

基于故障旁路特征的电网电弧接地故障辨识^{*}

刘鹏辉^{1,2} 张亚柠¹ 戴瑜兴^{2,3} 宋运忠¹

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454003; 2. 广东志成冠军集团有限公司 东莞 523711;

3. 温州大学电气数字化设计技术国家地方联合工程实验室 温州 325035)

摘要:中性点有效接地供电系统中电弧接地故障频发,而已有的故障检测方法在电弧耗散功率较小,零休时长较短时存在不足,导致检测准确性偏低。针对此问题,采用故障旁路零序电流特征进行故障辨识。首先,探究了电弧接地故障下故障旁路零序电流的形成机理,揭示了电弧故障特征向故障旁路信号的传递作用。然后,采用梯度积及相关系数指标,描述故障旁路零序电流信号特征,建立辨识判据,实现故障类型判别。最后,仿真结果及实验结果验证了所提方法的有效性。对比分析表明,其相比于已有方法,该方法具有较高的识别精度。特别是在电弧耗散功率小于 2×10^3 W、零休特征不明显的故障场景中,该方法更具识别优势。所提方法拓展了电弧故障辨识手段,可用于预防电弧故障引发的电气火灾。

关键词:电弧故障;梯度;相关系数;故障辨识;电气火灾

中图分类号: TM727 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

Arc grounding fault identification based on sound line features in power grid

Liu Penghui^{1,2} Zhang Yaning¹ Dai Yuxing^{2,3} Song Yunzhong¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Guangdong Zhicheng Champion Group Co., Ltd., Dongguan 523711, China; 3. National-Local Joint Engineering Laboratory of Electrical Digital Design Technology, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: Arc grounding faults occur frequently in power supply and distribution system with effective grounding neutral point. Existing fault detection methods are insufficient when arc dissipation power is small and zero rest time is short, resulting in low detection accuracy. In order to solve this problem, the zero sequence current of the fault bypass is used to identify the fault. Firstly, for the arc grounding fault, the formation mechanism of zero sequence current of fault bypass is explored, and the transmission effect of arc fault characteristics to fault bypass signal is revealed. Then, the gradient product and correlation coefficient index are used to describe the zero sequence current signal characteristics of the fault bypass, and the identification criteria is established. Finally, Simulation results and experimental data verify the effectiveness of the proposed method. Comparative analysis shows that the proposed method has higher recognition accuracy than the existing methods. Especially in the fault scenario where the arc dissipation power is less than 2×10^3 W and the zero-off feature is not obvious, this method has more advantages in recognition. The proposed method expands the arc fault identification method, and can be used to prevent electrical fires caused by arc faults.

Keywords: arc fault; gradient; correlation coefficient; fault identification; electrical fire

0 引言

据应急管理部消防救援局公布的历年火灾统计数据

显示,电气火灾发生数量长期占据各类火灾之首,且发生频次连年上涨,成为引发较大火灾(3~10人死亡,或10~50人重伤,或1~5千万直接财产损失)的主要原因。防范

收稿日期:2024-01-09

^{*}基金项目:广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队资助项目(2017ZT07G237)、河南省高校基本科研业务费专项(NSFRF220425)、河南省自然科学基金(232300420301)项目资助

电气火灾、保障供电安全也随之成为工矿供配电系统面临的重要课题^[1]。

接地故障是供配电系统中最常见的一类故障,其中尤以电弧接地的故障性热能释放最大,电弧温度最高可达5 500 ℃,极易引发电气火灾。特别是近年来,为应对故障过电压及故障选线不灵敏等问题,许多大型工矿供配电系统(宝钢、首钢曹妃甸等)以及一些沿海大中型城市的配电网逐渐采用中性点经小电阻、小电抗等有效接地运行方式^[2],由于无消弧线圈,电弧能量得不到抑制,电气火灾风险更为突出^[3-4]。而电弧接地故障属于高阻故障,故障回路阻抗很大,导致故障电流幅值不显著,甚至小于负荷电流幅值,不易被直接检测,长期存在于系统对电网稳定运行危害极大。

