

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210897

考虑弧长动态变化的配电网电弧接地故障建模及辨识

蔺华¹, 王子龙², 郭振华³, 张鹏², 王全金², 梁睿²

(1. 国网江苏省电力有限公司连云港分公司, 江苏 连云港 222000; 2. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221000; 3. 国网山东省电力公司德州供电公司, 山东 德州 253000)

摘要: 目前针对配电网电弧故障的研究大多忽略电弧弧长变化因素的影响, 电弧故障模型与实际配电网电弧故障相差较大, 电弧接地故障辨识不准确。为此, 搭建了考虑弧长动态变化的电弧接地故障模型。在此基础上, 分析了电弧接地故障稳态零序电流的时域波形差异, 提出了一种基于稳态零序电流加权欧式距离的电弧接地故障辨识方法, 实现对电弧故障的有效辨识。利用 PSCAD 搭建 10 kV 配电网模型, 大量电弧接地故障仿真实验结果表明, 所提电弧故障模型准确有效, 可以准确描述电弧电流、电压和故障特性。所提辨识方法能够准确辨识故障类型, 且所提方法不受故障初相角、故障位置的影响, 为配电网故障精准可靠感知提供依据。

关键词: 配电网; 电弧故障; 电弧模型; 加权欧氏距离; 故障辨识

Modeling and identification of a distribution network arc grounding fault considering arc length dynamic variation

LIN Hua¹, WANG Zilong², GUO Zhenhua³, ZHANG Peng², WANG Quanjin², LIANG Rui²

(1. Lianyungang Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222000, China;
2. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, China;
3. Dezhou Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Dezhou 253000, China)

Abstract: At present, the influence of arc length variation on an arc fault in a distribution network is mostly ignored. The arc fault model is quite different from the actual arc fault in a distribution network, and the identification of an arc grounding fault is inaccurate. Therefore, in this paper, an arc grounding fault model considering arc length dynamic variation is established. The time-domain waveform difference of the steady-state zero-sequence current of an arc grounding fault is analyzed, and an identification method for the fault based on weighted Euclidean distance of the steady-state zero-sequence current is proposed to realize effective identification. A 10 kV distribution network model is built using PSCAD. A large number of arc grounding fault simulation results show that the model presented is accurate and effective, and can accurately describe the arc current, voltage and fault characteristics. The identification method can accurately identify all of fault types, and is not affected by the fault initial phase angle and fault location. This provides a reliable basis for accurate and reliable perception of distribution network faults.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. J2021032).

Key words: power distribution network; arc faults; arc model; weighted Euclidean distance; fault identification

0 引言

据统计, 我国 80% 以上的停电事故是由配电网故障造成的^[1-6], 配电网故障主要表现为单相接地故

障, 单相接地故障中又以电弧接地故障最为常见。随着城市配电网规模日益复杂, 电缆线路得到广泛的应用, 由于电缆线路较架空线分布电容大得多, 使得系统对地电容电流逐渐增加^[7-8]。另外, 电缆在结构上存在绝缘层、屏蔽层及铠装层的保护, 除外力破坏造成电缆硬性受损外, 电缆线路故障通常表现为电弧故障, 此时受电容电流的影响, 电弧往往难以可靠熄灭。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(J2021032); 国家自然科学基金面上项目(52077215); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20201348)

不同类型故障发生后的处理方式并不相同,单相经过渡电阻接地故障发生后仍可带电运行 1~2 h,不需要立即切断故障线路,稳定性电弧或间歇性电弧故障发生后,因电弧的产生伴随着大量的光和热,若不及时处理,在安全要求很高、环境较为复杂的电网,如矿山电网中,极易造成火灾和甚至爆炸事故,严重威胁生命和生产安全。因此对单相接地故障进行准确辨识,对故障发生后的检修方案设计、提高电网的安全运行水平均有重要意义。

针对电弧故障的辨识与检测,国内外专家进行了一定的研究^[9-12]。文献[13]从时域角度,总结了电弧电流峰值及连续多周期电流特性,将半周期电流绝对值的平均值与连续多周期电流平均值相比,以电弧电流的不规则特性检测电弧。文献[14]提出根据母线和故障点处三次、五次、七次谐波含量比值来判断电弧故障的方法。文献[15]通过现场试验采集的大量数据,对故障相电流进行广义 S 变换,提取不同故障类型的时频域信息,以特征频率 350 Hz 下故障电流的能量、方差等特征进行故障辨识。

现有的电弧故障模型大多忽略弧长变化的影响,电弧仿真模型模拟存在一定误差,对于稳定电弧故障、间歇性电弧故障辨识的研究相对较少,对于电弧故障的辨识仍需进一步探索。因此搭建适用于配电网的电弧接地故障模型、研究电弧故障特性,实现电弧故障有效辨识,是配电网快速定位故障的前提和保证。

1 电弧基本理论及故障特性

1.1 电弧基本理论

交流电弧的一般特性主要表现为:电弧电流的波形趋近于正弦波但存在明显的“零休”时间;电弧电压的波形存在明显的畸变,形状呈现为“马鞍形”;电弧电流在零值附近缓慢变化,而此时电弧电压值很大,故电弧电阻在电流“零休”期间呈现高阻态^[16]。可将电弧电阻等效为非线性电阻元件,建立电弧模型的重点在于描述电弧电阻的非线性特性。

对于工频交流电,电流的变化速度远远大于弧柱温度、直径及弧隙电压的变化速度,因此交流电弧只能建立动态平衡的伏安特性,如图 1 所示^[17]。

1.2 电弧模型

我国中压配电网多采用中性点不接地或谐振接地方式,发生电弧故障时,主要表现为电弧电流幅值较小,电压畸变明显,因此利用传统控制论建模仿真的电弧电压电流与实际相差较大^[16,18]。A.T. Johns 等人通过电弧试验改进了控制论模型,大量实验结果表明^[19]:电弧电流幅值在 1~55 A 的范围内,

