

基于故障波形时频特征配网故障识别方法研究*

秦雪¹, 刘亚东¹, 孙鹏², 王鹏³, 江秀臣¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240; 2. 云南电力科学研究院 昆明 650000;
3. 国网河南省电力公司电力科学研究院 郑州 450052)

摘要: 配电线路故障类型的准确识别可为线路运维人员提供方向性的指导。基于对故障波形时频特征的分析,提出了一种配电线路故障类型识别方法,通过对不同类型故障波形建立模型与理论分析,从时域、频域和电弧3个方面提出可以表征不同故障类型波形特点的特征参量;并提出依据故障波形数据提取特征参量的计算公式,将多参量融合作为依据建立识别逻辑,通过对输入波形数据特征量的检测归类,实现对不同原因引起的配网线路故障类型的自动识别。最终利用美国电力研究协会(EPRI)提供的136组现场故障波形数据对算法进行了闭环控制与验证,结果显示识别成功率达到90%,证实了利用故障波形时频特性实现配电线路故障类型识别的可行性。

关键词: 配电网;故障原因;时频特性;电弧模型;识别方法

中图分类号: TM935.2 TM726 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4051

Study on the line fault root-cause identification method in distribution networks based on time-frequency characteristics of fault waveforms

Qin Xue¹, Liu Yadong¹, Sun Peng², Wang Peng³, Jiang Xiuchen¹

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Yunnan Electric Power Research Institute, Kunming 650000, China;
3. Electric Power Research Institute, Henan Electric Power Company, State Grid, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Accurate identification of distribution network fault type can provide directive guidance for the operation and maintenance personals of transmission lines. In this paper, a new fault root-cause identification method of distribution network based on the time and frequency characteristic analysis of fault waveforms is proposed. Through model building and theoretical analysis of different types of fault waveforms, the characteristic parameters are proposed, which can characterize different kinds of fault waveforms from time domain, frequency domain and arc model. The formulas for calculating characteristic parameters from fault waveform data are proposed. Multiple characteristic parameters are fused, and based on which the classifier is built; the fault types of the distribution network caused by different root-causes are identified automatically through detecting and analyzing the characteristic parameters of the input waveform data. Finally, the proposed classification method was tested and verified using 136 groups of different field fault waveform data provided by EPRI; the test results show that the successful identification ratio reaches to 90%, which verifies the feasibility of using fault waveform time and frequency characteristics to realize the fault type identification of distribution networks.

Keywords: distribution network; fault root cause; time-frequency characteristic; arc model; identification method

1 引言

随着近年来我国社会经济的发展以及工农业生产的

不断进步,我国对于电力资源的需求越来越大。配电网是直接分配电能的网络,直接面向用户,其供电可靠性和安全性越来越受到人们的关注。10 kV 架空配电线路作为配电网的重要组成部分,量大面广线长、绝缘水平低,

跳闸故障率居高不下。因此,通过故障现场波形对配网线路故障类型准确判断,对提高配电网的运维水平、降低故障率具有重大意义。一方面可以更加快速准确地判断故障类型进而解除故障,有利于配电网运维单位及时发现运维工作中的不足;另一方面通过对现场波形的实时监测与数据库中的历史案例进行特征量的比对分析,实现故障预测,为下一步制定有针对性的专项技术措施消除隐患提供依据。

在配电网线路故障类型识别方面,国内已有文献针对高阻故障、单相接地故障、间歇性故障这几类故障的识别,诊断与定位方法进行研究,包括被动式定位法、主动式定位法、监测定位法和智能定位法等^[1]。文献[1-2]分别针对配电网线路本身质量因素、人为因素、环境因素等配电网线路的故障原因进行了分析,并提出了相应的故障处理措施;文献[3]提出了将电容电流和发生接地故障时电压的变化量相结合的综合检测法对接地故障进行检测;文献[4]提出了综合利用故障行波及其反射折射波的分布式故障定位方法。但目前,国内针对故障原因识别的研究较少,且主要集中在输电线路的雷击故障识别,鲜有文献对由于动物、树木、车辆等引起的非雷击故障的辨识进行研究。文献[5-6]均采用行波法对雷击故障进行识别;文献[7]通过分析不同故障类型的暂态行波能量变化,提出基于修正能量比的线路雷击故障识别方法。

国外已有文献根据线路故障的电压电流波形对故障原因进行识别。文献[8]对由动物、雷击、树3种故障原因导致的故障进行了分析,并提出了利用故障三相电压电流波形进行判别的依据。但是仅对判据的可行性进行了探讨,并没有建立完整可靠的识别逻辑系统。文献[9]对由动物导致的线路故障特性进行了分析,并提出了相应的预防措施,但未提到其他原因导致的线路故障。

针对动物、树木、车辆、雷电、设备老化5种原因导致的故障,在时域、频域、以及电弧特征3个方面提出可以表征这几类故障波形特点的特征参量。依据故障波形数据提出了提取特征参量的计算公式,并利用多参量融合作为依据建立了完整的识别逻辑,通过对输入波形数据特征量的检测归类,实现对不同原因引起的配网线路故障类型的自动识别。最终利用美国电力研究协会(EPRI)提供的136组现场故障波形数据对算法进行了闭环控制与验证,结果显示识别成功率达到90%。

2 故障波形特征分析

引发配电网线路发生故障,出现电能质量干扰的因素有很多,主要介绍树木碰线故障、动物引起的故障、车辆引起的故障、雷电引起的故障以及设备故障5种故障类型。

首先,在时域上分析不同故障类型的波形特征。典型的配电网线路故障电压电流波形如图1所示。本文提取故障相数、故障持续时间、故障电流分量以及断路器故障时电流衰减程度作为特征参量进行后续分析。

