

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240281

## 10 kV 配电线路单相树线故障选相研究

杨森<sup>1</sup>, 陈天翔<sup>1</sup>, 邵千秋<sup>2</sup>, 王孟<sup>1</sup>, 陈龙<sup>1</sup>, 杨龙山<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学, 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 610041)

**摘要:** 针对配电网三相电压不平衡发生树-线故障难以准确判别故障相而引发山火的问题, 提出了一种基于电压信号突变值和变化趋势相结合的选相方法。在传统三相电压平衡配电网单相接地故障选相理论基础, 搭建了 10 kV 单相树-线故障试验平台。首先, 在中性点不接地、消弧线圈接地欠补偿和过补偿 3 种情况下进行了多种树木、不同残余电流单相树-线故障试验研究。然后, 根据树-线故障时零序电压和各相电压幅值变化特征, 定义了故障时刻及故障相识别码, 建立了某一相电压有效值的幅值增加最大则其滞后相为故障相的判据。通过故障时刻前后 0.1 s 内的各相电压平均有效值改变大小对比及相应判据, 将生成对应的识别码进行匹配, 实现精确快速判别故障相。最后, 通过试验验证该方法能够有效解决单相树-线故障相识别问题且不受电压不平衡影响, 具有较好的工程应用价值。

**关键词:** 配电网; 树-线故障; 电压突变; 故障选相

### Fault phase selection of a single-phase tree-line in a 10 kV distribution line

YANG Sen<sup>1</sup>, CHEN Tianxiang<sup>1</sup>, SHAO Qianqiu<sup>2</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, CHEN Long<sup>1</sup>, YANG Longshan<sup>1</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** It is difficult to accurately identify the fault phase and cause of wildfires due to a tree-line fault of three-phase voltage imbalance in a distribution network. Thus a phase selection method based on the combination of voltage signal mutation value and change trend is proposed. Based on the phase selection theory of a single-phase grounding fault in a traditional three-phase voltage balanced distribution network, a 10 kV single-phase tree-line fault test platform is built. First, a single-phase tree-line fault test of various trees and different residual currents is carried out under three conditions of neutral point ungrounded, under compensation and over compensation of arc suppression coil grounding. Then, from the variation characteristics of zero sequence voltage and phase voltage amplitude during a tree-line fault, the fault time and fault phase identification code are defined, and the criterion that the lag phase is the fault phase is established when the amplitude of the effective value of a phase voltage increases the most. By comparing and judging the change of the average effective value of each phase voltage within 0.1 s before and after the fault time, the corresponding identification code is generated for matching to achieve accurate and rapid identification of the fault phase. Finally, it is verified by experiment that this method can effectively solve the problem of fault phase identification of a single-phase tree-line fault and is not affected by voltage imbalance. This has good engineering application value.

This work is supported by the Key Support Project of the National Natural Science Regional Innovation and Development Joint Fund (No. U19A2080).

**Key words:** distribution network; tree-line fault; voltage leap; phase selection

## 0 引言

我国 10 kV 配电网中性点主要采取中性点不接

地和中性点经消弧线圈接地两种方式<sup>[1-3]</sup>。配电网易发生接地故障, 其中单相接地故障占总故障的 80% 以上<sup>[4-7]</sup>。许多配电线路需跨越森林等多树木地区, 树木与线路接触引发的电力故障称为树-线故障<sup>[8-9]</sup>。由于树木阻抗大, 文献<sup>[10-11]</sup>提出早期树-线故障属于高阻接地故障。树-线故障发生后, 不及时处理不仅危及电网安全运行, 甚至会造成森林火灾, 发生重大事故<sup>[12-13]</sup>。

**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资助(U19A2080); 四川省自然科学基金青年基金项目资助(2023NSFSC0827); 四川省电力公司科技项目资助(521903230001)

为避免树-线故障引发森林火灾,需要快速识别故障及故障相。配电网单相树-线故障选相判据通常是各相电压的幅值或相位进行故障选相,系统过补偿时三相电压幅值最大相的超前相为故障相,系统中性点不接地系统和谐振接地欠补偿时电压幅值最大相的滞后相为故障相<sup>[14-15]</sup>。文献[16]提出了一种直接利用电压幅值及中性点电压幅值大小关系进行选相的方法,虽然能够快速选出故障相,但没有考虑实际系统三相电压不平衡的影响。文献[17]提出了基于相位差的不对称配电网接地故障选相方法,该方法利用故障相电压和故障前后中性点电压相位差作为判据,然而存在判据单一的问题,并未充分利用故障前后的电压幅值差异来辅助选相。文献[18]提出利用附加电阻实现对地参数测量的方法,以故障发生后只有故障相对地参数变化为判据进行故障选相,但其方法可能因附加电阻阻值不恰当而影响选相结果。文献[19]利用故障电流与各相电压的相位关系判别故障相,根据测量的对地参数来判别发生了高阻故障还是断线故障,但其方法依赖对地网络参数的准确测量。文献[20]给出了消弧线圈在过补偿、欠补偿和全补偿下随着过渡电阻变化的零序电压轨迹,根据不同相发生接地故障后零序电压相位和幅值的变化特征实现故障相的判断。以上判据都是基于三相电压平衡情况下得出的,没有考虑系统不对称的情况,在发生树-线接地故障情况下容易产生误判。实际系统运行中存在三相电压不平衡现象,发生单相树-线故障时,在树木阻抗不同、系统对地电容电流不同、中性点接地方式不同情况下,如何正确快速选出故障相值得深入研究。本文搭建了 10 kV 树-线故障试验平台,在中性点不接地、谐振接地欠补偿和过补偿 3 种情况下进行了单相树-线故障试验研究,对三相电压不平衡情况下单相树-线故障故障相识别进行了研究,提出一种基于电压信号突变值和电压有效值变化趋势相结合的单相树-线故障相识别方法。

### 1 10 kV 树-线单相故障试验平台

10 kV 配电网树-线单相故障试验模拟平台如图 1 所示。10 kV 配电线路三相电压由型号为 SY11-315 kVA/0.4 kV/10 kV、连接组别为 YNyn0 的电力变压器提供。采用长 5.5 m、型号为 LGJ-120 的三相导线模拟 10 kV 线路段,试验平台并联多组 10 kV 电容器用来模拟线路与地之间产生的容性电流,使单相接地电流调节范围为 1~60 A。试验平台 10 kV 线路三相电压信号和零序电压信号均是通过变比为 100:1 的电压互感器进行测量的,流经故障树木的电