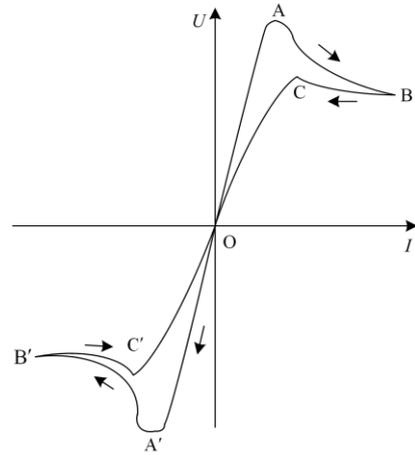


图 1 理想情况下交流电弧伏安特性曲线图
Fig. 1 AC arc volt-ampere characteristic curve under ideal condition

弧隙每厘米压降随电流幅值的增加而降低,具体函数关系如式(1)所示;时间常数 τ_s 随电弧电压的上升速率增大而减小,而电压的上升速率又与电流幅值 I_s 成反比,故改进后的时间常数如式(2)所示。

$$V'_s = V_{s0} \times I_s^{-n} \quad (1)$$

式中: V'_s 为改进的单位弧长压降; V_{s0} 为常量系数,一般取值为 75 V/cm; I_s 为电弧电流幅值; n 为变量,一般取 0.4。

$$\tau'_s = \frac{\beta \times I_s^{n+1}}{L} \quad (2)$$

式中: τ'_s 为改进的电弧时间常数; β 为调整后的经验系数,一般取值为 7.53×10^{-6} ; n 一般取 0.4; L 为电弧弧长。则改进后的控制论电弧模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau'_s} (G'_s - g), \tau'_s = \frac{\beta \times I_s^{n+1}}{L} \\ G'_s = \frac{|i_s|}{V_{s0} \times I_s^{-n} \times L}, r_{arc} = 1/g \end{cases} \quad (3)$$

式中: g 为单位长度电弧电导; r_{arc} 为电弧电阻; G'_s 为稳态电导; i_s 为电弧电流。分析改进后的控制论电弧模型可得出:电弧弧长 L 与改进后的时间常数 τ'_s 、稳态电导 G'_s 均成反比关系,随着电弧长度 L 的增加,改进后的时间常数 τ'_s 减小,即电弧电流过零后电弧电阻的上升速率加快;稳态电导 G'_s 降低,电弧电阻幅值增大,弧隙间发散的能量增加,电弧更容易熄灭。

然而改进后的控制论模型建模时将弧长设定为固定常数,并不符合实际情况,实际配电网中电弧

故障发生后, 电弧弧柱在磁场力、热浮力、空气阻力等作用下不断运动变化, 弧长随机非线性变化, 固定弧长不能充分描述电弧的燃烧变化过程, 因此将变化的弧长引入改进控制论建模能更真实地反映电弧的燃烧变化过程及故障特性。

2 计及弧长实时变化的电弧建模

2.1 电弧弧长计算

电弧是一种高温电离气体, 在外力(磁场力、热浮力、空气阻力)作用下, 电弧形状会发生不规则变化, 难以确定其长度。本文将链式电弧模型^[20]的思想引入配电网电弧接地故障时电弧弧长的计算中, 链式电弧模型的核心是将电弧离散化为多个电流元, 将每个电流元近似看作轴对称的圆柱体, 如图 2 所示。通过对每个电流元进行受力和运动速度方程的计算, 可得到故障后不同时刻电流元的速度及运动的位置, 通过对不同时刻所有电流元的整合, 就可以得到相应时刻电弧的变化趋势和弧长。

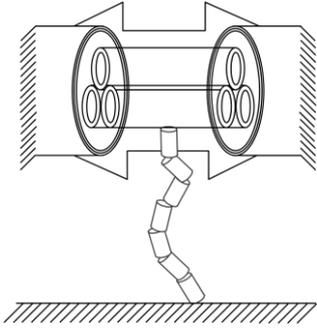


图 2 链式电弧模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of chain arc model

如图 3 所示, 每个小的电流元的位置可由其重心确定, 第 i 个电流元 G_i 的长度和方向由其相邻的两个电流元 G_{i-1} 和 G_{i+1} 决定。根据链式电弧模型的特性, 进行电弧长度计算时, 将相邻两个电流元 G_{i-1} 、 G_{i+1} 重心之间的距离视为电流元 G_i 的长度 l_i ^[21]。电弧弧长 L 为所有电流元的长度之和, 如式(4)所示。

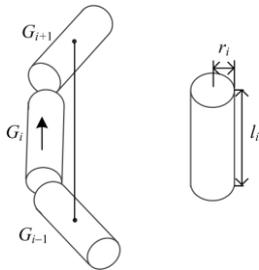


图 3 电流元

Fig. 3 Current cell

$$L = \sum_i l_i \quad (4)$$

对电弧电流元进行受力分析。第一, 磁场中运动的电弧电流元, 一定会受到磁场力的作用。第二, 电弧燃炽的过程中, 高温气体会在热浮力的作用下呈现向上运动的趋势。第三, 电流元还会受到空气阻力的影响。因电缆敷设一般采用直埋或电缆沟敷设, 故本节不考虑风载荷对电弧运动的影响。因此, 电弧电流元在磁场力 F_{mi} 、热浮力 F_{ti} 和空气阻力 F_{ai} 的共同作用下沿合力方向运动。由于电弧的质量密度远小于空气, 故忽略电流元的质量和加速度过程, 有

