

10 kV 配电线路单相树线故障零序电压变化特性

辜弘¹, 王政¹, 杨皓涵¹, 杨淳岚², 陈天翔¹, 邵千秋³

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 成都 610059; 2. 四川大学电气工程学院, 成都 610065; 3. 国网四川省电力公司电力科学技术研究院, 成都 610041)

摘要: 为研究树线故障时零序电压信号变化特征, 搭建了树线故障实验平台, 研究谐振接地系统不同残余电流下不同植被发生单相树线接地故障时的零序电压变化特性, 总结了零序电压的变化阶段和规律, 分析了残余电流和植被自身参数对零序电压变化的影响规律, 并在此基础上建立了零序电压峰值预测模型。实验结果表明: 树线故障的发展过程可由零序电压变化来表现, 其变化一般存在缓增、速增、下降和回升4个阶段, 变化趋势存在U形、J形、V形3种曲线; 残余电流增大会导致零序电压变化幅度减小, 不利于故障检测, 其值应尽量补偿至0~1 A范围内; 对于同种植被, 零序电压峰值与含水率、直径呈正相关, 峰值时间与二者呈负相关; 不同种类植被结构差异也是影响零序电压峰值和峰值时间的关键。研究结果对于检测和预警树线故障引发山火事故具有重要意义。

关键词: 配电线路; 树线故障; 单相接地; 零序电压; 变化特性

Zero Sequence Voltage Variation Characteristics of Single-Phase Tree Line Fault in 10 kV Distribution Line

GU Hong¹, WANG Zheng¹, YANG Haohan¹, YANG Chunlan², CHEN Tianxiang¹, SHAO Qianqiu³

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to study the characteristics of zero sequence voltage signal change during tree line fault, an experimental platform for tree line fault is built to study the zero sequence voltage variation characteristics when single-phase tree line ground fault occurs in different vegetation under different residual currents in the resonant grounding system. The change stages and laws of the zero sequence voltage are summarized and the influence laws of the residual currents and vegetation's own parameters are analyzed on the change of the zero sequence voltage. Based on this, the prediction model for the peak value of the zero sequence voltage is built. The experimental results show that the development process of tree line fault can be expressed by the zero sequence voltage variation, which typically exhibit four stages: slow increase, rapid increase, decline and recovery. The trend of these changes follows three types of curves: U-shaped, J-shaped, and V-shaped. The increase of residual current will lead to a decrease in the amplitude of the zero sequence voltage change, which is not conducive to the detection of faults, and its value should be compensated to the range of 0~1 A as much as possible. For the same kind of vegetation, the peak zero-sequence voltage is positively correlated with the water content and diameter, and the peak time is negatively correlated with both of them. The structural difference of different kinds of vegetation is also the key to influence the peak zero-sequence voltage and peak time. The results of this study are of great significance for the detection and early warning of hill fires caused by tree line faults.

Key words: distribution line; tree line fault; single-phase grounding; zero sequence voltage; variation characteristics

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); 四川省科技计划支持项目(2023NSFSC0830); 四川省电力公司科技项目(521903230001)。

Foundation item: Supported by the Key Support Project of the National Natural Science Regional Innovation and Development Joint Fund (U19A2080); Sichuan Provincial Science and Technology Program (2023 NSFSC0830); the Science and Technology Project of Sichuan Electric Power Company(521903230001)。

0 引言

随着电网建设快速发展和用电需求大幅提高,配电线路覆盖面积大幅增加^[1-2],常跨越森林等多树木地区,树线矛盾日益突出^[3-4]。其中由单相树线接地故障^[5-6]引发的山火事故层出不穷,是影响森林防火和电网安全运行的重要问题^[7-10]。树线故障时植被的过渡电阻高达数百千欧^[11],故障的电气特性弱,传统线路保护装置不能有效动作。

目前,国内外学者针对单相树线故障已开展大量研究。Butler等通过在12.5 kV线路下模拟树线故障获得了树线放电现象以及电压、电流波形^[12]。秦际轲等进一步分析了植被引燃机制,并获得了引燃过程中的典型物理特征和电气特征^[13]。Jeffer等研究了炭化通道的形成对故障电流的影响,得出故障电流随炭化程度加剧而增大的结论^[14]。文献[15-16]分别研究了植被含水率和尺寸对故障电流特性的影响,并建立了植被引燃预测模型。文献[17-18]提出了基于树线故障电流时变特性的单相触树接地故障检测方法。文献[19]提出了利用零序电流有效值曲线在长时间尺度下的变化特征作为树线故障的识别依据。文献[20]分析了零序电压幅值和相角变化规律,得到了不同区间内零序电压变化轨迹,据此可进行故障选相,但该方法依赖于对网络参数的精确测量。文献[21-22]从相位关系出发提出基于电压与电流相位差的故障检测及选相方法,但由于植被高阻特性,相角关系难以测量。文献[23-24]利用相电流突变量进行故障检测,但由于消弧线圈的过补偿作用以及植被高阻特性可能会使故障特征差异消失,导致无法检测出故障。