目前已有的电弧故障检测方案主要包括两大类。其一是根据电弧发生时的物理特征,如弧光,弧声,温度等,采用传感器展开检测。郑鑫等^[5]提出了通过检测电弧故障发生时其发出的弧光及烟雾的亮度值是否达到设定值从而进行判断,但因为检测器件设置的问题以及电弧发生的随机性等问题,往往导致这类检测方法受限且效率较低。另一类方法主要通过电弧故障电压电流信号的时频域分析进行故障检测。韦明杰等^[6]提出了针对于电弧零序电流谐波幅值能量和小波分析后的信号波畸变程度分别与设定阈值进行对比进行判定。Hyun等^[7]提出了过剩峰值与设定阈值进行比较。蔺华等^[8]通过利用借助加权欧氏距离与阈值的比较区分故障类型。刘艳丽等^[9]通过利用电弧故障电流多特征融合判断建立数据库,通过数据库与实测数据进行对比判断出故障类型。

现有的方法主要依据故障线路的系列特征实施电弧故障检测^[10],往往忽略了故障网络中非故障的健全线路中的故障特征。但是,故障线路特征在一些特殊场景中又并不总是显著的。例如,工程中常用的故障线路零序电流“零休”特征在电弧耗散功率较小时并不明显,零休期很短,导致很多现有方法的检测效力大打折扣。本文将故障网络中非故障的健全线路定义为故障旁路。此时故障旁路特征依然较为丰富,仍可作为故障辨识依据。基于此,本文并不是继续围绕故障线路进行探究,而是另辟蹊径,从故障旁路信号特征出发,提出了一种基于故障旁路零序电流梯度积与相关系数的中性点有效接地的电网电弧故障检测方法,可有效实现常规场景以及零休期很短的特殊场景下的电弧故障辨识。

1 故障特性分析

1.1 故障线路零序电流零休时长

电弧故障发生后,故障线路的零序电流波形在过零处有着明显的“停滞”现象,这一特殊的波形特征段被称为电弧的“零休期”,其长度对应于零休时长。而零休时长的则与电弧的数学模型中的耗散功率有关。

以 Mayr 模型为例,电弧的数学模型可表示为:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{U_a \times I_a}{P_s} - 1 \right) \quad (1)$$

式中: g 表示电弧电导; τ 表示电弧模型的时间常数; U_a 表示电弧电压; I_a 表示电弧电流; P_s 表示电弧的耗散功率。

假设输入功率一定,其他参数参考文献^[11]设置,仅改变电弧耗散功率,得到不同的故障线路零序电流波形,如图1所示。

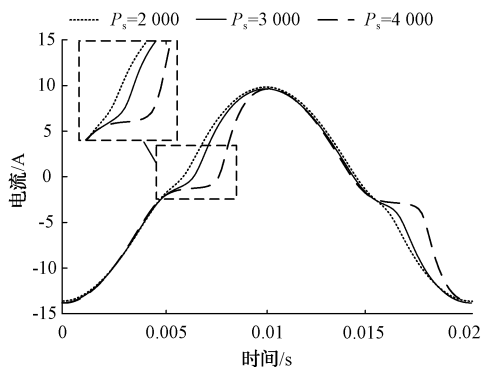


图1 不同耗散功率下的电弧电流波形

Fig. 1 Arc currents at different dissipated powers

从图1可以发现,当减小耗散功率时,电弧故障下零序电流波形的“零休期”明显变短,对应为电弧过零时熄灭时间变短,零休时长缩短。

在现实中,这种零休时长较短的情况往往发生于中压系统中高阻接地的情况,当电弧弧长较短时,往往会导致电弧耗散功率较小,从而导致零休时长较短的情况发生。在零休时长很短的情况下,故障线路零序电流波形将非常接近于正弦波形,故障特征变得很不显著,难以被有效提取,现有的基于电弧故障“零休期”的检测方法的准确性将大幅降低,甚至失效。