流(即泄漏电流)则是通过测量在树木与大地回路之间串联 1 Ω 无感电阻的两端电压得到,电压电流信号波形均由型号为 Pico6804E、最高采集频率 2 GHz 的录波器连接电脑进行采集记录。为了便于研究对比分析,试验平台搭配同步触发信号采集系统,可以同步采集和记录线路电气参数数据、试验视频、树木温度。试验平台等效电路如图 2 所示。

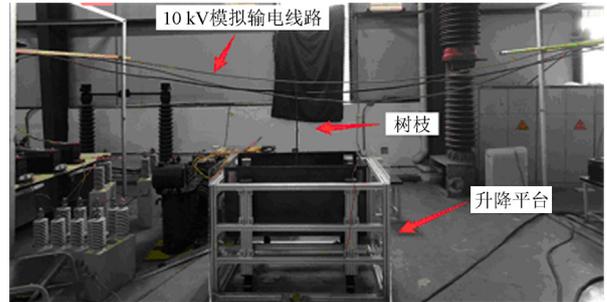


图 1 试验平台图

Fig. 1 Test platform diagram

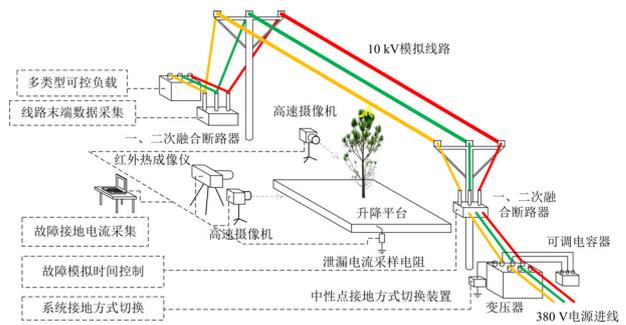


图 2 试验平台等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of the test platform

### 2 单相树-线故障时线路相电压、中性点电压分析

图 3 是 10 kV 配电网发生单相树-线故障(图中 A 相为故障相)时的简化电路图。其中:  $R_A$ 、 $R_B$  和  $R_C$  分别为配电网电路三相对地绝缘电阻;  $C_A$ 、 $C_B$

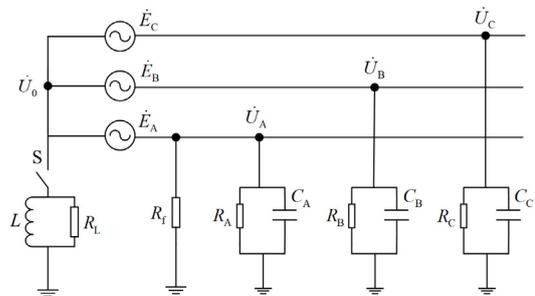


图 3 单相树-线故障简化电路图

Fig. 3 Simplified circuit diagram of single-phase tree-line fault

和  $C_C$  分别为三相对地电容;  $L$  为消弧线圈电感;  $R_L$  为消弧线圈等值电阻;  $R_f$  为故障点过渡电阻<sup>[21-23]</sup>。

### 2.1 经消弧线圈接地发生单相树-线接地故障

当开关 S 闭合, 表示 10 kV 配电网为中性点经消弧线圈接地系统。选取 A 相相电压  $\dot{E}_A$  作为参考相位, 三相对地导纳分别为  $Y_A$ 、 $Y_B$  和  $Y_C$ , 三相对地电压  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$  和  $\dot{U}_C$  分别为

$$\dot{U}_A = \dot{U}_0 + \dot{E}_A \quad (1)$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_0 + \dot{E}_B \quad (2)$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_0 + \dot{E}_C \quad (3)$$

式中:  $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$  和  $\dot{E}_C$  为三相电压;  $\dot{U}_0$  为中性点电压。

根据基尔霍夫电流定律, 中性点处流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和<sup>[24]</sup>, 可得

$$(\dot{E}_A + \dot{U}_0)Y_A + (\dot{E}_B + \dot{U}_0)Y_B + (\dot{E}_C + \dot{U}_0)Y_C = 0 \quad (4)$$

当配电网处于正常运行状态下, 可以认为对地绝缘电阻相等, 即  $R_A = R_B = R_C$ 。通过式(1)一式(4), 中性点电压  $U_0$  可表示为

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 = & -\frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = \\ & -\frac{j\omega(C_A + \alpha^2 C_B + \alpha C_C) + 1/R_f}{j\omega(C_A + C_B + C_C) - j(1/\omega L) + 1/R + 1/R_f} \dot{E}_A \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\alpha = e^{j120^\circ}$ ;  $1/R = \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}$ 。

为了更好地研究单相接地故障时过渡电阻与各相电压的关系, 设  $K$  为配电网不对称度,  $K = \frac{C_A + \alpha^2 C_B + \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C}$ ; 设  $d_f$  为过渡电阻引起的阻尼率,

$d_f = \frac{1}{R_f \omega (C_A + C_B + C_C)}$ ;  $d$  为配电网的固有阻尼率,

$d = \frac{1}{R \omega (C_A + C_B + C_C)}$ ;  $n$  为配电网的失谐度,

$n = \frac{\omega(C_A + C_B + C_C) - (1/\omega L)}{\omega(C_A + C_B + C_C)}$ ;  $\omega$  为配电网角频率。

将  $K$ 、 $d_f$ 、 $d$ 、 $n$  代入式(5)中, 可得三相对地电压如式(6)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \frac{n-d-K}{n-j(d_f+d)} \dot{E}_A \\ \dot{U}_B = \frac{a^2 n - j(a^2 d_f + a^2 d + d_f) - K}{n-j(d_f+d)} \dot{E}_A \\ \dot{U}_C = \frac{an - j(ad + ad_f + d_f) - K}{n-j(d_f+d)} \dot{E}_A \end{cases} \quad (6)$$

### 2.2 中性点不接地系统发生单相树-线接地故障

当开关 S 断开, 表示 10 kV 配电网为中性点不接地系统, 同理可以推导出中性点不接地系统发生单相接地故障后中性点电压和三相对地电压分别为

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = -\frac{d_0 + j}{d_f + d_0 + j} \dot{E}_A \\ \dot{U}_A = \frac{d_f}{d_f + d_0 + j} \dot{E}_A \\ \dot{U}_B = \frac{(a^2 - 1)d_f - j}{d_f + d_0 + j} \dot{E}_A \\ \dot{U}_C = \frac{(a-1)d_f - d_0 - j}{d_f + d_0 + j} \dot{E}_A \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $d_0 = \frac{1}{\omega(R_A + R_B + R_C)(C_A + C_B + C_C)}$ 。