现有研究表明,目前关于树线故障发展特征研究主要对故障电流进行分析,然而在实际发生树线故障时无法测量故障电流,同时还存在不同植被高阻特性以及消弧线圈不同过补偿作用等情况,对于易获取且检测灵敏度高的零序电压,如何从其幅值长时变化特征方面分析树线故障发展特征以及故障识别检测等问题值得深入研究。本文搭建了10 kV配电线路单相树线故障模拟实验平台,对竹子、杉树和松树等典型植被开展大量树线故障实验,总结零序电压变化的典型阶段和曲线,分析残余电流和植被自身参数对零序电压变化的影响规律,在此基础上计及残余电流、植被含水率和直径对零序电压

峰值进行有效预测。研究结果可为树线故障的识别和预防树线故障引发山火提供参考。

1 实验设计

1.1 实验平台

搭建的10 kV配电线路树线故障模拟实验平台如图1所示。三相油浸式变压器型号为SY11-0.4/10,其高压侧中性点经消弧线圈接地;400 V电抗器用以降低发生单相接地故障时电源侧电流,以保护电源侧;消弧线圈额定电感值为353.68 mH,金属接地故障时流经消弧线圈的电感电流为52 A;10 kV可调电容器用以模拟长线路对地电容电流,本文通过投入电容器使残余电流分别为1 A、3 A、5 A。

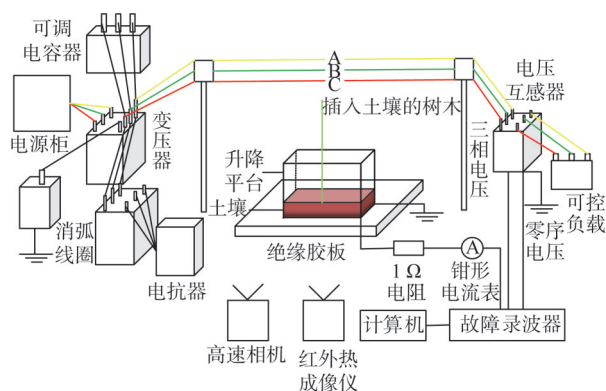


图1 10 kV 配电线路实验平台

Fig. 1 10 kV distribution line test platform

三相线路下放置装有铁箱的无线控制升降平台,铁箱中装有湿润土壤,将植被样本插入其中可模拟真实树线故障。铁箱下端利用铜线串联1 Ω的无感电阻接地,故障录波器通过测量电阻上的电压可间接测量泄漏电流,其采样频率为2 GHz。三相导线末端接电压互感器以获得三相电压,将电压互感器辅助二次侧接成开口三角形测量零序电压。其余数据采集设备还包括高速摄像机、红外热成像仪和温湿度监测器等。

1.2 实验步骤

选取10 kV配电线路下易引发树线故障的典型植被,分别为竹子、杉树和松树,不同植被的长度控制在 90 ± 2 cm。通电前将每组实验样本放置在铁箱内,保证样本与土壤接触良好。实验开始后先投入电容使线路对地电容电流分别为51 A、49 A、47 A,再控制升降平台使植被接触导线形成树线故障。

通过高速摄像机记录植被引燃过程现象,故障录波器记录电压和泄漏电流信号实时数据。植被剧烈燃烧起火后本组实验结束,更换样本进行下一组实验。

2 零序电压理论分析

为研究树线故障时零序电压与系统各电气量的变化关系,建立谐振接地系统单相触树故障模型,如图2所示。 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 分别为三相电源电动势; $\dot{U}'_A$ 、 $\dot{U}'_B$ 、 $\dot{U}'_C$ 分别为三相对地电压; R_f 为故障植被等效阻抗; i_d 为流经植被的泄漏电流; I_A 、 I_B 、 I_C 分别为三相电流; C_x 为每相线路对地电容(假设每相线路对地电容相同), L 为消弧线圈电感。

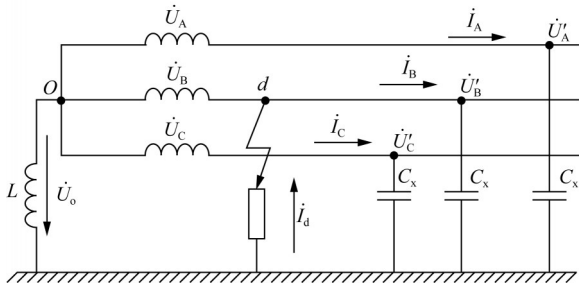


图2 谐振接地系统单相触树故障模型

Fig. 2 Single-phase tree-touching fault model of resonant grounding system

根据节点电压法,零序电压相关计算公式如式(1)所示。

$$\begin{aligned} 3\dot{U}_0 &= -\frac{\dot{U}_A \dot{Y}_A + \dot{U}_B \dot{Y}_B + \dot{U}_C \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_L} \\ &= -\frac{j\omega C_x \dot{U}_A + \dot{U}_B \left(\frac{1}{R_f} + j\omega C_x \right) + j\omega C_x \dot{U}_C}{\frac{1}{R_f} + j3\omega C_x + \frac{1}{j\omega L}} \quad (1) \\ &= -\frac{\dot{U}_B}{1 + j \left(3\omega C_x - \frac{1}{\omega L} \right) R_f} \end{aligned}$$

式中: $3\dot{U}_0$ 为零序电压; $\dot{Y}_A$ 、 $\dot{Y}_B$ 、 $\dot{Y}_C$ 分别为三相线路对地等效导纳; $\dot{Y}_L$ 为消弧线圈导纳; ω 为角频率。