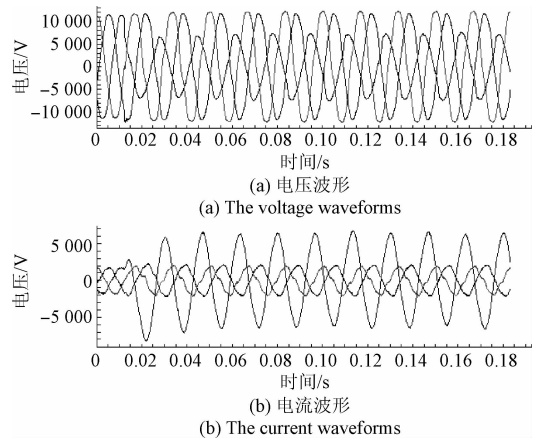


图1 典型配电网线路故障电压电流波形

Fig.1 Typical distribution line fault voltage and current waveforms

其次,考虑到故障波形中还包含短脉冲或高频振荡等高频成分,树木、雷电等外部破坏引起的故障高频成分所包含的能量可能更多。因此,还利用三尺度正交小波变换在频域上对故障相电压进行了分析,小波变换结果如图2所示,进而研究故障波形不同频段的频谱与能量分布。

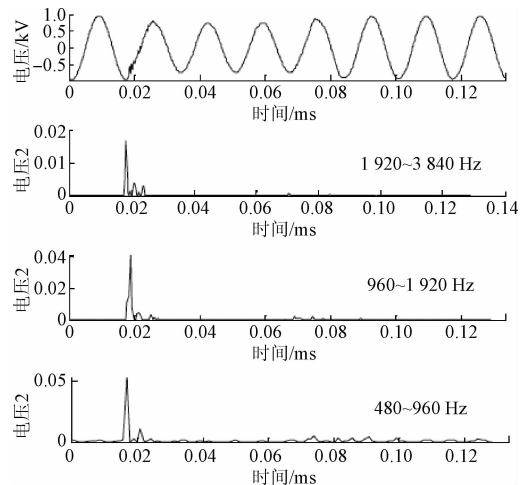


图2 故障相电压小波变换结果

Fig.2 Wavelet transform results of fault phase voltage

另外,树木压迫导线等外部故障,以及绝缘子击穿等内部故障都会使介质中产生电弧,对于不同故障类型,可以将其等效为串联电弧或并联电弧模型进行研究,如图3所示。因此,除了在时域和频域上的分析外,还将对不同故障类型的电弧特征进行分析。

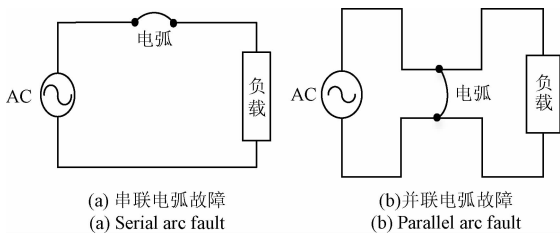


图 3 不同故障类型的电弧模型

Fig.3 Different types of arc fault models

2.1 不同故障类型的时域特征

1) 故障相数

当发生树木碰线故障时,夏季和秋季容易出现大风等不良天气,在风力影响下树枝极易与导线发生接触或树木坍塌压迫导线,此时一般为单相接地故障。另外,树枝落在导线上还可能造成相间短路或树木坍塌压迫导线直接造成三相断路故障。

春夏季节动物活动比较频繁,蛇等动物在捕食食物过程中容易攀爬至变压器顶盖或杆塔塔顶,由于体型较长,可能会触及高压接线柱或者引起绝缘子短接进而引起闪络故障发生。另外,春季会有鸟类在配电线路杆塔上筑巢、孵化,当杆塔上的鸟巢和导线之间距离过近时,鸟巢很容易被大风吹散到导线或绝缘子上,造成线路绝缘子短接,形成单相接地短路。

当汽车撞到电线杆上的电缆保护管时,里面的电缆将受到损坏甚至造成电线杆倒塌,当电杆吊挂在导线上时会造成导线混连,进而引起相间短路故障。另外,也可能发生由于吊车吊臂碰线引发线路故障的情况。当配电线路旁有吊车施工时,如果吊车起吊或转臂过程中距离导线过近,就也会造成相地之间发生短路。

当由于雷电产生的感应过电压引起多相同时闪络时,会在雷击闪络的通道上建弧进而形成工频续流,工频短路电流幅值高(数千安),时间短(0.1秒级)。由于雷电故障产生电弧的弧根不能沿着绝缘导线滑动,而是只能固定在雷击闪络处发生集中放电^[10],在短时间内工频短路电流就可以将绝缘导线烧断。所以,由于雷电引起的故障多为多相断线事故。

春夏季节空气潮湿可能会导致电气设备受潮,设备的绝缘性能下降,将严重影响系统的正常安全运行。线路上的分支熔断器绝缘击穿、配电变压器的高压引线断线、配电变压器上的熔断器或避雷器绝缘击穿^[11],或者绝缘子击穿、配电变压器的高压绕组单相绝缘接地或击穿等等设备故障均可能造成某相导线断线或落在横担上形成接地故障。因此,由于设备内部绝缘老化引发的故障一般为单相故障。