如图2所示,图2(a)采集到的电弧故障零序电流信号中,其特征“零休期”已十分短暂,且与图2(b)采集到的系统非故障状态下由于三相绝缘不对称等原因产生的零序电流信号波形也极为相似,而继续针对“零休”这一故障特征进行检测则可能会发生判定错误,难以辨别电弧故障与非故障状态。为了增强故障辨识可靠性,本文通过故障旁路零序信号进行辨识。

1.2 故障场景中故障旁路电流特性分析

某配电网单相电弧接地故障的简化示意图如图3所示。其中 u_{ac} 为电弧接地故障点对地的电弧电压。单相电弧接地故障可等效为故障前相电压的抵消与电弧电压之和,如图4所示。

图4中 u_s 为故障点在故障前的相电压。根据故障分量法和叠加定理,故障后电网可等效为故障前电网和故障附加网络的叠加。故障分量等于故障后的电气量减去故

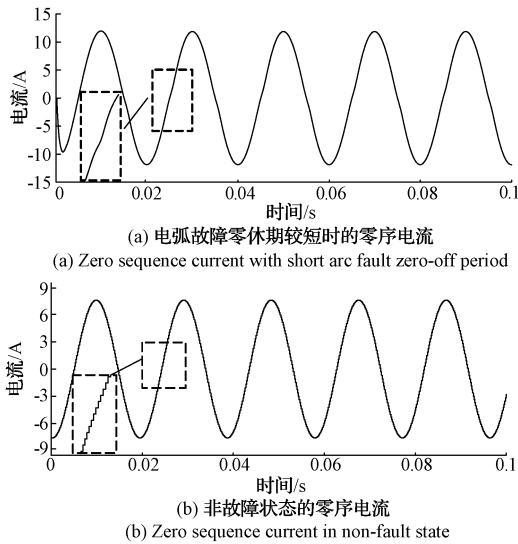


图2 零序电流波形对比

Fig. 2 Waveform comparison for zero sequence currents

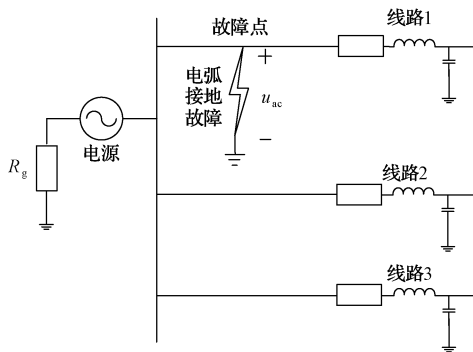


图3 电网电弧接地故障

Fig. 3 Arc ground fault at power grids

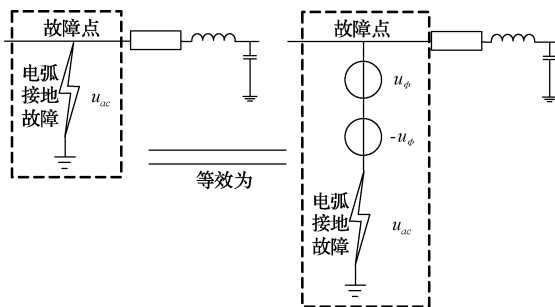


图4 电弧接地故障等效图

Fig. 4 Arc-ground fault equivalent diagram

障前的电气量。因此,故障附加网络中的电源处电压经(故障前、后)相减之后变为0,故障点处故障相的相电压故障分量经相减后变为 Δu ,如下式所示:

$$\Delta u = u_{ac} - u_{\phi} \quad (2)$$

其中,电弧电压 u_{ac} 的时域表达式为^[12]:

$$u_{ac} = (U_{T0} + rI_a) \left[L_0 - \frac{D}{2}(1 + \sin\omega_s t) \right] \quad (3)$$