$$F_{mi} + F_{ai} + F_{ti} = m_i a = 0 \quad (5)$$

式中: m_i 为电流元的质量; a 为其加速度。通过对电流元进行受力分析^[22-23], 可以得到电流元速度控制方程, 如式(6)所示。

$$v_i = \sqrt{\frac{F_{mi} + F_{ti}}{C_r r_i l_i \rho}} \quad (6)$$

式中: v_i 为电流元的速度; C_r 为空气阻力系数; ρ 为空气密度; r_i 为电流元的半径。电弧故障发生后的 t 时刻, 对于任一离散电流元, 可根据式(6)计算其运动速度, 结合电流元 t 时刻的位置 $S_i(t)$ 和运动速度 $v_i(t)$, 便可求解出 $t+\Delta t$ 时刻该电流元的位置 $S_i(t+\Delta t)$ 为

$$S_i(t+\Delta t) = S_i(t) + v_i(t)\Delta t \quad (7)$$

根据式(7), 可以得到离散后的所有电流元在 $t+\Delta t$ 时刻的位置。记录不同时刻离散电流元的位置, 就可以模拟出故障后电弧运动变化的过程, 拟合某一时刻所有的离散电流元便可得到此刻电弧的弧长。

随着故障的持续发展, 电弧会呈现拉长趋势, 但弧长的增长会加速弧柱中的带电质点扩散, 使得去游离作用加大, 故电弧达到临界长度就会熄灭^[24], 此时结束电弧运动仿真。电弧熄灭的临界长度 l_{max} 如式(8)表示。

$$l_{max} = 0.7I_a^{0.25}U_a \times 10^{-4} \quad (8)$$

式中, I_a 、 U_a 分别为电弧的电流峰值和电压峰值。

按上述内容在 Matlab 中进行仿真模拟, 每隔 10 ms 记录一次弧长数值, 绘制拟合后的弧长变化图如图 4 所示。

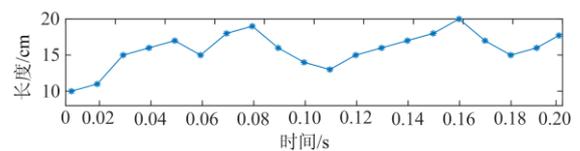


图 4 电弧弧长变化图

Fig. 4 Change graph of arc length

2.2 电弧故障模型搭建

电弧模型的模拟首先要在 PSCAD 环境中搭建如图 5 所示的典型配电网模型，将故障发生后的电弧电流、时间、仿真步长等参数传递到 Matlab，结合 Matlab 求解的电弧实时弧长，调用编写的 M 文件，实现电弧电阻的求解，最后根据 Matlab 返回的电弧电阻在 PSCAD 中实现电弧模型仿真。

为证明所建立电弧故障模型的正确性，本文针对稳定性电弧故障和间接性电弧故障在不同接地方式下进行了仿真，现以谐振接地系统发生间歇性电弧故障为例进行分析。

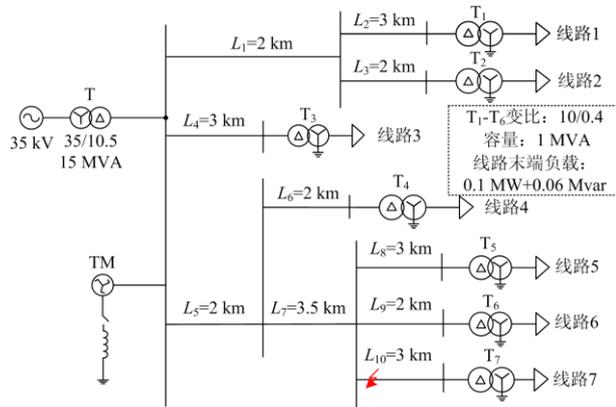


图 5 典型配电网仿真模型图

Fig. 5 Simulation model diagram of a typical distribution network

故障发生在线路 7 的 L_{10} 区段，故障点设置在距离 L_{10} 首端测量点 1 km，故障相为 C 相，故障初相角 90° ，初始弧长为 10 cm，故障发生时刻为 0.1 s，故障总时长 0.21 s。在故障相(C 相)工频电压最大值(0.11 s)处产生第一次电弧，在工频电流过零(0.12 s)时电弧第一次熄灭；到达下一个电压峰值(0.13 s)时重燃，0.14 s 时电弧二次熄灭；0.15 s 时电弧三次重燃；0.16 s 时电弧三次熄灭；0.17 s 时电弧四次重燃，之后电弧稳定燃烧。本次仿真共设置四次重燃，三次熄弧。电弧故障发生后电弧电流、电压、电阻波形如图 6 所示，故障线路首端三相电压波形图如图 7 所示。其中红色实线部分为本文所提电弧模型仿真结果，蓝色虚线部分为改进控制论模型的仿真结果。

分析图 6 和图 7 可得：本文所提电弧模型能准确描述谐振接地系统中间歇性电弧发生时的电弧电流、电压和电阻的变化特性，如前文 1.1 节所述；在谐振接地系统中，间歇性电弧故障发生后非故障相最大暂态过电压达到 2.78 倍相电压，故障相最大暂态过电压为 1.46 倍相电压，仿真结果符合贝尔格