综上,树木、动物、车辆和设备故障均会引起单相接地

故障,车辆和树木均会引起相间故障,树木和雷电均会引起三相断路故障,可以利用故障相数对故障类型进行区分。

2) 故障持续时间

架空线路故障很多是可以自恢复的,甚至在保护装置动作之前故障已经消除,比如大风或树枝引起的碰线等,在保护设备动作之前就已经脱离,因此持续时间普遍很短。但动物爬到线路或者变压器上引起线路接地短路时,流过其身体的大电流会瞬时将其电死,引起持续的故障接地直至保护装置动作。

一般来说,10 kV 配电网发生单相接地短路采用零序电流或零序功率方向保护。继电器装置动作时间一般在 20 ms 左右,断路器动作时间 = 保护动作时间 + 断路器固有分闸时间,保护动作时间一般在 30 ms 左右,断路器分闸时间一般是 40 ~ 60 ms^[12]。因此,从发生故障到故障切除,至少需要 90 ms,即 5 ~ 6 个周波,可以利用动物引起的单相接地故障持续时间较长对其进行区分。

3) 故障电流分量

当线路正常运行时,电流取决于负荷功率^[13],根据城市电力规划规范标准,10 kV 配电网负荷一般小于 15 000 kW,因此正常运行相电流小于 $\frac{15\ 000}{\sqrt{3} \times 10} = 866\text{ A}$ 。

树木碰线以及车辆撞杆均可能引起相间故障。当由于树木碰线发生相间短路时,断掉的树枝挂在两根导线上架起一座“桥”,因为持续电流的发热会导致树枝发生碳化,电阻显著降低又促进了碳化过程的加剧,最终形成电阻极低的碳化通道,形成大故障电流。

此时,复合序网如图 4 所示,故障相电流幅值 $I = \frac{\sqrt{3}E_a}{Z_1 + Z_2 + 3Z_k}$ 。其中, $Z_1 = Z_2$ 即线路正序阻抗, Z_k 是碳化通道的电阻大约在 1 Ω,10 kV 配电网一般采用架空绝缘导线,电阻大约为 0.5 Ω,所以计算得到故障相电流可以达到 4 330 A,故障电流分量为 4 330 - 866 = 3 465 A。

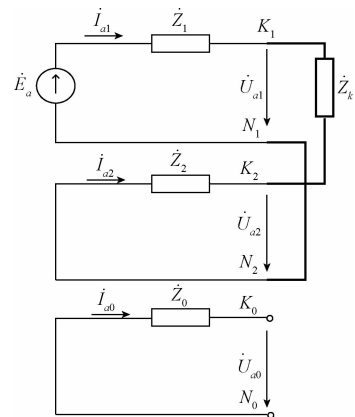


图 4 相间短路复合序网

Fig.4 Phase short circuit composite sequence network

而车辆撞杆引起导线混连时,线路阻抗较大,所以故障电流幅值比树木碰线引发的相间故障的故障电流幅值要小得多,可以利用故障电流分量大小对相间故障进行区分。

4) 断路故障电流衰减程度

雷击以及树木压断导线均可能引发断路故障。10 kV配电路相邻杆塔之间水平距离一般在100 m左右,所以当线路两端树木倒塌压迫线路时分析受力,垂直于导线的作用力较小,不足以引起三相同断。因此,由于树木断线引起线路三相断路的断点一般靠近线路中间位置,断线相电流约为健全相电流的一半;而由于10 kV架空配电路本身没有很强的引雷效果,末端靠近用户侧周围高耸、尖锐的建筑物较多,并且可能存在一些电磁干扰设施会导致雷电地闪的活动增强,所以断点一般靠近线路末端,断线相电流只会比正常运行时稍低。本文将断线相电流与正常运行时相电流的比值定义为断线故障中的电流衰减程度,即:

$$\alpha_{\text{ATT}} = \frac{I_{pk\text{Min}}}{I_{0pk}} \quad (1)$$

式中: $I_{pk\text{Min}}$ 是故障持续时间中各相电流幅值的最小值, I_{0pk} 是故障发生前相电流幅值, α_{ATT} 可以作为特征量对不同故障类型进行区分。

2.2 不同故障类型的频域特征

当系统中出现一个电流冲击成分时,可能会引发一系列的冲击分量,短脉冲或高频振荡等高频成分^[14]。小波变换可以用来分析频谱,利用三尺度正交小波变换对故障相电压进行分析。图5和6分别是同电压等级的线路由雷电和树木引起故障时故障相电压的小波变换结果,可以看出不同原因引起的线路故障其各频段的幅值与能量分布存在差异。雷电引起的故障由于存在脉冲的传播产生行波,导致其1 920~3 840 Hz频段的高频分量能量是由树木碰线故障引起的10倍左右。

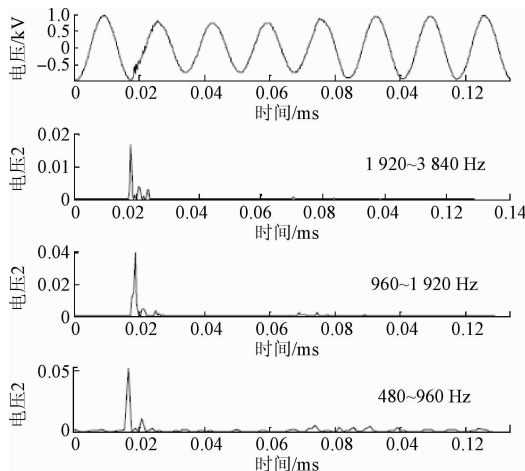


图5 雷电引起的故障相电压的小波变换
Fig. 5 Wavelet transform result of the fault phase voltage caused by lightning