式(6)一式(7)表明, 在单相接地故障发生后, 10 kV 配电网三相对地电压是故障点过渡电阻和配电网本身特性共同作用的结果, 当配电网系统本身参数引起的不对称度确定后, 各相电压是以  $d_f$  为单值函数, 即过渡电阻大小影响各相电压变化, 那么通过各相电压的原始故障波形就能清晰地反映出故障发生状况。

当系统为中性点经消弧线圈接地时, 可以得到  $-\dot{U}_0$  轨迹, 由于  $d$  和  $n$  的存在, 该轨迹是一段圆弧(劣弧), 同时因  $n$  的不同又分为过补偿、欠补偿系统; 当系统为欠补偿时,  $-\dot{U}_0$  运动轨迹是以  $\left| \frac{1}{\sin \theta} \right|$  为

直径且位于顺时针一侧的圆弧, 其中  $\theta = \arctan \frac{n}{d}$ , 其幅值范围为  $(0, |\dot{E}_A|)$ ; 系统为过补偿时,  $-\dot{U}_0$  运动轨迹是位于逆时针一侧, 根据上述可得中性点电压与各相电压之间的变化关系如图 4 所示。由图 4 可知, 无论过补偿还是欠补偿系统, 随着过渡电阻  $R_f$  增加,  $d_f$  减小,  $|\dot{U}_0|$  逐渐减小, 中性点  $O_1$  均在圆弧轨迹上向  $O$  点逐渐移动, 故障相 A 相电压幅值始终增加, 且均存在一个临界值  $d_f$  使  $O_1$  运动至 A 相与 B 相电压幅值相等的位置, 越过该临界值后, 故障相 A 相电压幅值并非最低<sup>[25]</sup>。同理可得系统为中性点不接地发生单相接地故障时, 其中性点电压和各相电压变化如图 5 所示。由图 5 可知, 中性点不接地系统发生单相接地故障时与系统经消弧线圈接地欠补偿系统时类似。

常见树木阻抗都在几十 kΩ 以上, 属于高阻范围, 并且树木阻抗在树-线故障前期发展过程中是逐渐减小的<sup>[8-10]</sup>。当系统中性点不接地和中性点经

当系统为欠补偿时,  $-\dot{U}_0$  运动轨迹是以  $\left| \frac{1}{\sin \theta} \right|$  为直径且位于顺时针一侧的圆弧, 其中  $\theta = \arctan \frac{n}{d}$ , 其幅值范围为  $(0, |\dot{E}_A|)$ ; 系统为过补偿时,  $-\dot{U}_0$  运动轨迹是位于逆时针一侧, 根据上述可得中性点电压与各相电压之间的变化关系如图 4 所示。由图 4 可知, 无论过补偿还是欠补偿系统, 随着过渡电阻  $R_f$  增加,  $d_f$  减小,  $|\dot{U}_0|$  逐渐减小, 中性点  $O_1$  均在圆弧轨迹上向  $O$  点逐渐移动, 故障相 A 相电压幅值始终增加, 且均存在一个临界值  $d_f$  使  $O_1$  运动至 A 相与 B 相电压幅值相等的位置, 越过该临界值后, 故障相 A 相电压幅值并非最低<sup>[25]</sup>。同理可得系统为中性点不接地发生单相接地故障时, 其中性点电压和各相电压变化如图 5 所示。由图 5 可知, 中性点不接地系统发生单相接地故障时与系统经消弧线圈接地欠补偿系统时类似。

常见树木阻抗都在几十 kΩ 以上, 属于高阻范围, 并且树木阻抗在树-线故障前期发展过程中是逐渐减小的<sup>[8-10]</sup>。当系统中性点不接地和中性点经

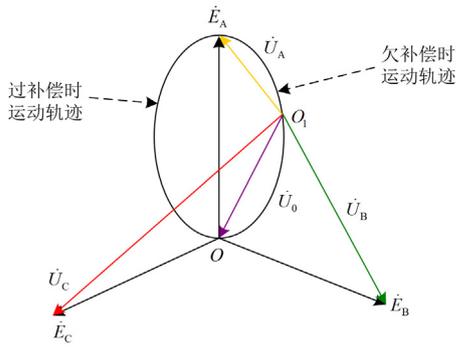


图 4 中性点经消弧线圈接地时电压相量图

Fig. 4 Voltage vector diagram when the neutral point is grounded by the arc suppression coil

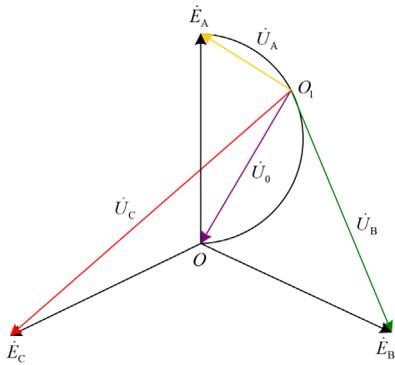


图 5 中性点不接地系统单相接地时电压相量图

Fig. 5 Voltage phasor diagram of neutral point ungrounded system with single-phase grounding

消弧线圈接地欠补偿时，随着树-线故障发展，故障相 A 相电压幅值持续减小，但其电压幅值并非最低，非故障相 C 相电压幅值始终保持最大并逐渐增大。系统中性点经消弧线圈接地过补偿时，非故障相 B 相电压幅值是始终保持最大并逐渐增大。同理可知，当其他相发生单相树-线故障时同样存在故障相幅值减小，非故障相其中一相电压幅值始终最大且持续增加的情况。