式中: U_{T0} 为电弧电压梯度; r 为电弧电阻; L_0 为参考弧长; D 为交流电弧弧长最大变化值; ω_s 为信号角频率。

故障点在故障前的相电压 u_{ϕ} 为:

$$u_{\phi} = U_M \sin\omega t \quad (4)$$

式中: U_M 为系统正常运行时的电压最大值; ω 为工频状态下的角频率。

由于故障点处非故障相的相电压故障分量经相减后变为0。此时,结合故障点处各相电压,可求得故障点处零序电压 u_0 为:

$$u_0 = \frac{1}{3}(\Delta u + 0 + 0) = \frac{\Delta u}{3} \quad (5)$$

据此绘出零序网络如图5所示。图5中, C_1 、 C_2 、 C_3 为线路相对地零序电容; C_f 代表故障线路相对地零序电容; $3R_g$ 为中性点接地电阻;线路阻抗远小于线路对地电容,已忽略线路阻抗。

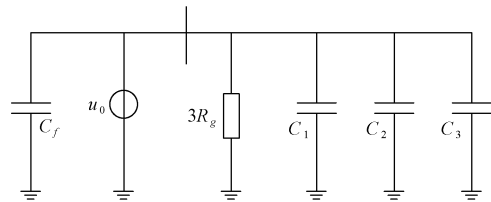


图5 零序简化网络

Fig. 5 Simplified zero sequence network diagram

对于故障旁路(即故障网络中非故障的健全线路),其零序电流可表示为:

$$I''_n = C_n \frac{d \frac{\Delta u}{3}}{dt} = C_n \frac{d \frac{(u_{ac} - u_{\phi})}{3}}{dt} =$$

$$\frac{1}{3} C_n \left(\frac{du_{ac}}{dt} - \omega U_M \cos\omega t \right) \quad (6)$$

由式(6)可知,故障旁路零序电流与电网零序电压存在微商关系。通过实验得到一组电弧故障电压信号与故障旁路零序电流信号,如图6所示。

从图6(a)可以看出,故障旁路零序电流波形在波峰、波谷处有着明显的畸变。并且,波形畸变恰好对应电弧故障电压的“鞍部”。从图6(b)可以看出,电弧故障电压微商波形与故障旁路零序电流波形在特定区段有明显的相似性。这些均从侧面佐证了,电弧故障电压通过式(6)将电弧故障特征传递到了故障旁路零序电流波形中。

上述的相关性关系与微商关系表明,受益于电网零序电压的传递作用,故障旁路零序电流中已含有故障特征,可通过故障旁路零序电流中的故障特征进行电弧故障辨识。

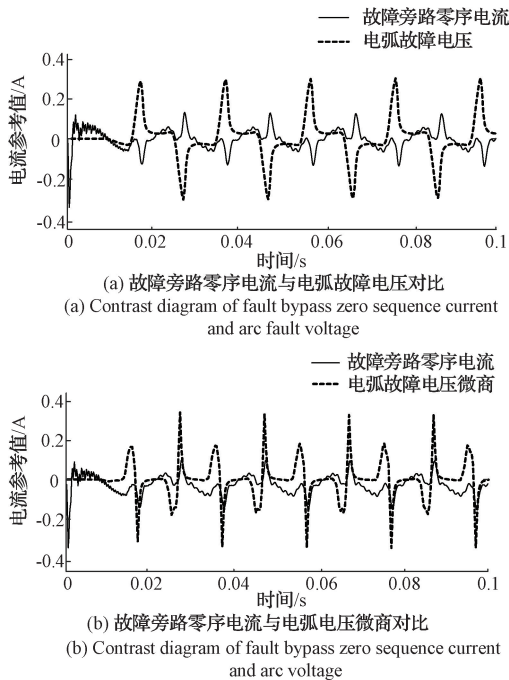


图6 故障旁路零序电流与电弧电压对比
Fig. 6 Zero sequence current and arc voltage comparison in fault bypass

