preventing and controlling forest fires in the northwest plateau of Sichuan[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2017, 38(5):115-117.
- [5] 侯永洪. 架空输电线路超高树木临近时电场分布特征研究[J]. 电工技术,2020(7):74-77.
HOU Yonghong. Study on the distribution characteristics of electric field around super high trees under overhead transmission lines[J]. Electrical Engineering Technology, 2020(7):74-77.
- [6] 赵海龙,黄松. 110 kV 输电线路树木临近时电场变化规律与临界击穿距离研究[J]. 计算机与数字工程,2020,48(8):2057-2063.
ZHAO Hailong, HUANG Song. Study on the electric field variation characteristics and critical breakdown distance of 110 kV transmission line near trees[J]. Computer & Digital Engineering, 2020, 48(8):2057-2063.
- [7] 孙丽萍,何杰,周宏威,等. 树木介电常数测量及其对工频电场的影响[J]. 西北林学院学报,2016,31(1):76-80.
SUN Liping, HE Jie, ZHOU Hongwei, et al. Dielectric constant measurements of trees and their impact on the electric field[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1):76-80.
- [8] 张婧,杨小霞,杜巍. 混合无功补偿对特高压输电线路的影响机制研究[J]. 智慧电力,2020,48(5):92-98.
ZHANG Jing, YANG Xiaoxia, DU Wei. Influence mechanism of hybrid reactive compensation on UHV transmission lines[J]. Smart Power, 2020, 48(5):92-98.
- [9] 郑亚利,俞集辉,汪泉弟,等. 电晕放电对超高压输电线路工频电场的影响[J]. 高电压技术,2009,35(4):872-876.
ZHENG Yali, YU Jihui, WANG Quandi, et al. Impact of corona discharge on the power frequency electric field intensity in the extra-high voltage transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4):872-876.
- [10] LI S, RUSSELL B D. Optimal arcing fault detection using signal processing techniques[J]. Electric Power Systems Research, 1991, 21(2):121-128.
- [11] SEDIGHI A R, HAGHIFAM M R, MALIK O P. Soft computing applications in high impedance fault detection in distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 76(1-3):136-144.
- [12] ANAND A, AFFIJULLA S. Hilbert-Huang transform based fault identification and classification technique for AC power transmission line protection[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(10):e12558.
- [13] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁,等. 小电流接地故障暂态方向

- 保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.
- XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.
- [14] 李梦涵, 赵学文, 李建琦, 等. 基于 VMD-SVM 的小电流接地系统故障选线方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(8): 1-8.
- LI Menghan, ZHAO Xuewen, LI Jianqi, et al. Fault line selection method for small current grounding system based on VMD-SVM[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 1-8.
- [15] 武建卫, 邵剑峰. 计及波速变化的反行波直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 121-128.
- WU Jianwei, SHAO Jianfeng. Fault location of DC transmission lines based on backward waves considering wave speed changes[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 121-128.
- [16] 梁栋, 徐丙垠, 唐毅, 等. 10 kV 架空导线单相触树接地故障模型及其检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5221-5232.
- LIANG Dong, XU Bingyin, Tang Yi, et al. Model and detection method for tree-contact single-phase-to-ground faults on 10 kV overhead lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5221-5232.
- [17] 张书琦, 赵晓林, 谭瑞娟, 等. 不同因素影响下的油纸绝缘直流击穿特征[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 102-101+107.
- ZHANG Shuqi, ZHAO Xiaolin, TAN Ruijuan, et al. DC breakdown characteristics of oil-paper insulation under influence of different factors[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 102-101+107.
- [18] 李明明, 王建, 熊小伏, 等. 高温天气下架空线路运行温度与弧垂越限预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 25-33.
- LI Mingming, WANG Jian, XIONG Xiaofu, et al. Operating temperature and sag off-limit warning method for overhead transmission lines in the conditions of high-temperature weather[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 25-33.
- [19] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 273-280.
- [20] 刘健, 张志华, 王毅钊. 基于电压信息的配电网断线故障定位[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 123-131.
- LIU Jian, ZHANG Zhihua, WANG Yizhao. Voltage information based line-broken fault location for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 123-131.