由式(1)可知,树线故障后零序电压受到系统残余电流和植被等效阻抗的影响,且其幅值与两者呈负相关。流经植被的泄漏电流 i_d 如式(2)所示。

$$i_d = -\frac{\dot{U}'_B}{R_f} = -\frac{j \left(3\omega C_x - \frac{1}{\omega L} \right) \dot{U}_B}{1 + j \left(3\omega C_x - \frac{1}{\omega L} \right) R_f} \quad (2)$$

根据式(1)~(2),泄漏电流和零序电压的关系可由两者的比值 k 表示, k 值表达式如式(3)所示。当 k 值即残余电流为定值时,零序电压与泄漏电流幅值呈正相关,零序电压可以很好地反映泄漏电流变化情况进而反映树线故障发展的严重程度。

$$k = \frac{i_d}{3\dot{U}_0} = -j \left(\frac{1}{\omega L} - 3\omega C_x \right) \quad (3)$$

3 零序电压变化特性

3.1 零序电压典型阶段

植被引燃过程存在放电击穿产生火花、树线接触区域炭化、水汽大量蒸发、炭化通道蔓延、明火覆盖等典型实验现象。结合实验现象和泄漏电流波形变化特征,树线故障零序电压变化可划分为4个典型阶段,其典型波形如图3所示,各阶段实验现象如图4所示。由于系统误差,三相电压存在轻微不平衡现象,未发生故障时零序电压幅值为3 V。

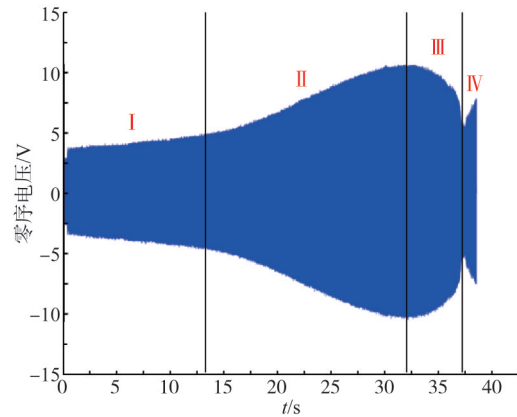


图3 零序电压各阶段波形

Fig. 3 Zero-sequence voltage waveforms at different stages

阶段I: 零序电压缓慢增长阶段,对应的实验现象如图4(a)所示。该阶段为树线初始搭接阶段,导线主要对树皮粗糙表面的毛刺放电,并在接触部位的间隙中产生电弧,此时温度上升使得植被等效阻抗急剧减小,但此时阻抗仍处于较大值($R_f > 50 \text{ k}\Omega$),零序电压上升缓慢,平均上升率为0.11 V/s。

阶段II: 零序电压快速增长阶段,对应的实验现象如图4(b)所示。该阶段树线接触区域开始炭化并有少量水蒸气析出,此时炭化区域的出现和温度快速上升降低的阻抗大于植被内部水分减少增大的阻抗,此时植被阻抗较小($R_f < 50 \text{ k}\Omega$),零序电压上升加快,平均上升率为0.42 V/s。

阶段Ⅲ: 零序电压下降阶段, 对应的实验现象如图4(c)所示。该阶段大量水蒸气短时间内从植被切口处和树皮破裂处喷出, 水分短时间内快速减少导致植被等效阻抗增大, 此时植被含水率减少对阻抗的影响占主导, 植被阻抗短时间内开始增大, 零序电压急速下降, 平均下降速率为1.6 V/s。



(a) 阶段 I



(b) 阶段 II



(c) 阶段 III



(d) 阶段 IV

图4 树线故障各阶段典型现象

Fig. 4 Typical phenomena at different stages of tree-line faults

阶段Ⅳ: 零序电压回升阶段, 对应的实验现象如图4(d)所示。随着反应的进行, 水分析出速率减小, 该阶段炭化通道上已经出现连续明显的火焰,

炭化通道发展速率最快, 此时炭化通道和温度上升对阻抗的影响占主导, 植被等效阻抗快速减小, 零序电压快速回升, 平均上升速率为2.8 V/s。

零序电压变化的不同阶段取决于植被等效阻抗的变化, 是温度上升、炭化通道发展和植被含水率减少等共同作用的结果。

3.2 零序电压典型曲线

发生树线故障后零序电压存在不同的变化趋势。结合实验数据, 将零序电压变化趋势归纳为3种典型曲线, 分别为U形、J形和V形。零序电压变化趋势的不同典型曲线如图5所示。

U形曲线: 该曲线对应了零序电压变化的4个典型阶段, 变化趋势类似镜像的字母“U”。出现此类曲线的原因是: 温度、炭化效应和烹饪效应^[13]在各阶段轮流占主导, 使得植被等效阻抗出现“下降-上升-下降”的趋势。

J形曲线: 该曲线对应了零序电压变化的阶段I、II, 零序电压在阶段II快速增长直至植被起火, 其变化趋势类似字母“J”。出现此类曲线的原因是: 炭化通道的发展和温度上升使得电流在植被内部形成了稳定的通路, 水分短时间内析出对植被初始含水率影响较小, 植被等效阻抗持续减小, 零序电压增大趋势保持稳定。该类曲线主要出现在含水率较大的植被样本中。