实验的结论。

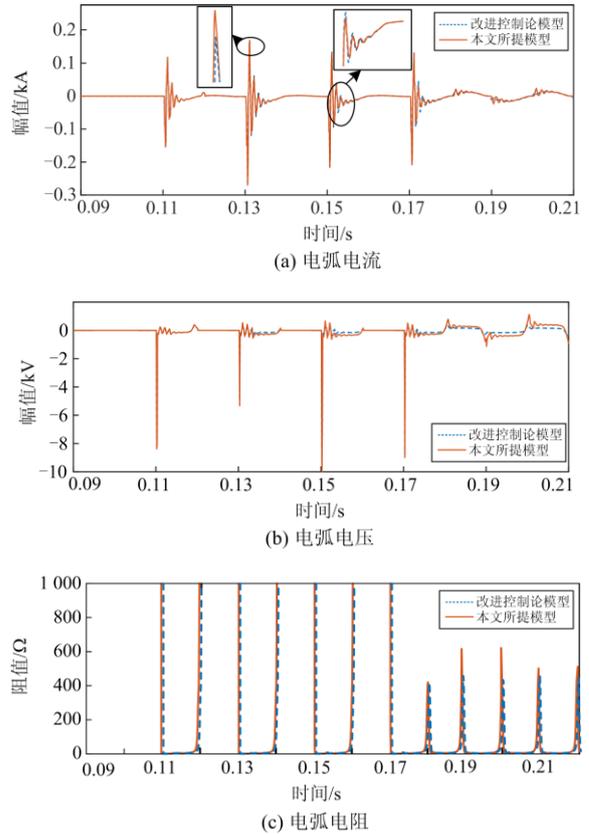


图 6 谐振接地系统间歇性电弧故障仿真波形图

Fig. 6 Simulation waveform diagram of intermittent arc fault in resonant grounding system

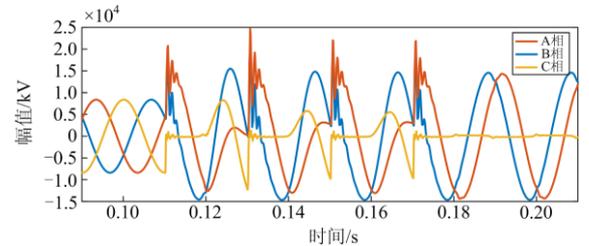


图 7 谐振接地系统间歇性电弧故障三相电压波形图

Fig. 7 Three-phase voltage waveform diagram of intermittent arc fault in resonant grounding system

相比于经典 Cassie 模型、Mayr 模型及改进控制论电弧模型故障后各周期电弧电压、电流、电阻均一致，无明显变化，本文所提电弧模型在准确描述电弧电流、电压和电阻故障特性的同时，还考虑了故障发生后弧长变化的影响，故障后各个周期电弧电流的突变程度、“零休”时间、电弧电压的畸变程度、燃弧电压、熄弧电压以及电弧电阻的最大值均有明显变化，能更好地反映实际环境中电弧燃烧

变化的过程。

3 电弧接地故障辨识方法

3.1 电弧故障零序电流分析

以中性点不接地系统、故障初相角 90° 、故障距离首端测量点 1 km 的故障条件为例, 分析金属性接地故障、经 $30\ \Omega$ 电阻接地故障、稳定性电弧接地故障和间歇性电弧接地故障的零序电流波形, 如图 8 所示。

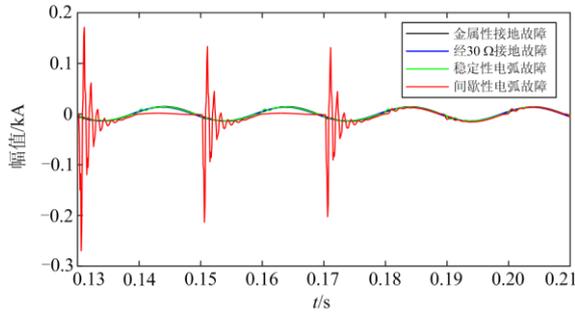


图 8 不接地系统故障波形对比图

Fig. 8 Comparison chart of fault waveforms of ungrounded systems

此外, 图 9 和图 10 分别展示了故障后第 2 周期和第 5 周期不同故障零序电流的时域波形, 综合图 8、图 9 和图 10 可明显看出, 不同类型故障下的稳态零序电流时域波形差异。改变故障条件时, 零序稳态电流时域波形差异类似, 本文不再赘述。故可以利用稳态零序电流时域波形的差异构建相应判据, 实现故障类型的辨识。

3.2 基于加权欧式距离的故障辨识算法

传统欧氏距离, 又称之为欧几里得度量, 用于描述 M 维空间中两点或多点间的真实距离, 常用于描述两个样本之间的不相似程度^[25]。为了更为准确地计算两个空间序列的相似性, 还应充分考虑单个对应元素对整体累积差异的贡献, 单个对应元素差异越小, 其相似性贡献越大, 应该被赋予越大的权值。定义两个空间序列 X 、 Y 之间加权欧氏距离 $d_{WE}(X, Y)$ 为

$$\begin{cases} d_{WE}(X, Y) = \left[\sum_{j=1}^N \frac{\omega_j}{\omega} (x_j - y_j)^2 \right]^{1/2} \\ \omega_j = e^{-|x_j - y_j|^\sigma} \end{cases} \quad (9)$$

式中: N 为空间序列中元素的个数; x_j 、 y_j 分别为空间序列 X 、 Y 中的元素; ω_j 为权值; ω 为归一化因子, 其值为所有权值的累计和; σ 为调节因子, 取值为 1。