因此，无论是中性点不接地系统还是中性点经消弧线圈接地系统，当发生单相树-线故障时，故障相电压幅值会减少，非故障相其中一相电压幅值会持续增加。

### 3 试验方案

模拟 10 kV 线路正常运行时单相树-线故障过程如图 6 所示。通过调整树木位置，使树木接触线路不同相，模拟实际运行过程中不同相线路出现树-线故障情况。

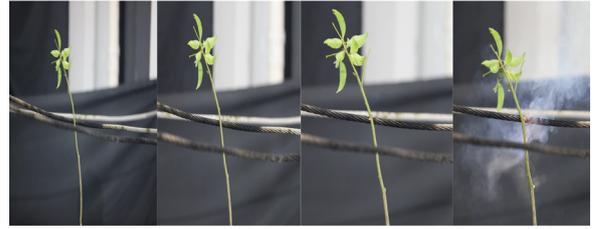


图 6 模拟单相树-线故障过程

Fig. 6 Simulation of single-phase tree-line fault process

选取具有代表性的松树、阴香、羊蹄甲 3 个树种进行试验。为了减少试验的分散性和偶然性，选择长度相同、形状粗细和含水率相近的树木作为试验样本<sup>[26]</sup>。

通过 10 kV 电容器的投切来调节线路对地电容电流大小，中性点不接地系统状态下电容电流选择 1 A、3 A 两种情况；开关 S 闭合，中性点经消弧线圈接地，通过控制 10 kV 电容器的投切容量来模拟过补偿、欠补偿状态，过补偿状态选择残余电流为 1 A、3 A，欠补偿状态选择剩余电流 1.4 A。当 10 kV 系统正常运行 20 s 后，开始启动同步触发信号采集系统，控制升降平台上升或下降，使树木与线路导线接触，以泄漏电流幅值出现突变为故障起始时刻，如图 7 所示。线路电压信号主要是 50 Hz 工频信号。为了更好地研究分析各相电压变化，试验数据采样频率统一设置为 1400 Hz，采集时间长度统一设置为 100 s。

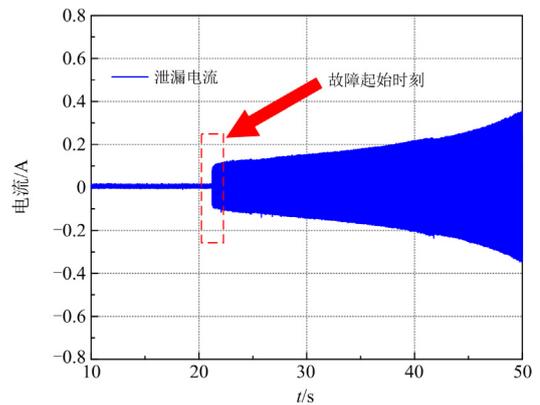


图 7 泄漏电流突变时刻

Fig. 7 Leakage current abrupt moment

### 4 试验数据分析

三相电压不平衡度指标采用 IEEE Std112-2004 标准中提出的相电压不平衡率(phase voltage unbalance rate, PVUR)，采用 PVUR 计算电压不平衡度时，不需要相角信息，只需要三相相电压数值即可<sup>[27]</sup>。

$$\begin{cases} P = \frac{\max\{|V_A - \bar{V}|, |V_B - \bar{V}|, |V_C - \bar{V}|\}}{\bar{V}} \times 100\% \\ \bar{V} = \frac{V_A + V_B + V_C}{3} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P$  为 PVUR 的值;  $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$  分别为 A、B、C 三相相电压;  $\bar{V}$  为三相电压的均值。

#### 4.1 中性点不接地系统

当断开开关 S, 使中性点不接地, 投切电容器使系统对地电容电流为 1 A, 系统正常运行时的三相电压波形如图 8 所示, A 相电压有效值为 5.965 kV, B 相电压有效值为 5.958 kV, C 相电压有效值为 5.997 kV, 电压不平衡度为 1.54%。零序电压很小。

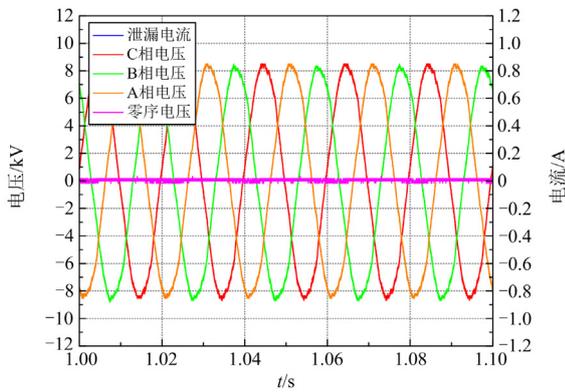
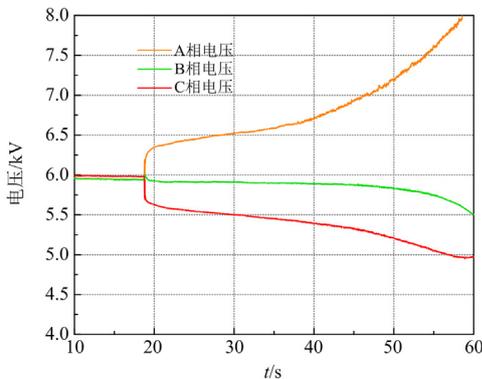


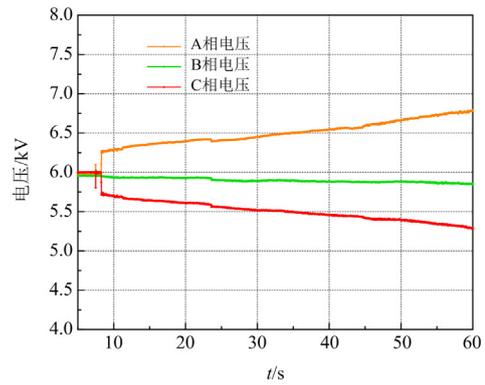
图 8 不平衡度为 1.54% 时三相电压波形图

Fig. 8 Three-phase voltage waveform with an imbalance of 1.54%

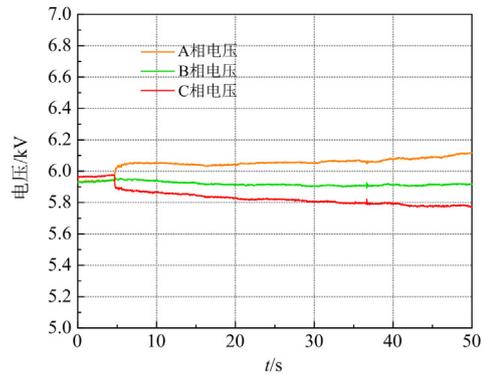
B 相发生树-线故障后各相电压有效值如图 9 所示。可以看出, 在系统正常运行时期三相电压有效值几乎不变, 不同树种故障起始时刻三相电压有效值都会发生一定程度突变且变化趋势相似。从图 9(a)可以看出, 随着树-线故障持续发展, A 相电压有效值持续增加并且始终保持最大, 在树-线故障发展 20 s 内 A 相电压有效值最大会增加至 6.681 kV, B 相电压与 C 相电压有效值持续降低, 有效值分别会