V形曲线: 该曲线对应了零序电压变化的阶段I、II、III, 零序电压在阶段III出现长时间的缓慢下降, 最终零序电压幅值下降至接近未发生故障时的3 V左右, 零序电压变化趋势可以近似看作镜像的字母“V”。出现此类曲线的原因是: 在水分大量析出时, 植被等效阻抗逐渐增大, 零序电压逐渐减小, 当电流发展遇到植被局部阻抗较大的区域, 如竹节、树节处, 在电压作用下最终无法被击穿, 使植被处于近似绝缘状态, 零序电压下降后不再回升。

实验中, 出现各类曲线的次数占比依次为U: J: V=7: 2: 1, 不同种类植被发生树线故障后, 其零序电压变化趋势多为U形曲线。

4 不同因素对零序电压的影响

发生树线故障时, 零序电压幅值受外部残余电流和内部植被等效阻抗的影响。植被等效阻抗方面, 重点针对植被种类、含水率和直径等植被自身参数因素进行研究。

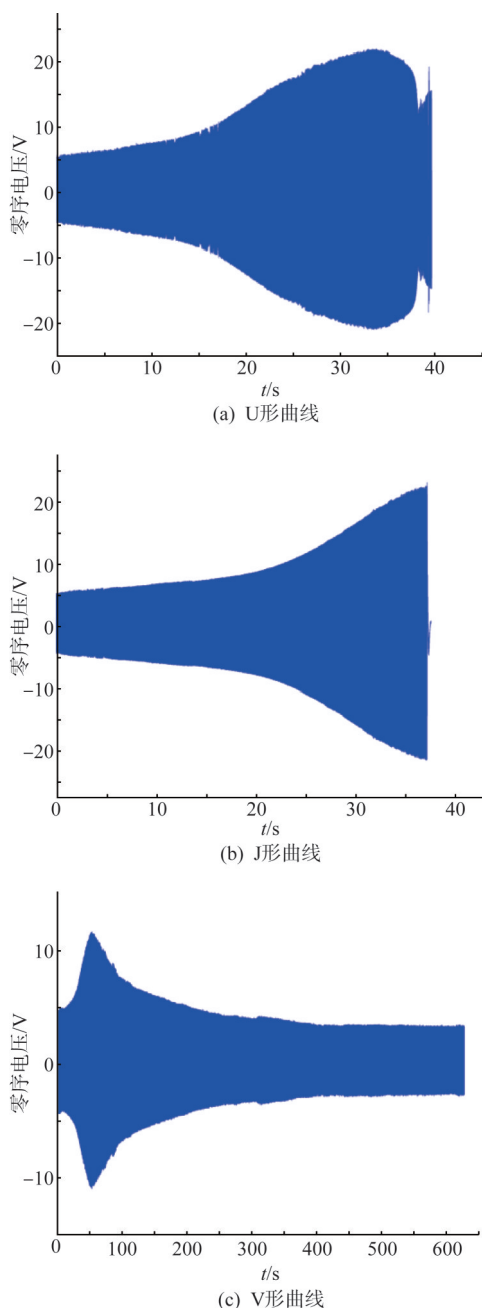


图5 零序电压变化的不同典型曲线

Fig. 5 Different typical curves of zero-sequence voltage variation

4.1 残余电流

实际运行中,系统经消弧线圈补偿后的残余电流往往不同,其值最大应不超过10 A。其他条件相近时,对残余电流分别为1 A、3 A、5 A下发生树线故障的植被进行研究。不同残余电流下零序电压有效值变化对比如图6所示。图6中不同残余电流下零序电压峰值关系为残余电流1 A>3 A>5 A。当

植被等效阻抗相近时,随着残余电流的增大零序电压变化幅度减小。

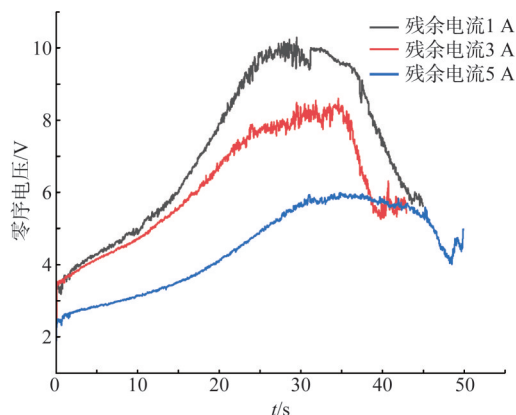


图6 不同残余电流下零序电压有效值变化对比

Fig. 6 Comparison of zero-sequence voltage RMS values change under different residual currents

实验发现,零序电压达到峰值时的植被等效阻抗普遍在10~50 k Ω 范围内。根据式(1)~(2)将残余电流拓展至0~10 A范围内,不同植被等效阻抗下零序电压、泄漏电流随残余电流变化如图7所示。

由图7(a)可知,当植被等效阻抗处于10 k Ω 时,随着残余电流增大,零序电压快速下降后呈现饱和趋势,残余电流仅在0~1 A范围内引起零序电压的明显变化。随着植被等效阻抗增大,残余电流增大使得零序电压峰值进一步减小;当植被等效阻抗为50 k Ω 、残余电流大于5 A时,零序电压峰值最大仅为1 V,零序电压变化幅度小。由图7(b)知,泄漏电流随残余电流增大而增大,且残余电流仅在0~1 A范围内引起泄漏电流的明显变化。