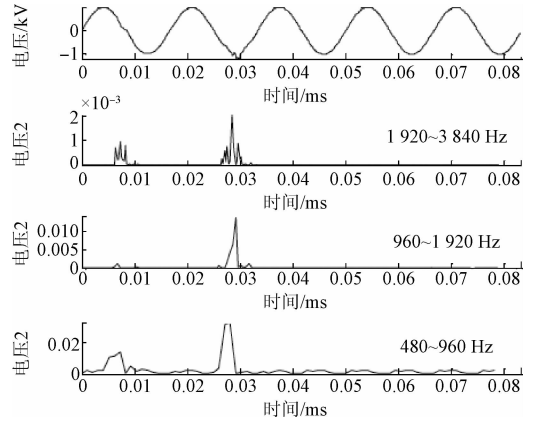


图6 树木碰线引起的故障相电压的小波变换
Fig. 6 Wavelet transform result of the fault phase voltage caused by tree contact

2.3 不同故障类型的电弧特征

电弧是一种可以穿过绝缘介质,连续地发光并放电的一个过程。故障电弧按发生的方式可以分为串联、并联两类。串联电弧是指在单一的带电导体内,如果发生连接点处接触不良,则会产生电压差将间隙击穿形成电弧,此时电弧将沿着绝缘体部分的导电表面发展,如图3(a)所示。并联电弧是指在两个带电导体之间,如果发生了绝缘老化,一段时间后会形成一条碳化通道。当线路的绝缘水平降低到一定临界值后,碳化通道就会被导体间的电压击穿,形成电弧性短路,如图3(b)所示。当发生外部故障,即树木或车辆碰线时会引起高压放电,高压电通过树干等接地造成高压单相接地,因此可以将其看作是并联电弧故障;而由于绝缘老化以及接触不良造成的设备故障可以看作是串联电弧故障。

电弧电压作为电弧最重要的特征量,包含了引起电能质量扰动的关键信息。电弧的非线性振动表现出的高频分量使电弧电压波形近似为一个矩形波,真实的电弧电压和电流波形如图7所示。

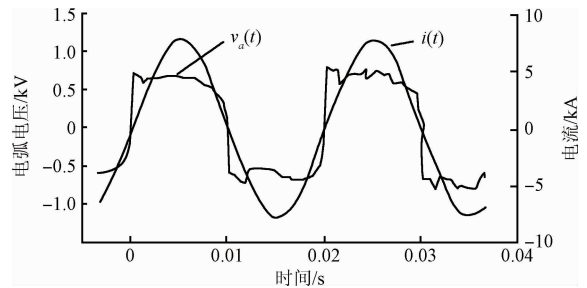


图7 真实的电弧电压和电弧电流波形
Fig. 7 The actual arc voltage and current waveforms

假设电弧电压是一个相位与电弧故障电流相同的方波,则电弧电压在数学上可以通过一个简单的表达式来

表示出来:

$$v_a(t) = V_a \text{sgn}[i(t)] + \xi(t) \quad (2)$$

式中: $v_a(t)$ 和 $i(t)$ 分别为电弧电压和电流, V_a 为方波的幅值, sign 是符号函数, $\xi(t)$ 是零均值白噪声。基于上述表达式的电弧电压模型, 计算机仿真电弧电压结果如图 8 所示。

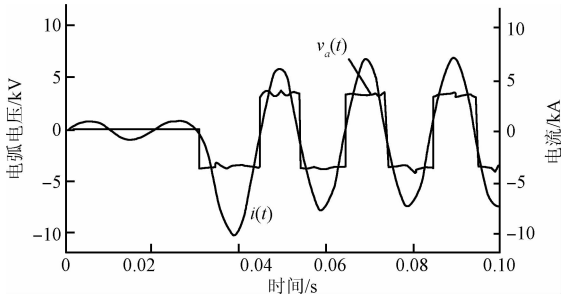


图 8 计算机仿真的电弧电压和电流波形
Fig. 8 Simulated arc voltage and current waveforms

因此, 根据文献 [15-16] 提出的公式, 单相故障电弧电压的幅值可以通过图 9 所示的模型来计算。

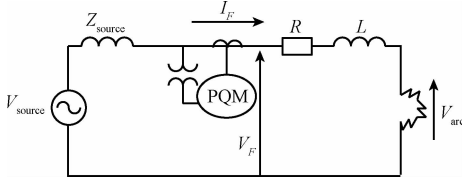


图 9 单相故障电弧电压幅值估算模型^[17]
Fig. 9 Arc voltage magnitude estimation model of single-phase fault^[17]

故障侧监测到的电压 V_f 可以用式 (3) 来表示, 可以利用最小二乘法求取该多因素决定的式子的解, 得到电弧电压 V_{arc} 。

$$V_f = R \times I_f + L \frac{dI_f}{dt} + V_{\text{arc}} \times \text{sign}(I_f) \quad (3)$$

式中: V_f 为故障相电压, L 为线路电感, R 为线路电阻, V_{arc} 为电弧电压, $\text{sign}(I_f) = \begin{cases} 1, & I_f > 0 \\ 0, & I_f \leq 0 \end{cases}$ 。

当发生外部故障时, 比如树木或车辆碰线导致高压电通过树干等接地。因为树与高压线之间不是金属硬连接, 电气的松弛连接会导致电弧产生。当电气线路在接点处存在松弛接触, 点间的电压又足以击穿空气间隙时, 就会形成空气导电。如果接点空气间隙较大, 又恰逢处于电压波形的峰值, 此时空气间会拉起电弧; 如果接点空气间隙较小, 那么即使电压不大, 空气也可能被击穿而产生电弧。这样在接触的地方会引起空气的持续电离, 随着触头的不断拉开, 电弧越来越长。而由于车辆引起