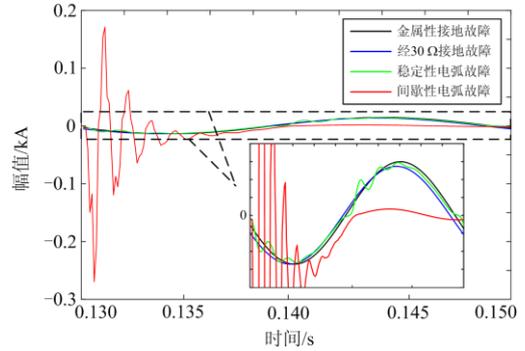


图 9 故障后第 2 周期波形图

Fig. 9 Waveform of the second cycle after failure

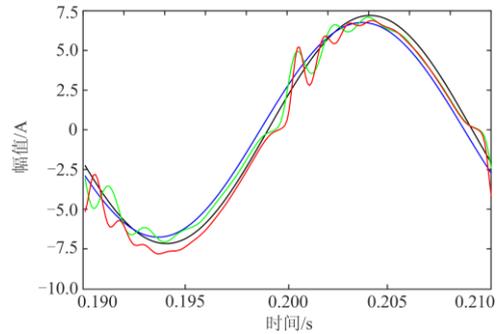


图 10 故障后第 5 周期波形图

Fig. 10 Waveform of the fifth cycle after failure

本节利用稳态零序电流波形与其对应的基频正弦波的加权欧氏距离进行故障类型辨识。由于间歇性电弧故障存在熄弧、燃弧的过程, 其零序电流在某一周期存在三种不同状态: 一是处于熄弧状态, 零序电流接近 0; 二是处于重燃状态, 暂态特征明显; 三是稳定燃弧阶段。前两种状态下的波形与基频正弦波差异最大, 表现为两者之间加权欧式距离最大; 第三种状态与稳定电弧故障特征一致, 电流波形存在明显的畸变与“零休”现象, 波形与基频正弦波差异较大, 表现为加权欧式距离较大。经过渡电阻接地故障的零序电流波形与基频正弦波最为相似, 表现为加权欧式距离最小。通过设定阈值, 即可进行故障类型的辨识。具体实现步骤如下所述。

(1) 数据窗的选择

首先, 可利用零序电流突变量确定故障时刻, 因本文所提方法主要利用稳态零序电流信息, 故剔除故障后第 1 周期的暂态信号, 从故障后第 2 周期开始, 分别提取故障后第 2、3、4、5 连续 4 个周期的零序电流信号, 取连续 4 个周期信号的目的是为了更好地区分间歇性电弧故障和稳定性电弧故障。

(2) 数据归一化处理

为了更好地对各故障类型稳态零序电流进行定

量比较, 将采集的故障零序电流进行归一化处理, 归一化处理在不改变数据的变化趋势的同时还能有效消除量纲的影响。采用 min-max 标准化, 其转换函数为

$$x^* = \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (10)$$

式中: x^* 为序列元素的归一值; x_{\min} 为序列元素的最小值; x_{\max} 为序列元素的最大值。

(3) 基频正弦波形的确定方法

采用快速傅里叶变换计算故障信号的基频正弦波。具体计算公式为

$$\begin{cases} I_a = \frac{2}{T} \sum_{j=0}^k i(j) \sin\left(\frac{2\pi}{k} j\right) \\ I_b = \frac{2}{T} \sum_{j=0}^k i(j) \cos\left(\frac{2\pi}{k} j\right) \\ I = \sqrt{I_a^2 + I_b^2} \\ \varphi = \arctan \frac{I_a}{I_b} \end{cases} \quad (11)$$

式中: T 为采样周期; k 为每周期采样点的个数; $i(j)$ 为采样周期内第 j 个采样点的采样值 ($j=0, 1, \dots, k$); I_a 为基频正弦波虚部分量; I_b 为基频正弦波实部分量; I 为基频正弦量幅值; φ 为基频正弦波初相角。最终得到基频正弦波 i_1 的表达式为

$$i_1 = I \sin(\omega_1 t + \varphi) \quad (12)$$

式中, ω_1 为基波角频率, 取值为 314。

(4) 加权欧式距离的计算

利用式(9)计算各周期故障零序电流信号与其对应的基频正弦曲线的加权欧氏距离, 分别记为 d_{WE2} 、 d_{WE3} 、 d_{WE4} 、 d_{WE5} , 取其最大值 d_{WE} 记为该故障信号的加权欧式距离。

$$d_{WE} = \max\{d_{WE2}, d_{WE3}, d_{WE4}, d_{WE5}\} \quad (13)$$

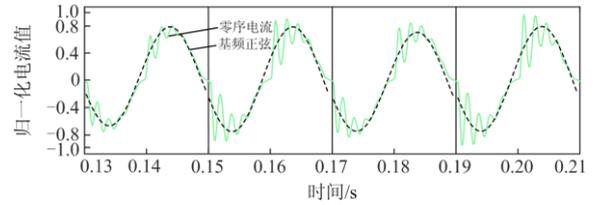
(5) 阈值 d_{set1} 和 d_{set2} 的设定

d_{set1} 和 d_{set2} 取值是依据不同故障接地方式、不同故障初相角、不同故障位置情况下多次实验总结得出。大量实验结果表明: 经过渡电阻接地故障发生时, 本文所提方法计算的加权欧式距离 d_{WE} 最大值 0.245, 最小值为 0.149; 稳定性电弧接地故障计算的加权欧式距离 d_{WE} 最大值为 1.425, 最小值为 1.200; 间歇性电弧接地故障计算的加权欧式距离 d_{WE} 最大值为 3.356, 最小值为 2.233。考虑一定裕度, 将 d_{set1} 取值为 1, d_{set2} 取值为 2。当 $d_{WE} < d_{set1}$ 时, 判定为经过渡电阻接地故障; 当 $d_{set1} < d_{WE} < d_{set2}$ 时, 判定为稳定性电弧接地故障; 当 $d_{WE} > d_{set2}$ 时, 判定为间歇性电弧接地故障。