当植被阻抗较大,残余电流增大,使零序电压幅值变化微弱时,系统自身三相电压不平衡因素可能会掩盖树线故障时的零序电压变化特征,导致故障检测困难;同时残余电流增大导致泄漏电流增大进而加剧故障程度。基于抑制故障发展和提高故障检测灵敏性,经消弧线圈补偿后的残余电流应控制在0~1 A范围内。

4.2 植被自身参数

零序电压达到峰值后植被已经起火或植被短时间内将会出现明显的火焰,此时植被已有引燃的风险。一定条件下,零序电压峰值可以反映树线放电剧烈程度,其对线路保护动作阈值建立具有指导意义。零序电压达到峰值的时间(峰值时间)影响了故

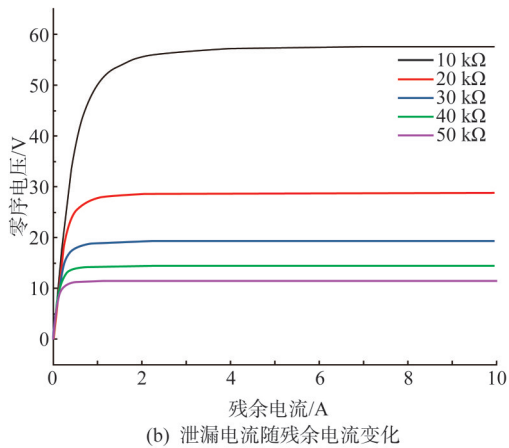
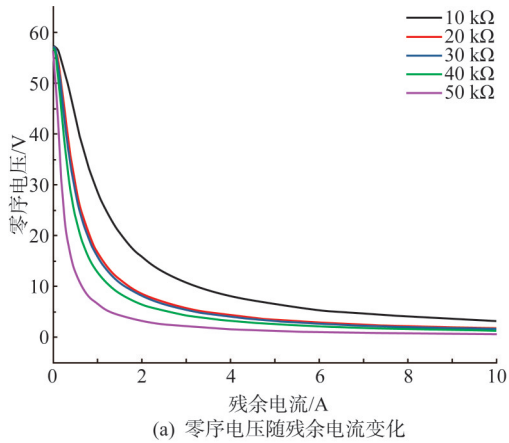


图7 不同植被等效阻抗下零序电压、泄漏电流随残余电流变化

Fig. 7 Variation of zero-sequence voltages and leakage currents with residual currents under different vegetation equivalent impedances

障切除的响应时间裕度,因此有必要对零序电压峰值和峰值时间与不同影响因素的关系进行研究。

4.2.1 植被含水率

其他条件相近时,选取含水率不同的同种植被开展实验。不同含水率条件下零序电压峰值和峰值时间如图8所示。由图8可知,零序电压峰值随含水率增大而增大,峰值时间随含水率增大而减小。

在故障发展Ⅰ、Ⅱ阶段,炭化通道尚未形成,电流主要通过植被内部水路径传导,此时含水率大小对植被的导电能力有很大影响。植被电导率取决于植被内部导电离子的数量和离子迁移率^[13]。水分可以溶解植被内部的盐分和电解质,促进其电离,含水率增大使导电离子数目增多;同时含水率增大,植被内部水路径增多,导电离子的迁移率增

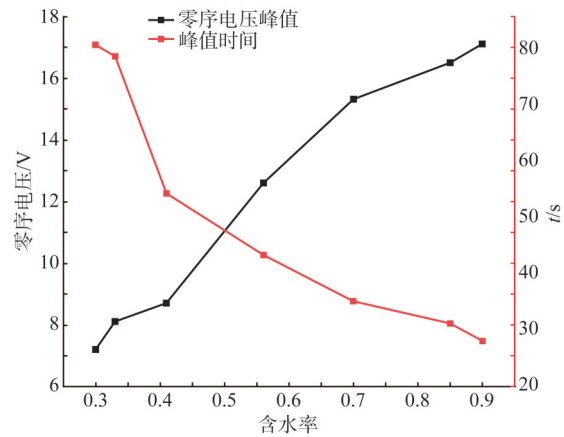


图8 零序电压峰值和峰值时间随含水率变化

Fig. 8 Variation of zero-sequence voltage peak values and peak times with moisture content

大。因此植被含水率越大,其电导率越大,等效阻抗越小,零序电压峰值越大;同时电导率越大,泄漏电流越大,电流的热效应使得温度上升越快,达到阶段Ⅲ的时间缩短,峰值时间减小。

4.2.2 植被直径

其他条件相近时,选取直径不同的同种植被开展实验。不同直径条件下零序电压峰值和峰值时间如图9所示。由图9可知,零序电压峰值随直径增大而增大,峰值时间随直径增大而减小。

在故障发展阶段Ⅰ,导线与植被粗糙表面的接触电阻远大于其间隙中的电弧电阻,因此电流主要通过电弧通道注入植被中。植被直径增大会引起电弧通道路径增加,电弧整体电阻减小,泄漏电流增大。电流流入植被内部后,电流将由接触点逐渐扩散至植被截面上,当植被直径增大时,其导电截面积将增大。导体电阻计算公式如式(4)所示,植被导电截面积越大,植被等效阻抗越小。植被直径越大,其等效阻抗越小,零序电压峰值越大,电流热效应使峰值时间越小。