(a) 羊蹄甲接触 B 相导线各相电压有效值



(b) 松树接触 B 相导线各相电压有效值



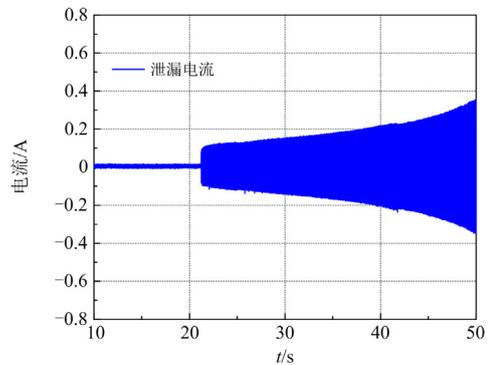
(c) 阴香接触 B 相导线各相电压有效值

图 9 B 相发生树-线故障后各相电压有效值

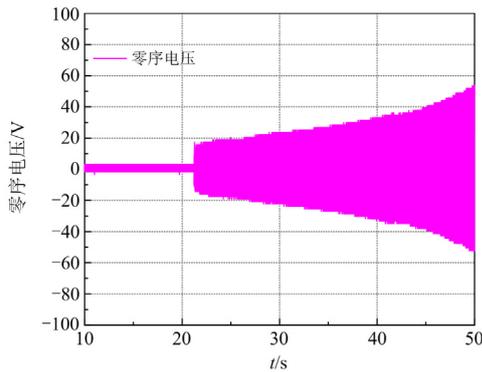
Fig. 9 Voltage variation trend after contact with phase B conductor

降低至 5.891 kV 和 5.393 kV, 且 B 相电压高于 C 相电压。随着树-线故障发展, 20 s 内电压不平衡度从正常运行时的 1.54% 持续增加到 12.60%。

羊蹄甲树-线故障泄漏电流与零序电压波形如图 10 所示。由图 10 可以看出, 泄漏电流与零序电压变化趋势是一致的, 在故障发生时刻泄漏电流与零序电压都发生突变增大且随着树-线故障发展持续增大。



(a) 泄漏电流变化趋势图



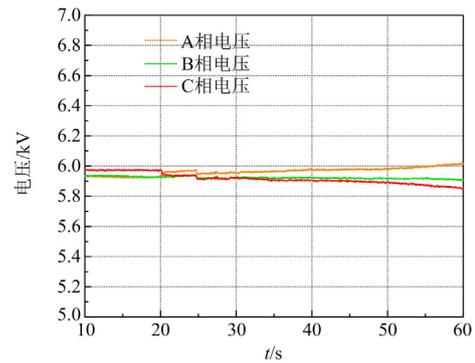
(b) 零序电压变化趋势图

图 10 羊蹄甲树-线故障泄漏电流与零序电压波形

Fig. 10 Leakage current and zero sequence voltage waveform of Yangtjia tree-line fault

不改变中性点接地方式，投切电容器使系统对地电容电流为 3 A。B 相发生树-线故障后各相电压有效值如图 11 所示，可看出系统对地电容电流为 3 A 时的三相电压有效值变化趋势与系统对地电容电流为 1 A 时大致相同，但三相电压有效值随着树-线发展故障发展变化速率明显减缓，幅值变化幅度减小。电压不平衡度从正常运行时的 1.99% 增加为 3.11%。

由图 9 和图 11 可看出，在中性点不接地系统对地电容电流 1 A、3 A 情况下，10 kV 系统正常运行



(c) 羊蹄甲接触B相导线各相电压有效值

图 11 B 相发生树-线故障后各相电压有效值

Fig. 11 Effective value of each phase voltage after phase B tree-line fault occurs

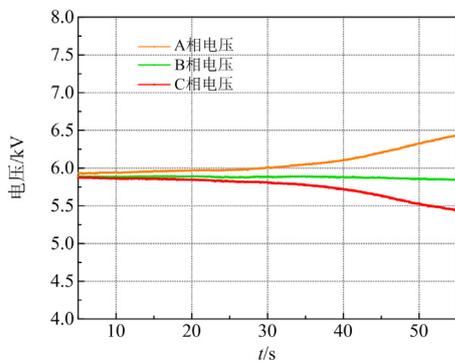
时，三相电压呈现稳态。当发生单相树-线故障瞬间泄漏电流和零序电压发生突变，后 20 s 内，随着树-线故障持续发展，泄漏电流和零序电压幅值逐渐增大，且变化趋势相似。故障相电压幅值持续降低，故障相超前相电压幅值逐渐增大且始终大于故障相电压幅值，故障相滞后相电压幅值逐渐减小且始终小于故障相电压幅值。因此，在中性点不接地系统发生单相树-线故障后，可通过三相相电压幅值大小比较进行故障相识别，判据如式(9)所示，三相电压有效值幅值次小相为故障相。

$$U_{\text{故障相超前相}} > U_{\text{故障相}} > U_{\text{故障相滞后相}} \quad (9)$$

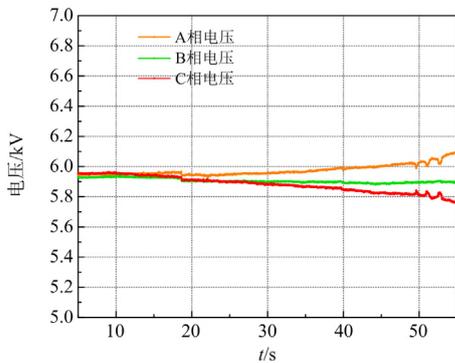
#### 4.2 中性点经消弧线圈接地欠补偿

当闭合开关 S，使中性点经消弧线圈接地，投切电容器使系统对地电容电流为 53.4 A，消弧线圈额定电流为 52 A，残余电流为 1.4 A，系统为欠补偿。在正常运行时，A 相电压有效值为 5.881 kV，B 相电压有效值为 5.871 kV，C 相电压有效值为 5.851 kV，零序电压为 1.33 V，电压不平衡度为 1.62%。