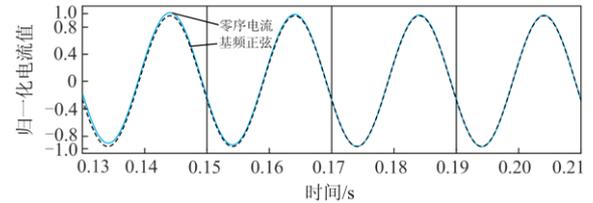
4 算例分析

为了验证本章所提电弧故障辨识算法的有效性, 根据图 5 所示模型进行仿真验证。分别以谐振接地系统和中性点不接地系统两组算例进行分析。

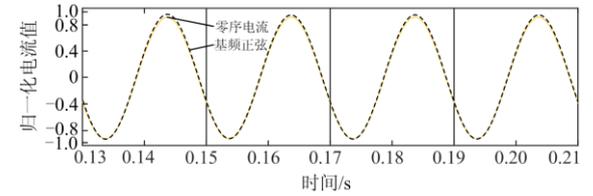
算例一: 谐振接地系统, 故障发生在线路 7 的区段 L_{10} , 故障相为 C 相, 故障初相角为 90° , 故障距离 L_{10} 首端测量点 1.0 km, 采样频率为 10 kHz, 故障总时长为 0.21 s。经过渡电阻接地故障和稳定性电弧接地故障于 0.11 s 发生故障, 间歇性电弧故障设置为在 0.11 s 发生电弧故障, 工频电流过零点 0.12 s 一次熄弧, 0.13 s 二次燃弧, 0.14 s 二次熄弧, 0.15 s 三次燃弧, 0.16 s 三次熄弧, 0.17 s 四次燃弧后进入稳定燃弧阶段。不同故障类型下稳态零序电流及其对应的基频正弦电流波形拟合图如图 11 所示。



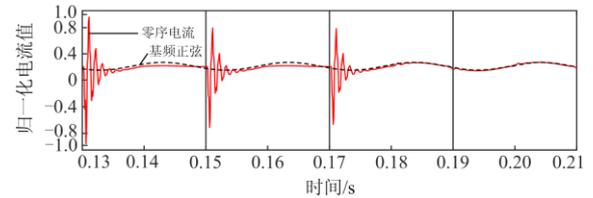
(a) 稳定性电弧故障拟合图



(b) 金属性接地故障拟合图



(c) 经 30 Ω 接地故障拟合图



(d) 间歇性电弧故障拟合图

图 11 谐振接地系统不同故障类型零序电流拟合图

Fig. 11 Fitting diagram of zero sequence current of different fault types in resonant grounding system

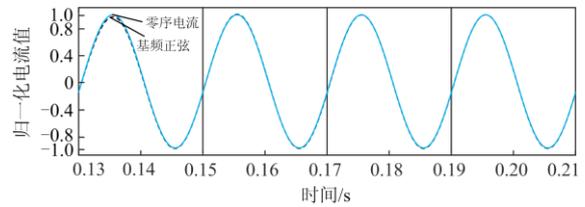
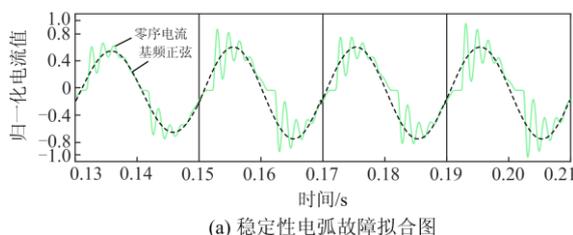
从图 11 中可以明显看出: 经过渡电阻接地故障后各个周期的稳态零序电流与其基频正弦波的波形差异非常小; 稳定性电弧故障发生后各周期零序电流与基频正弦波在零值前后和突变点有明显差异; 间歇性电弧故障在 2、3、4 周期存在熄弧、燃弧现象, 故其波形与基频正弦波差异很大, 第 5 周期稳定燃烧后与稳定性电弧故障相同。此外, 在不同故障初相角、不同故障位置下进行仿真验证, 计算相应加权欧氏距离, 具体结果如表 1 所示。

表 1 谐振接地系统不同故障条件下零序电流欧氏距离

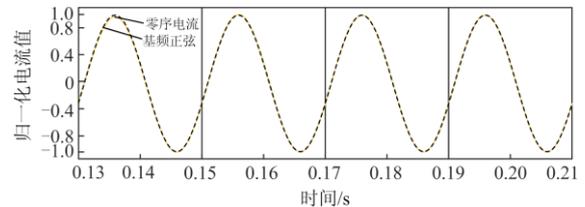
Table 1 Euclidean distance of zero sequence current under different fault conditions in resonance grounding system

故障类	初相角/(°)	距离/km	不同周期加权欧式距离				d_{WE}
			d_{WE2}	d_{WE3}	d_{WE4}	d_{WE5}	
金属性接地故障	30	0.5	0.232	0.221	0.220	0.220	0.232
		1.5	0.188	0.185	0.184	0.184	0.188
	60	0.5	0.205	0.198	0.198	0.198	0.205
		1.5	0.184	0.181	0.180	0.180	0.184
	90	0.5	0.216	0.206	0.204	0.204	0.216
		1.5	0.195	0.192	0.190	0.190	0.195
经 30 Ω 电阻接地故障	30	0.5	0.165	0.163	0.162	0.162	0.165
		1.5	0.156	0.154	0.152	0.152	0.152
	60	0.5	0.172	0.168	0.165	0.165	0.172
		1.5	0.155	0.143	0.142	0.142	0.155
	90	0.5	0.162	0.159	0.158	0.158	0.162
		1.5	0.158	0.152	0.151	0.151	0.158
稳定性电弧故障	30	0.5	1.455	1.463	1.498	1.481	1.498
		1.5	1.403	1.420	1.423	1.417	1.423
	60	0.5	1.392	1.408	1.485	1.405	1.485
		1.5	1.362	1.387	1.456	1.376	1.456
	90	0.5	1.425	1.439	1.510	1.430	1.510
		1.5	1.352	1.361	1.450	1.379	1.450
间歇性电弧故障	30	0.5	2.312	2.625	2.589	1.471	2.625
		1.5	2.398	2.462	2.535	1.613	2.535
	60	0.5	2.581	2.481	2.561	1.402	2.561
		1.5	2.116	2.365	2.231	1.371	2.365
	90	0.5	3.025	3.356	2.915	1.456	3.356
		1.5	2.496	2.459	2.698	1.375	2.698