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (4)$$

式中: ρ 为电阻率; L 为长度; S 为导电截面积。

4.2.3 植被种类

选取相同残余电流下,含水率和直径相近的不同种类植被开展实验。不同种类植被零序电压峰值如表1所示。由表1所示,相同含水率和直径条件下,零序电压峰值竹子>杉树>松树。不同种类植被的峰值时间分布在不同的区间范围内,其峰值时

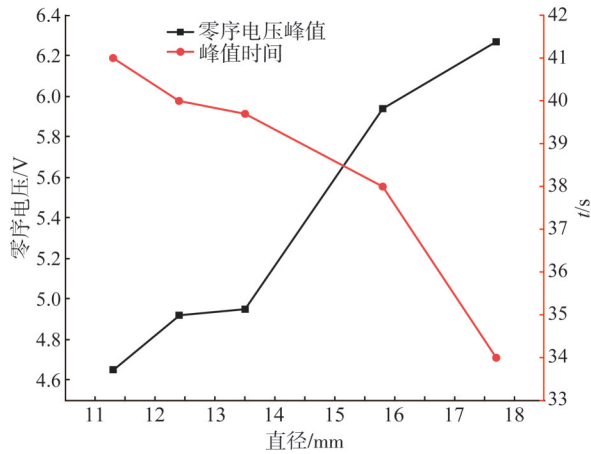


图9 零序电压峰值和峰值时间随直径变化

Fig. 9 Variation of zero-sequence voltage peak values and peak times with diameters

间关系主要是：竹子峰值时间最短，松树最长。

表1 不同种类植被零序电压峰值

Tab. 1 Zero-sequence voltage peaks for different types of vegetation

含水率/%	直径/mm	竹子 $3U_0/V$	杉树 $3U_0/V$	松树 $3U_0/V$
44	13	8.31	5.99	4.71
51	18	11.6	8.34	5.94
57	19	13.7	6.90	6.24

相对于含水率、直径等物理参数，不同植被结构的差异也是导致其零序电压峰值和峰值时间的重要因素^[27-28]。当电弧未击穿皮层时，植被初始阻抗大小受制于皮层的导电能力。相比于杉树和松树，竹子的表皮较薄且光滑，密度较小，导电性更强，因此竹子初始阻抗更小；当电弧击穿皮层后，电流通路由电弧通道转向含水率高的韧皮部。相比于杉树和松树，竹子内部中空，木质部较薄，相同含水率条件下竹子的韧皮部中含水率更高，其等效阻抗更小。

4.3 零序电压峰值预测模型

配电网谐振接地系统单相接地故障零序电压启动判据主要按照系统额定相电压的15%进行整定^[25-26]，但不同植被发生树线故障时存在零序电压峰值低于整定值情况，可能导致保护装置动作前植被已经起火，进而引起严重后果。不同植被零序电压峰值与启动定值大小关系如图10所示。计及植被含水率、直径和系统残余电流，对植被零序电压峰值进行预测，为线路零序电压保护动作阈值建立提供参考。

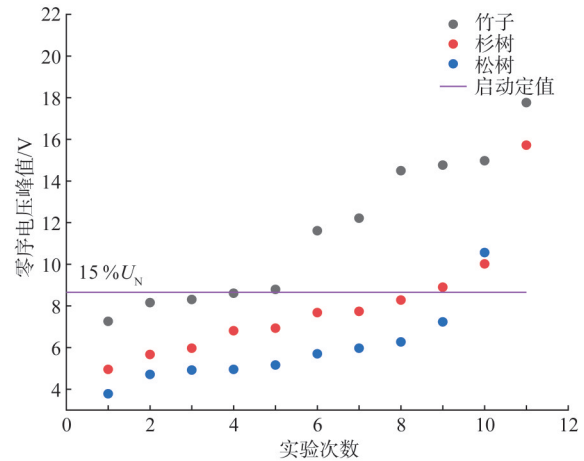


图10 不同植被零序电压峰值与启动定值关系

Fig. 10 Relationship between zero-sequence voltage peak values and starting set values for different vegetation

考虑植被含水率、直径以及系统残余电流的零序电压峰值可以表示为：

$$U_m = f(I_{LC}, W, D) \quad (5)$$

式中： U_m 为零序电压峰值，V； I_{LC} 为残余电流，A； W 为植被含水率，%； D 为植被直径，mm。

由图10可知，3种植被中松树零序电压峰值普遍最小，分析松树零序电压峰值对启动定值整定更有实际意义。通过分析植被含水率、直径以及系统残余电流，建立树线故障零序电压峰值预测模型如式(6)所示。

$$U_m = \delta + \alpha I_{LC} \left(A + I_{LC}^{-\frac{1}{2}} \right) + \beta W (B + W) + \gamma D \quad (6)$$

式中 δ 、 α 、 β 、 γ 、 A 、 B 分别为通过实验数据拟合得到的模型参数，用于表征各类影响因素对零序电压峰值的综合作用，其具体取值分别为 $\delta=71.782$ 、 $\alpha=-22.524$ 、 $\beta=0.0293$ 、 $\gamma=0.10699$ 、 $A=-0.3637$ 、 $B=85.827$ ，调整后的拟合优度为0.828。

为了验证模型准确性，在不同含水率、直径以及残余电流条件下针对松树开展实验，对比预测值和实测值。不同参数下预测值和实测值如表2所示。由表2可知，预测值和实测值间的相对误差为3.9%~9.4%，表明零序电压峰值模型预测相对准确。