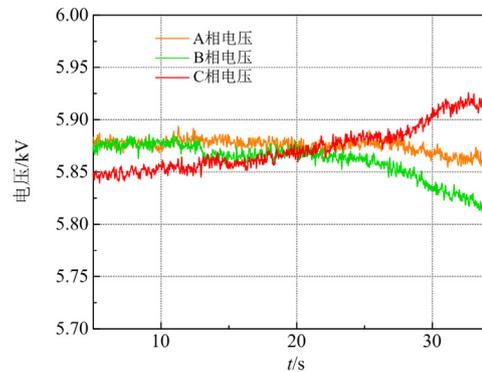
发生树-线故障后各相电压有效值如图 12 所示。从图 12 中看出，中性点经消弧线圈接地，系统为欠补偿情况下发生单相树-线故障，三相电压有效值



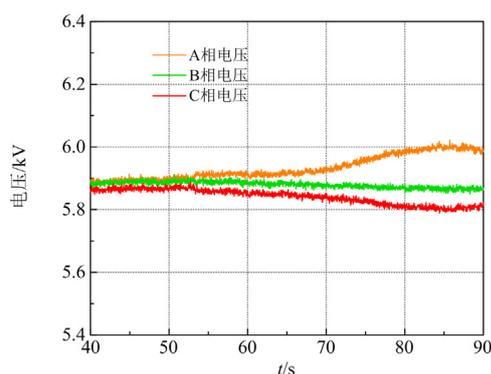
(a) 阴香接触B相导线各相电压有效值



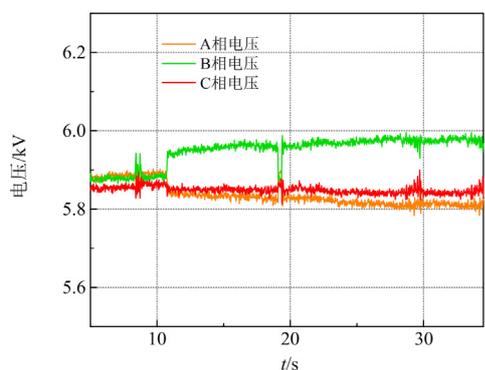
(b) 松树接触B相导线各相电压有效值



(a) 羊蹄甲接触A相导线各相电压有效值



(b) 羊蹄甲接触B相导线各相电压有效值



(c) 羊蹄甲接触C相导线各相电压有效值

图 12 发生树-线故障后各相电压有效值

Fig. 12 Effective value of each phase voltage after tree-line fault occurs

变化趋势与中性点不接地系统发生单相树-线故障时类似, 且故障发生在不同电压相上的现象一致。因此在中性点不接地系统发生单相树-线故障时, 也能用电压有效值次小相为故障相的判据进行识别。

### 4.3 中性点经消弧线圈接地过补偿

当闭合开关 S, 使中性点经消弧线圈接地, 投切电容器与消弧线圈, 使系统过补偿, 残余电流 2.6 A。系统正常运行时的三相电压波形如图 13 所示, A 相电压有效值 6.200 kV, B 相电压有效值 6.01 kV, C 相电压有效值 6.062 kV, 零序电压 2.07 V, 电压不平衡度为 1.79%。

单相树-线故障后各相电压有效值如图 14 所示。从图 14 可看出, 在中性点经消弧线圈接地过补偿情况下发生单相树-线故障, 三相电压有效值变化趋势与前述系统情况下有所区别。从图 14(b)中看出, 松树与导线刚接触时刻, 故障 C 相电压有效值突变不明显且始终为最小, 非故障相有效值突变明显, 但随着树-线故障发展, 三相电压有效值变化幅值并不明显。而用电压有效值是次小相为故障相

判据和用三相电压幅值最大相的超前相为故障相判据都会导致故障相误判。

### 4.4 选相策略

通过对中性点不接地、中性点经消弧线圈接地系统发生单相树-线故障后各相电压以及中性点电压变化规律以及试验现象分析, 发现故障相电压有效值将小于其故障前相电压有效值, 非故障相电压其中一相电压有效值将大于故障前相电压有效值并持续增加, 零序电压有效值较故障前会增加。因此, 可以利用零序电压突变和各相电压有效值变化相关

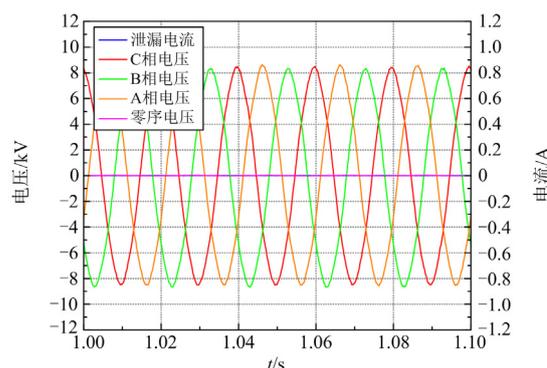
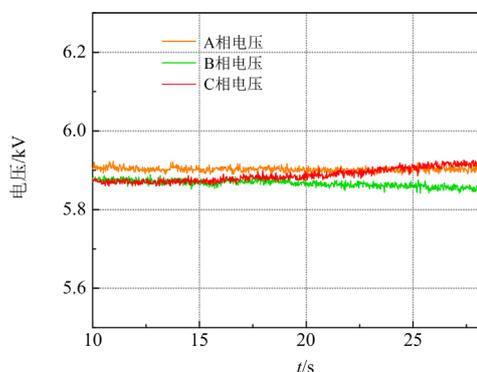
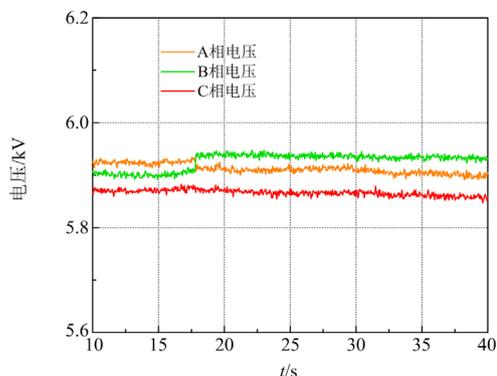


图 13 过补偿系统正常运行时电压变化

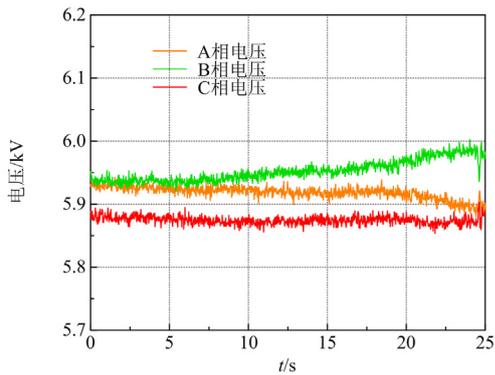
Fig. 13 Voltage variation of overcompensation system during normal operation