的电弧因为其放电距离较长, 所以电压幅值普遍更大。一般情况下, 空气间隙中的放电多在接地体和导电体的最短路径之间发生, 但是由于故障时散发的烟尘和热量形成的通道绝缘强度很低, 所以放电常不沿杆塔-导线间隙或者绝缘子串发生, 而是沿着距离相对较长的烟火通道发生, 因此电弧很长。

相比较而言, 设备故障等内部故障是由于绝缘体长期受热, 导线之间产生泄露电流或火花放电, 它们产生的热量使绝缘裂解, 在导线之间形成导电的碳化通道进而引起电弧, 所以可以看作是串联电弧故障。因为不存在与外界的联系, 因此电弧较短。

故障电弧的弧场强沿弧几乎恒定, 平均值为 1.3 kV/m [18]。因此, 故障电弧电压与电弧长度成正比, 可以利用电弧电压对外部故障和内部故障进行区分。

综上, 在时域上可以利用故障相数、故障持续时间、故障电流分量与断路器故障电流衰减程度对故障类型进行区分。利用故障时间可以区分动物引起的单相故障与其他故障类型, 阈值 n_{CycleSet} 初始设为 6 个周波; 故障电流分量可以区分树木碰线引起的相间短路与其他相间故障类型, 阈值 I_{faultSet} 初始设为 3 465 A; 当发生断路器故障时, 可以用故障电流的衰减程度进行区分, 阈值 α_{ATTSet} 初始设为 0.5。在频域上, 不同原因引起的线路故障其各频段的幅值与能量分布存在差异, 可以利用其对不同故障类型进行区分。另外, 电弧电压可以用来区分内部故障和外部故障, 当线路发生内部故障时, 电弧长度一般小于 40 cm [18], 因此将阈值 V_{arcSet} 初始设置为 $1\ 300 \times 0.4 = 520 \text{ V}$ 。

3 基于时频特性的配电线路故障类型识别方法

3.1 特征量的提取与计算

基于第 2 节的分析, 故障相数、持续时间、故障电流分量、断路器故障电流衰减程度以及故障电压的频域能量分布、电弧电压均可以作为特征参量实现配网故障类型的区分与识别。因此, 首先对输入波形数据的处理方法进行阐述, 提出各特征量的计算公式。

假定输入波形数据为故障现场监测采样数据, 包括采样时间、三相电流以及三相相电压。 N 代表总采样点数, 则:

$$N_0 = \frac{N}{60 \times [t(N) - t(1)]} \quad (4)$$

$$n_{\text{cycle}} = \frac{N}{N_0} \quad (5)$$

式中: N_0 代表一个周期的采样点数, n_{cycle} 代表采样周期数。

1) 故障相数

根据故障相电流的突变判断故障相数,首先提取三相电流采样序列的最大值,即:

$$\begin{cases} I_{\text{amax}} = \max |I_{a(n)}|, n \in [1, N] \\ I_{\text{bmax}} = \max |I_{b(n)}|, n \in [1, N] \\ I_{\text{cmax}} = \max |I_{c(n)}|, n \in [1, N] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $I_{a(n)}$ 、 $I_{b(n)}$ 、 $I_{c(n)}$ 分别为三相电流的采样序列。计算其比值关系如下:

$$R1_{I_j} = \frac{\max(I_{\text{amax}}, I_{\text{bmax}}, I_{\text{cmax}})}{\text{median}(I_{\text{amax}}, I_{\text{bmax}}, I_{\text{cmax}})} \quad (7)$$

$$R2_{I_j} = \frac{\text{median}(I_{\text{amax}}, I_{\text{bmax}}, I_{\text{cmax}})}{\min(I_{\text{amax}}, I_{\text{bmax}}, I_{\text{cmax}})} \quad (8)$$

式中: $R1_{I_j}$ 、 $R2_{I_j}$ 表示三相电流每一相的采样点最大值按照从大到小的顺序排序后,每两相之间的的比值。则本文提出的故障相数 $n_{\text{faultPhase}}$ 的判断公式如下:

$$n_{\text{faultPhase}} = \begin{cases} 3, (R1_{I_j} \leq k_1) \& (R2_{I_j} \leq k_2) \\ 2, (R1_{I_j} \leq k_3) \& (R2_{I_j} \geq k_4) \\ 1, (R1_{I_j} \geq k_5) \& (R2_{I_j} \leq k_6) \end{cases} \quad (9)$$

2) 故障持续时间

为了便于研究,首先选取某相电流规定为故障相电流 I_{fault} ,判断公式如下:

$$I_{pk\text{Max}} = \max(I_{\text{amax}}, I_{\text{bmax}}, I_{\text{cmax}}) \quad (10)$$

则:

$$I_{\text{fault}} = \begin{cases} I_a, I_{pk\text{Max}} = I_{\text{amax}} \\ I_b, I_{pk\text{Max}} = I_{\text{bmax}} \\ I_c, I_{pk\text{Max}} = I_{\text{cmax}} \end{cases} \quad (11)$$

$$I_{pk(j)} = \max |I_{\text{fault}(n)}| \quad (12)$$

式中: $j \in [1, n_{\text{cycle}}]$, $n \in [(j-1)N_0, jN_0]$ 。 $I_{pk(j)}$ 代表故障相电流第 j 个周期的电流峰值,当其大于某一阈值时即可认为该周期处于故障状态,以此判断故障持续了几个周期,公式如下:

$$n_{\text{faultCycle}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{cycle}}} \text{sgn} \left\{ \left[\frac{I_{pk(j)}}{I_{pk0}} \right] \right\} \quad (13)$$