5 结论

本文搭建了10 kV配电线路单相树线故障模拟实验平台，对竹子、杉树和松树等典型植被开展大量树线故障实验，得出结论如下。

表2 不同参数下预测值与实测值
Tab. 2 Predicted values and actual values under different parameters

残余电流/A	含水率/%	直径/mm	预测值/V	实测值/V	相对误差/%
0.7	46.4	14	7.15	7.9	-9.4
0.7	43.2	16	7.03	7.53	-6.6
1	44.7	21.7	6.43	6.05	6.4
1.2	44.7	10	4.45	4.9	-9.2
1.5	45.9	11	4.51	4.73	-4.9
1.5	50.2	16	6.4	6.17	4.8
2.4	35.2	21.5	7.08	7.45	-5.7
2.8	46.4	14.1	5.54	5.23	5.9
3	45.9	16.5	6.24	6.02	-3.9

1) 树线故障的发展过程可以由零序电压的变化来表现,其典型阶段有缓增、速增、下降和回升4个阶段,典型趋势有U形、J形、V形3种曲线。通过对零序电压变化的监测有助于判断树线故障以及故障发展阶段。

2) 残余电流增大会引起零序电压变化幅度减小。当植被阻抗大时,残余电流增大使零序电压幅值变化微弱时会导致故障检测更加困难,残余电流应尽量补偿至0~1 A范围内。

3) 残余电流相同时,不同植被自身参数下零序电压变化存在差异。(1)零序电压峰值。同种植被含水率越高、直径越粗,其峰值越大;不同植被竹子零序电压峰值最大,松树最小。(2)峰值时间。同种植被含水率越高、直径越粗,峰值时间越短;不同植被主要是竹子峰值时间最短,松树最长。

4) 零序电压峰值对保护动作阈值建立具有参考意义,本文提出基于植被含水率、直径以及系统残余电流的预测模型可对零序电压峰值进行有效预测。

参考文献

- [1] 杨森霖,杨长青,梅吉明,等. 架空输电线路森林火险评估及监测的研究应用现状[J]. 四川林业科技, 2021, 42(6): 126-130. YANG Senlin, YANG Changqing, MEI Jiming, et al. Research and application status on forest fire risk assessment and monitoring for overhead transmission lines[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2021, 42(6): 126-130.
- [2] 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.
- [3] 陈伟俊. 输电线路通道树线矛盾与树木生长控制技术[J]. 上海电力, 2015, 28(5): 35-41. CHEN Weijun. Tree line conflict and tree growth control technology for transmission line access [J]. Shanghai Electric Power, 2015, 28(5): 35-41.
- [4] 周济舟,刘欣宇. 一种防止树线矛盾的绝缘遮蔽管设计[J]. 电工技术, 2022(24): 90-91. ZHOU Jizhou, LIU Xinyu. Design of insulated shelter pipe for preventing tree line contradiction [J]. Electric Engineering, 2022(24): 90-91.
- [5] 陈龙,王孟,杨龙山,等. 典型植被触400 V架空线路故障引燃试验分析[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(8): 1151-1157. CHEN Long, WANG Meng, YANG Longshan, et al. Experimental analysis of typical vegetation contact with 400 V overhead line fault ignition [J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(8): 1151-1157.
- [6] 徐会凯,黄小龙,杨淳岚,等. 10 kV架空线路树线放电发展过程及其特征研究[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(4): 278-289. XU Huikai, HUANG Xiaolong, YANG Chunlan, et al. Development process and characteristics study of tree line discharge in 10 kV overhead power lines [J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(4): 278-289.
- [7] 杨博闻,陈天翔,魏玉文,等. 10kV线路下方森林火灾成因分析及实验研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(2): 271-277. YANG Bowen, CHEN Tianxiang, WEI Yuwen, et al. Analysis and experimental study on the causes of forest fires under 10 kV lines[J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(2): 271-277.
- [8] 吴田,阮江军,胡毅,等. 500 kV输电线路的山火击穿特性及机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 163-170. WU Tian, RUAN Jiangjun, HU Yi, et al. Study on forest fire induced breakdown of 500 kV transmission line in terms of characteristics and mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 163-170.
- [9] 杨淳岚,宁鑫,徐会凯,等. 电网山火监测及风险预警技术研究综述[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4765-4777. YANG Chunlan, NING Xin, XU Huikai, et al. Overview of mountain fire monitoring and early warning for power grid demand [J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4765-4777.
- [10] 熊小伏,曾勇,王建,等. 基于山火时空特征的林区输电通道风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 1-9. XIONG Xiaofu, ZENG Yong, WANG Jian, et al. Risk assessment of power transmission channels in forest regions based on spatial-temporal features of forest fire [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 1-9.
- [11] 赵荣元,陈天翔,徐会凯,等. 10 kV树线故障树木暂态阻抗变化特性实验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023, 48(2): 393-406. ZHAO Shenyuan, CHEN Tianxiang, XU Huikai, et al. Experimental research on transient impedance variation characteristics of 10 kV tree line faulted trees [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2023, 48(2): 393-406.
- [12] BUTLER K L, RUSSELL B D, BENNER C, et al. Characterization of electrical incipient fault signature resulting from tree contact with electric distribution feeders [C]//1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference