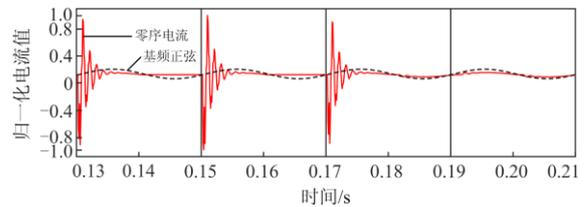
算例二: 中性点不接地系统, 故障条件与算例一的设置相同。不同故障类型下稳态零序电流及其对应的基频正弦电流波形拟合图如图 12 所示。



(b) 金属性接地故障拟合图



(c) 经 30 Ω 接地故障拟合图



(d) 间歇性电弧故障拟合图

图 12 不接地系统不同故障类型零序电流拟合图

Fig. 12 Zero sequence current fitting diagram of different fault types in ungrounded system

从图 12 中可以看出, 不接地系统中, 不同类型故障稳态零序电流与其基频正弦波的差异与谐振接地系统相同, 因不存在消弧线圈补偿现象, 不接地系统故障后稳态零序电流与基频正弦波更为接近, 表现为加权欧式距离更小, 但差异不大。同样改变故障初相角和故障位置进行仿真模拟, 计算相应加权欧氏距离, 结果如表 2 所示。

综合分析表 1 及表 2 的结果, 证明本文所提电弧故障辨识方法均能有效识别电弧接地故障。

5 结论

本文从配电网电弧故障建模、电弧故障辨识两方面入手, 提出了考虑弧长动态变化的配电网电弧接地故障辨识方法。

(1) 所建电弧模型在准确描述电弧故障特性的同时, 还能体现故障后各个周期在电弧电流突变程度、“零休”时间、电弧电压的畸变程度、燃弧电压、熄弧电压以及电弧电阻最大值等方面的变化。

(2) 电弧接地故障辨识方法准确有效, 且不受接地方式、故障初相角、故障位置的影响。

(3) 对数据进行了归一化处理, 取四个周期加权

表 2 不接地系统不同故障条件下零序电流欧氏距离
Table 2 Euclidean distance of zero sequence current under different fault conditions in resonance ungrounded system

故障类	初相 角/(°)	距离/ km	不同周期加权欧式距离				d_{WE}
			d_{WE2}	d_{WE3}	d_{WE4}	d_{WE5}	
金属性 接地 故障	30	0.5	0.186	0.179	0.177	0.177	0.186
		1.5	0.181	0.176	0.175	0.175	0.181
	60	0.5	0.189	0.185	0.180	0.180	0.189
		1.5	0.175	0.170	0.169	0.167	0.175
	90	0.5	0.188	0.182	0.180	0.179	0.188
		1.5	0.182	0.179	0.178	0.178	0.182
经 30 Ω 电阻接 地故障	30	0.5	0.183	0.181	0.177	0.177	0.183
		1.5	0.157	0.153	0.151	0.151	0.157
	60	0.5	0.175	0.171	0.168	0.166	0.175
		1.5	0.160	0.155	0.154	0.154	0.160
	90	0.5	0.175	0.165	0.161	0.161	0.175
		1.5	0.154	0.152	0.151	0.151	0.154
稳定性 电弧 故障	30	0.5	1.271	1.314	1.367	2.289	1.367
		1.5	1.223	1.301	1.311	1.273	1.311
	60	0.5	1.265	1.283	1.322	1.271	1.322
		1.5	1.236	1.255	1.323	1.248	1.323
	90	0.5	1.225	1.156	1.395	1.235	1.395
		1.5	1.108	1.123	1.305	1.112	1.305
间歇性 电弧 故障	30	0.5	2.801	2.846	2.431	1.264	2.846
		1.5	2.873	2.719	2.585	1.174	2.873
	60	0.5	2.142	2.233	2.159	1.320	2.233
		1.5	2.356	2.231	2.234	1.125	2.356
	90	0.5	2.869	2.789	2.891	1.320	2.891
		1.5	2.644	2.236	2.148	1.289	2.644

欧氏距离最大值为最终值,有效避免了稳定性电弧故障和间歇性电弧故障的误判。

电弧接地故障辨识方法中,阈值的设定是依靠大量仿真实验的结果,考虑到配电网现场实际工况复杂,线路参数和实际故障条件会与仿真结果有所不同,不同故障类型下的加权欧式距离可能会有些偏差,虽然本文已经在仿真的基础上保留了足够的裕度,但在实际配电网的应用还需进一步的验证和分析。

参考文献

- [1] 要焕年,曹梅月. 谐振接地技术新发展[J]. 中国电力, 2000, 33(10): 55-57, 80.
YAO Huannian, CAO Meiyue. New development of resonance neutral earthing technology[J]. Electric Power, 2000, 33(10): 55-57, 80.
- [2] 刘战磊,曾祥君,喻锴,等. 基于不平衡过电压动态抑制的谐振接地配电网单相接地故障保护新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 41-49.