3) 故障电流分量

故障电流分量 I_{faultAmp} 计算公式如下:

$$I_{\text{faultAmp}} = I_{pk\text{Max}} - I_{0pk} \quad (14)$$

式中: I_{0pk} 为故障前三相电流正常运行状态下的峰值,由下式得到:

$$I_{0pk} = \min(I_{a(n)}, I_{b(n)}, I_{c(n)}) \quad n \in [1, N_0] \quad (15)$$

4) 断路故障电流衰减程度

对于断路故障,故障相电流发生衰减,则三相电流第 j 个周期的电流峰值如下:

$$\begin{cases} I_{apk(j)} = \max |I_{a(n)}| \\ I_{bpk(j)} = \max |I_{b(n)}| \\ I_{cpk(j)} = \max |I_{c(n)}| \end{cases} \quad (16)$$

式中: $j \in [1, n_{\text{cycle}}]$, $n \in [(j-1)N_0, jN_0]$

取三相电流峰值最小值为

$$I_{pk\text{Min}} = \min(I_{apk}, I_{bpk}, I_{cpk}) \quad (17)$$

则定义故障电流衰减程度 α_{ATT} ,其计算公式如下:

$$\alpha_{\text{ATT}} = \frac{I_{pk\text{Min}}}{I_{0pk}} \quad (18)$$

5) 频域能量百分比

频域分析故障相电压能量分布,首先对其进行归一化处理:

$$V_{\text{fault}} = \begin{cases} V_a, I_{pk\text{Max}} = I_{\text{amax}} \\ V_b, I_{pk\text{Max}} = I_{\text{bmax}} \\ V_c, I_{pk\text{Max}} = I_{\text{cmax}} \end{cases} \quad (19)$$

$$V_{\text{norm}} = \frac{V_{\text{fault}}}{V_{\text{faultmax}}} \quad (20)$$

利用小波变换计算基频以及高频段能量百分比:

$$(E_{BF}, E_{HF}) = \text{wenergy}(\text{wavedec}(V_{\text{norm}})) \quad (21)$$

6) 电弧电压

根据式(3)得到电弧电压计算公式如下:

$$V_{\text{fault}(n)} = R_{(j)} \times I_{\text{fault}(n)} + L_{(j)} \frac{dI_{\text{fault}(n)}}{dt_{(n)}} + V_{\text{arc}(j)} \times \text{sign}(I_{\text{fault}(n)}) \quad (22)$$

式中: $j \in [1, n_{\text{cycle}} \times 2 - 1]$, $n \in \left[\frac{N_0 j}{2} - \frac{N_0}{2} + 1, \frac{N_0 j}{2} \right]$ 。

利用最小二乘法求解,并计算方差:

$$\sigma^2(j) = \frac{\sum_{i=j}^{j+2} (V_{\text{arc}(i)} - \frac{1}{3}(V_{\text{arc}(j)} + V_{\text{arc}(j+1)} + V_{\text{arc}(j+2)}))^2}{3} \quad (23)$$

式中: $j \in [1, n_{\text{cycle}} \times 2 - 3]$ 。 $\sigma^2(j)$ 取最小值时,认为电弧电压幅值稳定,取区间内 3 个计算值的平均值作为该模型的电弧电压 V_{arc} 。

3.2 识别逻辑

基于第 2 节的分析与 3.1 节提出的计算公式,本节将多参量融合作为依据建立分类器,通过对输入波形数据特征量的检测归类,实现对不同原因引起的配网线路故障类型的自动识别,识别逻辑如下。

1) 输入故障波形数据,判断故障相数 $n_{\text{faultPhase}}$ 。

2) 相间故障的再区分。利用故障电流分量区分树木碰线和车辆撞杆引起的相间故障。当 $I_{\text{faultAmp}} > I_{\text{faultSet}}$ 时,判断发生树木碰线故障。

3) 三相故障的再区分。利用故障电流衰减程度区分雷击以及树木压断导线引起的三相断路故障。当 $\alpha_{\text{ATT}} > \alpha_{\text{ATTset}}$ 时,判断发生树木断线故障。

4) 单相故障的再区分。首先利用故障持续时间将动物引起的故障与其他几种类型区分,当 $n_{\text{faultCycle}} > n_{\text{CycleSet}}$ 时,判断其为动物引起的故障;其次利用电弧电压幅值将内部故障与外部故障区分,当 $V_{\text{arc}} < V_{\text{arcSet}}$ 时,判断

发生内部故障;最后利用频域能量分布区分树木碰线和车辆引起的单相接地故障。

4 案例分析与识别结果

4.1 数据来源

为了验证第 3 节中提出的逻辑算法,利用美国电力研究协会 (EPRI) 提供的 136 个配电路故障案例对其进行验证,其中包括 7 组由于动物攀爬导致的故障,70 组设备老化导致的故障,16 组雷击导致的故障,25 组树木压迫导致的故障以及 18 组机动车导致的故障。监测记录的数据包括三相相电压、三相电流以及中性线电流。电压等级为 10 ~ 20 kV,属于高压线路。采样频率为 60 Hz,每个周期采样数不确定,一般为 16、128 和 256。

4.2 故障数据特点介绍

为了保证验证数据的合理全面,首先对 136 组数据的时频域特征量进行统计,包括不同故障类型的故障相数、持续时间、故障电流分量、电弧电压幅值以及基频能量百分比分布,结果如图 11 所示。可以看出,分布结果与第 2 节中的分析相符,进而保证了验证数据的全面可靠。