(a) 羊蹄甲接触A相导线各相电压有效值



(b) 松树接触C相导线各相电压有效值



(c) 羊蹄甲接触C相导线各相电压有效值

图 14 发生树-线故障后各相电压有效值

Fig. 14 Effective value of each phase voltage after tree-line fault occurs

信息来判别故障相。

正常运行配电线路发生树-线故障时，零序电压会发生突变，在线路对地电容电流 1 A、3 A 情况下，3 种树木、25 个样本的试验研究发现：发生树-线故障时零序电压突变都超过了 5 V，因此以零序电压突变超过 5 V 作为故障信号阈值。设  $U_{t1}$  为故障时刻前 5 个周期内的各相电压平均有效值，即 0.1 s

内电压平均有效值； $U_{t2}$  为故障时刻后 0.1 s 内的各相电压平均有效值。则  $\Delta U_i$  为发生树-线故障后各相电压突变值， $\Delta U_i = U_{t2} - U_{t1}$ ， $i = A, B, C$ 。设  $T_i$  为各相电压突变信息量，如式(10)所示。

$$T_i = \delta_{i, \text{argmax}(\Delta U_A, \Delta U_B, \Delta U_C)} \quad (10)$$

式中， $\delta_{i, \text{argmax}(\Delta U_A, \Delta U_B, \Delta U_C)}$  为相电压突变值增加最大位置的克罗内克函数。

根据  $\Delta U_i$  大小对比， $T_i$  有对应数值，例如其中 A 相电压突变幅值增加最大，则  $T_A = 1, T_B = T_C = 0$ ，令  $M = [T_A, T_B, T_C]$  作为树-线故障选相识别码。

将不同树木在三相电压不平衡、中性点不接地、消弧线圈接地欠补偿和过补偿、不同对地电容电流情况下，进行选相识别试验，单相树-线接地故障选相试验验证结果如表 1 所示。从表 1 看出，当 10 kV 配电线路发生 A 相树-线接地故障时， $M$  识别码是 [0,0,1]；发生 B 相树-线接地故障时， $M$  识别码是 [1,0,0]；发生 C 相树-线接地故障时， $M$  识别码是 [0,1,0]。仅需要计算出电压突变值进行大小比较，生成相应的  $M = [T_A, T_B, T_C]$ ，将识别码  $M$  代入数据库进行自动匹配即可实现精确快速选相。

表 1 单相树-线接地故障选相试验验证结果

Table 1 Phase selection test verification results of single-phase tree-line grounding fault

| 树木种类 | 中性点接地方式 | 电压不平衡度/% | 系统剩余电流/A | 各相电压 $\Delta U_i/V$ |              |              | 识别码 $M$ | 选相结果  | 是否正确 |
|------|---------|----------|----------|---------------------|--------------|--------------|---------|-------|------|
|      |         |          |          | $\Delta U_A$        | $\Delta U_B$ | $\Delta U_C$ |         |       |      |
| 松树   | 不接地     | 1.54     | 电容电流 1   | 273                 | -82          | -371         | [1,0,0] | B 相故障 | 正确   |
| 阴香   | 不接地     | 1.54     | 电容电流 1   | -125                | 134          | -11          | [0,1,0] | C 相故障 | 正确   |
| 羊蹄甲  | 不接地     | 1.54     | 电容电流 1   | 385                 | -29          | -371         | [1,0,0] | B 相故障 | 正确   |
| 松树   | 不接地     | 1.99     | 电容电流 3   | 166                 | -10          | -170         | [1,0,0] | B 相故障 | 正确   |
| 阴香   | 不接地     | 1.99     | 电容电流 3   | 23                  | -19          | -124         | [1,0,0] | B 相故障 | 正确   |
| 羊蹄甲  | 不接地     | 1.99     | 电容电流 3   | 66                  | 15           | -2           | [1,0,0] | B 相故障 | 正确   |
| 羊蹄甲  | 经消弧线圈接地 | 1.62     | 电容电流 1.4 | -2                  | -7           | 10           | [0,0,1] | A 相故障 | 正确   |
| 羊蹄甲  | 经消弧线圈接地 | 1.62     | 电容电流 1.4 | 13                  | -41          | -118         | [1,0,0] | B 相故障 | 正确   |
| 羊蹄甲  | 经消弧线圈接地 | 1.62     | 电容电流 1.4 | -38                 | 71           | -11          | [0,1,0] | C 相故障 | 正确   |
| 松树   | 经消弧线圈接地 | 1.79     | 电感电流 2.6 | -26                 | 29           | -1           | [0,1,0] | C 相故障 | 正确   |
| 羊蹄甲  | 经消弧线圈接地 | 1.79     | 电感电流 2.6 | -76                 | -108         | 33           | [0,0,1] | A 相故障 | 正确   |
| 阴香   | 经消弧线圈接地 | 1.79     | 电感电流 2.6 | -1                  | 27           | -1           | [0,1,0] | C 相故障 | 正确   |

故障相选相方法实施流程如下所述。

1) 实时监测 10 kV 配电线路三相电压和零序电压信号，并实时循环存储 0.1 s 内信号并计算前 0.1 s 内零序电压平均有效值与实时采集零序电压信号有效值之间的差值，若零序电压变化超过故障信号阈值，启动故障选相程序。

2) 计算故障时刻发生前后各相电压突变量信息值，生成相应选相识别码。

3) 将选相识别码代入选相判断数据库进行匹配，进而判别故障相，随即迅速采取相应措施。

## 5 总结

1) 理论分析和试验研究了中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地欠补偿情况下，发生单相树-线故障后 20 s 内，故障滞后相电压幅值逐渐减小且始终小于故障相，故障超前相电压幅值逐渐增

大且始终大于故障相,并且泄漏电流与零序电压变化趋势相似,同时系统电压不平衡度逐渐增大;在中性点经消弧线圈接地过补偿情况下,故障相的滞后相电压幅值逐渐增大且始终大于故障相电压,但故障相电压幅值并非次小者。