- LIU Zhanlei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A new method of single-phase grounding fault protection for a resonant grounding distribution network based on unbalanced overvoltage dynamic suppression[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 41-49.
- [3] 戴锋,王政,程孟晗,等. 考虑短线路折反射的配电网故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 122-130.
DAI Feng, WANG Zheng, CHENG Menghan, et al. Study on fault location considering refraction and reflection of short lines in a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 122-130.
- [4] 黄鸣宇,祁升龙,芦翔,等. 面向配网保护的集分联合馈线自动化控制方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 49-54.
HUANG Mingyu, QI Shenglong, LU Xiang, et al. Combined centralized and distributed control method for distribution network protection[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2020, 48(5): 49-54.
- [5] 刘家好,马佳骏,王颖,等. 多源协同的智能配电网故障恢复次序优化决策方法[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 100-106.
LIU Jiayu, MA Jiajun, WANG Ying, et al. Restoration sequence decision-making for smart distribution system considering multiple sources coordination[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 100-106.
- [6] 李卫国,刘柏岑,卢广旗. 含分布式电源的配电网单相接地故障精确定位方法[J]. 供用电, 2020, 37(9): 58-63.
LI Weiguo, LIU Baicen, LU Guangqi. A method for precise location of single-phase grounding fault in distribution network with distributed generation[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(9): 58-63.
- [7] 刘科研,盛万兴,董伟杰. 配电网弧光接地故障建模仿真与实验研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 12-22.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, DONG Weijie. Overview of modeling simulation and experimental research on arc grounding fault in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 12-22.
- [8] 王开科,熊小伏,肖扬,等. 基于负序电流的主动配电网单相断线故障保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 10-18.
WANG Kaike, XIONG Xiaofu, XIAO Yang, et al. Single-phase break fault protection method for an active distribution network based on negative sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 10-18.

- [9] 郭凤仪, 李坤, 陈昌昱, 等. 基于小波近似熵的串联电弧故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 164-172.
GUO Fengyi, LI Kun, CHEN Changken, et al. Series arc fault identification method based on wavelet approximate entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 164-172.
- [10] SALEH S A, VALDES M E, MARDEGAN C S, et al. The state-of-the-art methods for digital detection and identification of arcing current faults[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5): 4536-4550.
- [11] WANG Y, ZHANG F, ZHANG X, et al. Series AC arc fault detection method based on hybrid time and frequency analysis and fully connected neural network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(12): 6210-6219.
- [12] 赵铁军, 孟菁, 宋岳奇, 等. 组串式光伏系统直流串联电弧故障检测与保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 74-82.
ZHAO Tiejun, MENG Jing, SONG Yueqi, et al. Series arc detection and protection on the DC side of string-type PVs[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 74-82.
- [13] SHI L. Study of low cost arc fault circuit interrupter based on MCU[J]. International Journal of Control and Automation, 2015, 8(10): 25-34.
- [14] 杨帆, 任伟, 沈煜, 等. 谐振接地配电网电弧接地故障暂态分析方法与辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(4): 23-31.
YANG Fan, REN Wei, SHEN Yu, et al. Transient analysis method and identification of arc grounding faults in Petersen coil grounded distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(4): 23-31.
- [15] 沈煜, 阮羚, 戴兵, 等. 配电网单相电弧接地故障的辨识方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(12): 1098-1104.
SHEN Yu, RUAN Ling, DAI Bing, et al. Identification of single-phase arc grounding fault in power distribution network[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(12): 1098-1104.
- [16] 陈旭. 小电流接地系统单相弧光接地故障特性分析及仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
CHEN Xu. Analysis and simulation research of characteristics of single-phase arc grounding fault in small current grounding power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [17] 卢其威. 故障电弧检测技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [18] 王宾, 崔鑫, 董新洲. 配电线路弧光高阻故障检测技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 96-107, 377.
WANG Bin, CUI Xin, DONG Xinzhou. Overview of arc high impedance grounding fault detection technologies in distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 96-107, 377.
- [19] JOHNS A T, AGGARWAL R K, SONG Y H. Improved techniques for modelling fault arcs an faulted EHV transmission systems[J]. IEE Proceedings Generation Transmission & Distribution, 1994, 141(2): 148-154.
- [20] 韩正庆, 陈晨旭, 沈睿, 等. 高速铁路电分相电弧运动发展规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3154-3163.
HAN Zhengqing, CHEN Chenxu, SHEN Rui, et al. Research on the development laws of articulated phase insulator arc movement in high-speed railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3154-3163.
- [21] 冯文昕. 基于链式电弧模型的灭弧防雷间隙灭弧时间的研究分析[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
FENG Wenxi. Research on the arc extinguishing time of arc extinguishing lighting protection gap based on chain arc model[D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [22] 司马文霞, 谭威, 杨庆, 等. 基于热浮力-磁场力结合的并联间隙电弧运动模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 138-145.
SIMA Wenxia, TAN Wei, YANG Qing, et al. Long AC arc movement model for parallel gap lightning protection device with consideration of thermal buoyancy and magnetic force[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 138-145.
- [23] 丛浩熹, 李庆民, 行晋源, 等. 基于能量平衡的潜供电弧燃弧时间计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3450-3458.
CONG Haoxi, LI Qingmin, XING Jinyuan, et al. Computation method of arcing time of the secondary arcs based on energy balance[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3450-3458.
- [24] 刘继. 送电线路自动重合闸装置[M]. 上海: 科技卫生出版社, 1958.
- [25] JIANG J, WEN Z, ZHAO M X, et al. Series arc detection and complex load recognition based on principal component analysis and support vector machine[J]. IEEE Access, 2019, 7(12): 47221-47229.

收稿日期: 2021-07-13; 修回日期: 2021-10-13

作者简介:

蔺 华(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力系统生产运行等工作. E-mail: 1662003406@qq.com

(编辑 魏小丽)