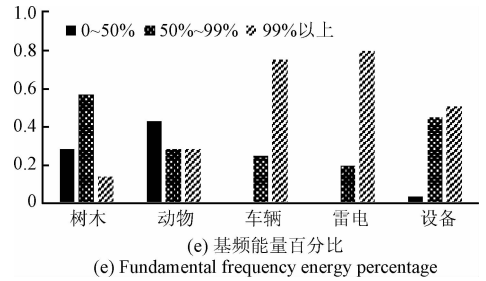
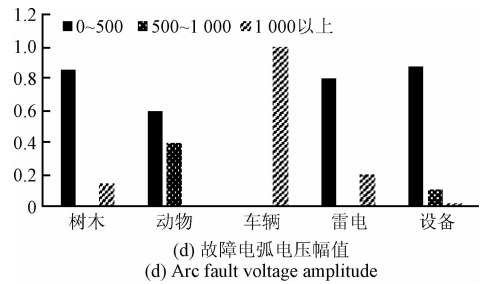
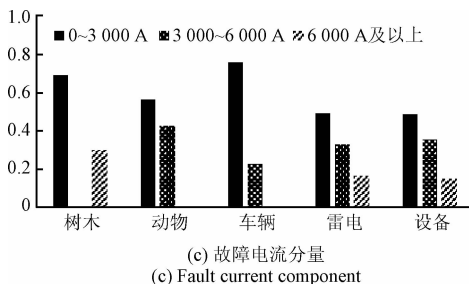
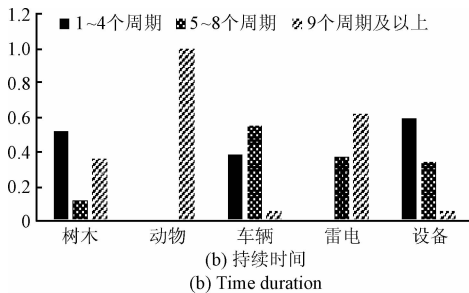
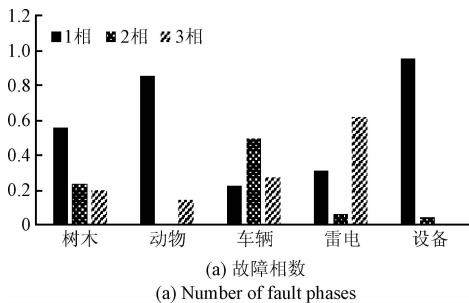


图 10 检验数据的时频域特征量分布
Fig. 10 Time-frequency characteristic distribution of the test data

4.3 识别过程及结果

考虑到美国配电网标准与国内差异性,同时为了使识别结果更加准确,首先将 30 组数据作为训练样本,投入系统使其进入自学习阶段,进而实现对阈值的调整与整个检验系统的闭环控制。其中,包括动物引起的故障 2 组,设备老化引起的故障 15 组,雷击引起的故障 4 组,树木引起的故障 5 组,车辆引起的故障 4 组。通过对训练样本的学习,第 2 节中设置的初始阈值进行了一定调整,调整前与调整后的值如表 1 所示。

表 1 闭环控制前后阈值的调整

Table 1 The threshold value adjustment before and after closed loop control

阈值	初始值	调整值
持续时间	6 个周期	9 个周期
故障电流分量/A	3 465	6 000
电弧电压/V	520	500

之后,将剩余的 106 组数据作为测试样本批次投入系统进行检验,输出其故障类型。最终,检验成功 95 组,平均成功率达到 90%。其中,由于动物攀爬导致的故障共 5 组,校验成功 4 组,成功率 80%;由于设备老化导致的故障共 55 组,校验成功 50 组,成功率 90%;由于雷击导致的故障共 12 组,校验成功 10 组,成功率 81%;由于树木压迫导线导致的故障共 20 组,成功 18 组,成功率 88%;由于车辆导致的故障共 14 组,校验成功 13 组,成功率 95%,如表 2 所示。

表2 不同故障类型的识别结果

Table 2 Identification results for different fault types

故障类型	测试样	校验	校验	成功率
	本数	成功	失败	/%
动物引起的故障	5	4	1	80
设备老化引起的故障	55	50	5	90
雷击引起的故障	12	10	2	81
树木引起的故障	20	18	2	88
车辆引起的故障	14	13	1	95
总计	106	95	11	90

通过对11组校验失败案例的分析,可以发现虽然闭环调整后的阈值已经使准确率达到了较高水平,但仍有一小部分事件数据与预期存在偏差,引起误识别。如果样本数据增加,系统自学习将更加完善,准确率将大大提高。

5 结 论

准确辨识配电线路故障类型可以帮助运维单位快速准确判断故障类型,解除故障,同时根据历史数据,制定针对性的防范措施。通过建立模型和理论分析总结了5种故障类型的故障波形在时、频域以及电弧电压上的特点,提出了可以表征不同故障类型的特征参量。利用多参量融合建立识别逻辑,通过对输入波形数据特征量的检测归类,实现了对不同原因引起的配网线路故障类型的自动识别。利用美国电力研究协会(EPRI)提供的136组故障现场波形数据进行检验,识别成功率达到90%。

参考文献

- [1] 王林海. 10 kV 配电线路单相接地故障分析及处理方法[J]. 甘肃科技, 2010, 26(17): 74-76.
WANG L H. Analysis and solution of single-phase ground fault in 10 kV distribution networks [J]. Gansu Science and Technology, 2010, 26(17): 74-76.
- [2] 谢潇磊, 刘亚东, 孙鹏, 等. 新型配电网线路 PMU 装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 15-20.
XIE X L, LIU Y D, SUN P, et al. Development of novel PMU device for distribution network lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 15-20.
- [3] 谢潇磊, 刘亚东, 孙鹏, 等. 基于电容分压法的配网线路智能电压传感器[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 1000-1009.
XIE X L, LIU Y D, SUN P, et al. Smart voltage sensor of distribution lines based on the capacitive voltage divider [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

2016, 37(5): 1000-1009.