2) 利用三相电压和零序电压突变值作为信息量进行选相,当零序电压发生 5 V 以上突变后,对比故障时刻前后各相电压变化幅值大小,某一相电压有效值增加最大,则故障相为其滞后相。生成对应的识别码, A 相树-线故障识别码[0,0,1], B 相树-线故障识别码[1,0,0], C 相树-线故障识别码[0,1,0]。发生单相树-线故障后 0.1 s 将生成识别码进行匹配,实现精确快速选相。该方法不受负荷状况、系统振荡、电压不平衡影响,且无需复杂的判断逻辑。

### 参考文献

- [1] 李景丽,赵子敬,刘鹏,等. 配电网弧光接地故障相辨识方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(6): 137-146.  
LI Jingli, ZHAO Zijing, LIU Peng, et al. Phase identification method of arc grounding fault in distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 137-146.
- [2] 白浩,黄升平,潘姝慧,等. 配电网中性点电压主动调制的接地故障零序电流多判据选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 105-113.  
BAI Hao, HUANG Shengping, PAN Shuhui, et al. Zero sequence current multi-criteria line selection method based on active regulation of neutral voltage in distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 105-113.
- [3] LIU B, MA H, XU H, et al. Single-phase-to-ground fault detection with distributed parameters analysis in non-direct grounded systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(1): 139-147.
- [4] 关荣根. 小电流接地系统单相接地故障特征分析及其应用[J]. 水电与新能源, 2023, 37(10): 39-42.  
GUAN Ronggen. Characteristic analysis of single-phase grounding fault in small current grounding system and its application[J]. Hydropower and New Energy, 2023, 37(10): 39-42.
- [5] 郭亮,屈新宇,王晓卫,等. 基于改进 Hough 变换的消弧线圈接地配电网故障选线新方法[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 132-142.  
GUO Liang, QU Xinyu, WANG Xiaowei, et al. A novel fault feeder selection method for resonant grounding distribution networks based on improved hough transform[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 132-142.
- [6] 常新建,邵文权,程远,等. 基于模型预测控制的配电网单相接地故障有源消弧[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 161-169.  
CHANG Xinjian, SHAO Wenquan, CHENG Yuan, et al. Active arc suppression of a single-phase grounding fault in distribution network based on model predictive control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 161-169.
- [7] 刘健,王毅钊,张小庆,等. 中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障数据分析[J]. 供用电, 2022, 39(4): 40-44.  
LIU Jian, WANG Yizhao, ZHANG Xiaoqing, et al. Statistics of single-phase grounding faults with arc suppression coil grounding systems[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(4): 40-44.
- [8] 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/OL]. 工程科学与技术: 1-16[2024-03-11].  
<https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202300675>.  
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: 1-16[2024-03-11]. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202300675>.
- [9] 杨淳岚,陈天翔,杨博闻,等. 中压线路树木接地故障放电特性试验[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 38-44.  
YANG Chunlan, CHEN Tianxiang, YANG Bowen, et al. Discharge characteristic test of tree grounding fault of medium voltage line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 38-44.
- [10] 赵燊元,陈天翔,徐会凯,等. 10 kV 树线故障树木暂态阻抗变化特性试验研究[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.
- [11] 宁鑫,胡馨月,张华,等. 配电线路单相触树接地故障特征分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(7): 137-143.  
NING Xin, HU Xinyue, ZHANG Hua, et al. Characteristic analysis of tree-contact single-phase-to-ground fault in power distribution lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2023, 35(7): 137-143.
- [12] 赵福平,范松海,冀一玮,等. 配电网树线放电故障容性电流转移消弧实验研究[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 51-58.  
ZHAO Fuping, FAN Songhai, JI Yiwei, et al. Experimental study on capacitive current transfer arc suppression of treeline discharge fault in distribution network[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 51-58.
- [13] 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.
- [14] 张馥荔, 张红旗. 小电流接地系统单相接地故障的小波选线方法[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 70-74.  
ZHANG Fuli, ZHANG Hongqi. Wavelet line selection method for single-phase grounding fault in small current grounding system[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 42(4): 70-74.
- [15] 郭谋发, 游建章, 郑泽胤. 配电网单相接地故障柔性消弧技术综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4232-4246.  
GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHENG Zeyin. Review of flexible arc suppression technology for single-phase-to-ground fault in distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4232-4246.
- [16] 叶远波, 蔡翔, 谢民, 等. 配电网单相接地故障快速选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 96-103.  
YE Yuanbo, CAI Xiang, XIE Min, et al. Fault phase fast detection of the single-phase-to-ground fault in a power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 96-103.
- [17] 徐波, 张建文, 蔡旭, 等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.  
XU Bo, ZHANG Jianwen, CAI Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 175-182.
- [18] 王鹏, 张贺军, 徐凯, 等. 主动干预型消弧装置的附加电阻故障选相方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 180-186.  
WANG Peng, ZHANG Hejun, XU Kai, et al. Additional resistance based fault phase identification method suitable for active interference arc suppression device[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(4): 180-186.
- [19] 曾祥君, 黄慧, 喻锟, 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.
- [20] 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.
- [21] 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]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 50(12): 108-116.
- [22] 于群, 陈志慧. 电网不对称条件下基于频数分布理论的谐振接地系统故障相辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 96-104.  
YU Qun, CHEN Zhihui. Grounding phase determination in resonant grounding systems based on frequency distribution theory in case of unsymmetrical voltage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 96-104.
- [23] 齐郑, 郑宇航, 杭天琦, 等. 基于暂态过程的非有效接地系统故障相辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 155-160.  
QI Zheng, ZHENG Yuhang, HANG Tianqi, et al. Transient process based fault phase identification method for non-effectively grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 155-160.
- [24] XIAO Y, OUYANG J, XIONG X, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-13.
- [25] 刘丰, 曾祥君, 谢李为, 等. 基于相电压差值极性的配电网单相接地故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 155-165.  
LIU Feng, ZENG Xiangjun, XIE Liwei, et al. Single-phase grounding fault detection method for a distribution network based on phase voltage difference polarity value[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 155-165.
- [26] 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.
- [27] 方伟明, 程汉湘, 钟榜, 等. 基于电压幅值的不平衡度算法[J]. 广东电力, 2016, 29(4): 89-93.  
FANG Weiming, CHENG Hanxiang, ZHONG Bang, et al. Algorithm for degree of unbalance based on voltage amplitude[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(4): 89-93.

收稿日期: 2024-03-12; 修回日期: 2024-05-17

作者简介:

杨森(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术; E-mail: 646938810@qq.com

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

(编辑 张颖)