- Proceedings, July 18 – 22, 1999, Edmonton, Alta. New York: IEEE, 1999(1): 408 – 413.
- [13] 秦际轲, 宁鑫, 范松海, 等. 架空导线单相触树接地故障的放电引燃机制研究[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1289 – 1299.
QIN Jike, NING Xin, FAN Songhai, et al. Discharge ignition mechanism of tree-contacting single-phase-to-ground faults of overhead lines[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1289 – 1299.
- [14] WISCHKAEMPER J A, BENNER C L, RUSSELL B D. Electrical characterization of vegetation contacts with distribution conductors-investigation of progressive fault behavior[C]// 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 21 – 24, 2008, Chicago, USA. New York: IEEE, 2008: 1 – 8.
- [15] 尹一卓, 王军, 宁鑫, 等. 植被含水率对导线触树单相接地故障特性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 119 – 127.
YIN Yizhuo, WANG Jun, NING Xin, et al. Effect analysis of vegetation moisture content on a tree-contact single-phase-to-ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 119 – 127.
- [16] 文嘉果, 王棣生, 王军, 等. 植被尺寸对导线触树高阻接地故障特性的影响研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(4): 457 – 462.
WEN Jiaguo, WANG Disheng, WANG Jun, et al. Analysis of the influence of vegetation size on the characteristics of high resistance ground of wire touching tree[J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(4): 457 – 462.
- [17] 梁栋, 徐丙垠, 唐毅, 等. 10kV 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 10kV overhead lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5221 – 5232.
- [18] 梁栋, 徐丙垠, 王鹏玮. 10kV 架空导线单相触树接地故障检测方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 149 – 157.
LIANG Dong, XU Bingyin, WANG Pengwei. Detection method for tree-contact single-phase-to-ground fault of 10 kV overhead line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 149 – 157.
- [19] 王鹏玮, 徐丙垠, 梁栋, 等. 基于零序电流长时变化特征的中压导线碰树故障识别方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(23): 177 – 187.
WANG Pengwei, XU Bingyin, LIANG Dong, et al. Identification method for tree-touching grounding fault of medium-voltage overhead line based on long-term variation characteristics of zero-sequence current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(23): 177 – 187.
- [20] 孙震, 徐昊, 朱洪志, 等. 基于接地故障比的不平衡配电网单相接地故障选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 108 – 116.
SUN Zhen, XU Hao, ZHU Hongzhi, et al. Phase selection method of single line to ground fault in unbalanced distribution network based on ground fault ratio[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 108 – 116.
- [21] 曾祥君, 黄慧, 喻锴, 等. 基于柔性调控零序电压的配电网高阻接地及单相断线故障的选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 9 – 18.
ZENG Xiangjun, HUANG Hui, YU Kun, et al. Voltage phase selection method for high resistance grounding and a single-phase disconnection fault of a distribution network based on flexible control of zero-sequence voltage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 9 – 18.
- [22] 刘宝稳, 马宏忠. 零序电压产生机理及过渡电阻测量和选相方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1444 – 1449.
LIU Baowen, MA Hongzhong. Transition resistance measurement and fault phase selection under single-phase ground fault based on producing mechanism of zero-sequence voltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1444 – 1449.
- [23] 万信书, 方连航, 梁钰, 等. 基于三相电流幅值分析的小电流单相接地故障区段定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(4): 49 – 57.
WAN Xinshu, FANG Lianhang, LIANG Yu, et al. Method of fault section location for the small current single-phase-to-ground fault based on the amplitude analysis of three-phase current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 49 – 57.
- [24] 宗伟林, 邹运, 戴经纬, 等. 基于相电流增量的故障区间定位新方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 128 – 134.
ZONG Weilin, ZOU Yun, DAI Jingwei, et al. Novel method of fault section location based on phase current increment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 128 – 134.
- [25] 张玉玺, 王增平, 李振钊, 等. 基于特征频带暂态无功功率的配电网故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 1 – 11.
ZHANG Yuxi, WANG Zengping, LI Zhenzhao, et al. A new method of fault line selection in a distribution network based on characteristic frequency band transient reactive power[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 1 – 11.
- [26] 黄学劲, 喻松涛, 王之谦, 等. 考虑 VSC 容量约束的直流配电网线性潮流算法[J]. 南方电网技术, 2025, 19(8): 62 – 69.
HUANG Xuejin, YU Songtao, WANG Zhiqian, et al. Linear power flow algorithm of DC distribution networks considering VSC capacity constraints[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(8): 62 – 69.
- [27] 于晓军, 刘志远, 王洪炳, 等. 考虑新能源并网影响的零序过电压解列策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 111 – 117.
YU Xiaojun, LIU Zhiyuan, WANG Hongbing, et al. Zero-sequence over voltage splitting strategy considering the impact of new energy grid connection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 111 – 117.
- [28] 周恩泽, 王磊, 黄道春, 等. 植被火条件下环境风对间隙击穿电压的影响[J]. 广东电力, 2025, 38(2): 111 – 118.
ZHOU Enze, WANG Lei, HUANG Daochun, et al. Effect of ambient wind on gap breakdown voltage under vegetation fire conditions[J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(2): 111 – 118.

收稿日期: 2024-09-13; 网络首发日期: 2024-11-30

作者简介:

辜弘(2003), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术, 2077214911@qq.com;

王政(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术, 1012543681@qq.com;

陈天翔(1966), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为高电压与绝缘技术, chentx@xmut.edu.cn.