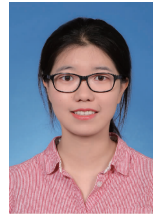
- [4] 刘亚东, 盛戈皞, 王葵, 等. 输电线路分布式综合故障定位方法及其仿真分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 923-929.
LIU Y D, SHENG G H, WANG K, et al. Method and Simulation analysis of comprehensively distributed fault location of transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 923-929.
- [5] 彭向阳, 钱冠军, 李鑫, 等. 架空输电线路跳闸故障智能诊断[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1965-1972.
PENG X Y, QIAN G J, LI X, et al. Intelligent trip-out fault diagnosis of overhead transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1965-1972.
- [6] 黄戩. 输电线路故障类型辨识研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
HUANG J. Research on fault type identification of transmission line [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [7] 代杰杰, 刘亚东, 姜文娟, 等. 基于雷电行波时域特征的输电线路雷击类型辨识方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 242-250.
DAI J J, LIU Y D, JIANG W J et al. Identification of back striking and shielding failure on transmission line based on time domain characteristics of traveling wave [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 242-250.
- [8] NUNEZ V B, KULKARNI S, SANTOSO S, et al. Feature analysis and classification methodology for overhead distribution fault events [C]. Power and Energy Society General Meeting, 2010, 89(1): 1-8.
- [9] CHOW M Y, TAYLOR L S. Analysis and prevention of animal-caused faults in power distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 995-1001.
- [10] 张鑫, 邓鹏, 徐鹏, 等. 10 kV 架空绝缘导线雷击断线原因机理分析及防护措施[J]. 电瓷避雷器, 2012(1): 65-69.
ZHANG X, DENG P, XU P, et al. Mechanism Analysis and Protective Measures on the Lightning Break Reason of 10 kV Overhead Insulation Conductor [J]. Insulators & Surge Arresters, 2012(1): 65-69.
- [11] 乔立凤, 高敬更, 温定筠, 等. 电容式电压互感器二次电压异常分析处理[J]. 电子测量技术, 2013, 36(2): 116-118.
QIAO L F, GAO J G, WEN D J, et al. Analysis and treatment on abnormal secondary voltage of capacitor voltage transformer [J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(2): 116-118.

- [12] 杨庆,欧阳沙,司马文霞,等. 真空断路器快速合-分闸操作 10 kV 并联电容器的过电压机理[J]. 高压技术,2014,40(10):3135-3140.
YANG Q, OUYANG SH, SIMA W X, et al. Mechanism of overvoltage induced by fast switching on-off 10 kV shunt capacitors using vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10):3135-3140.
- [13] 陶维青,杨刚,丁明,等. 改进模因算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(2):265-273.
TAO W Q, YANG G, DING M, et al. Application of improved memetic algorithm for fault location in distribution network with DG [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30 (2): 265-273.
- [14] 谢潇磊,刘亚东,刘宗杰,等. 高频差分绕线 PCB 罗氏线圈设计 [J]. 仪器仪表学报,2015,36(4):886-894.
XIE X L, LIU Y D, LIU Z J, et al. Design of high frequency differential winding PCB Rogowski coil [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(4):886-894.
- [15] RADOJEVIC Z M , TERZIJA V V. Fault distance calculation and arcing faults detection on overhead lines using single end data [C]. IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection, 2008:638-643.
- [16] SHORT T A , SABIN D D , MCGRANAGHAN M F . Using PQ monitoring and substation relays for fault location on distribution systems[C]. IEEE Rural Electric Power Conference, 2007:B3-7.
- [17] KULKARNI S, LEE D, ALLEN A J , et al. Waveform

characterization of animal contact, tree contact, and lightning induced faults [C]. IEEE PES General Meeting, 2010,13(49):1-7.

- [18] RADOJEVIC Z M , TERZIJA V V , DJURIC N B. Numerical algorithm for overhead lines arcing faults detection and distance and directional protection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15 (1): 31-37.

作者简介



秦雪,2016年于上海交通大学获得学士学位,现为上海交通大学硕士研究生,主要研究方向为输电线路在线监测。

E-mail:quency123@sjtu.edu.cn

Qin Xue received her B. Sc. degree in 2016 from Shanghai Jiao Tong University. (SJTU), Shanghai, China. Now, she is a master degree candidate in Shanghai Jiao Tong University. Her main research interest is online monitoring of transmission line.



刘亚东(通讯作者),2004年于中国地质大学获得学士学位,分别在2008年和2012年于上海交通大学获得硕士和博士学位,现为上海交通大学讲师,主要研究方向为输电线路故障检测和定位。

E-mail: liuyadong0916@163.com

Liu Yadong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from China University of Geosciences, Wuhan, China, in 2004. He received his M.Sc. and Ph. D. in electrical engineering both from Shanghai Jiao Tong University (SJTU), Shanghai, China, in 2008 and 2012, respectively. Currently, he is a lecturer in electrical engineering at SJTU. His main research interest includes fault detecting and location of transmission line.