2 故障辨识原理与思路

2.1 梯度

依据第1节所述电弧故障网络中故障旁路零序电流信号在波峰、波谷处存在剧烈震荡与畸变这一特殊性(图7),可通过设置一项指标——梯度积,对这些震荡畸变区段进行检测。

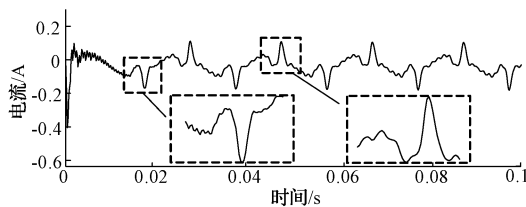


图7 故障旁路零序电流波形
Fig. 7 A zero sequence current waveform in fault bypass

梯度积可衡量某一函数在某一点或某一段的方向导数的增长方向、增长速率及变换速率。其数学表达式为:

$$\begin{cases} L_k = z_k - z_{k-bc} \\ R_k = z_{k+bc} - z_k \\ d_k = -1 \times L_k \times R_k \end{cases} \quad (7)$$

式中: bc 为设定步长; L_k 和 R_k 分别表示第 k 个数据的左梯度和右梯度; d_k 表示第 k 个数据的梯度积。

电弧接地故障波形在波峰、波谷处存在震荡畸变区段,梯度积相对很大;其他平缓区段的梯度积相对很小。而非故障状态下的零序电流波形呈现正弦状态,不存在振

荡畸变特征,在波峰波谷处及其他波形区段,波形变化均呈现正弦连续变化,梯度积始终较小。

2.2 相关系数

由于电弧故障特征的传递作用,故障旁路零序电流波形与正弦曲线在波峰、波谷处存在较大差异,如图8(a)所示。而非故障状态下零序电流波形则与正弦曲线较为吻合,如图8(b)所示。针对这一差异,可采用相关系数对电弧故障作进一步辨识。

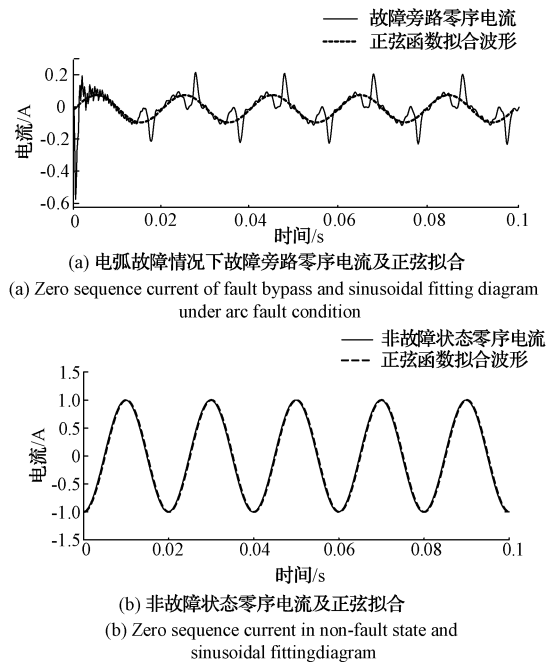


图8 零序电流拟合
Fig. 8 Zero sequence current fitting

相关系数计算公式如式(8)所示,可表征两信号变量之间的相关性密切程度。

$$g_{x,y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)} \sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}} \quad (8)$$

式中: cov 代表两信号变量的协方差矩阵; σ 表示变量的标准差; E 表示矩阵。

相关系数的取值范围为 $[-1, 1]$, 其值越接近 1, 表明两信号变量越呈现正相关, 信号越相似^[13-14]。其值越接近 -1, 表明两信号变量越呈现负相关。

结合式(6)的启示,参与相关分析的正弦曲线可通过对母线零序电压信号进行拟合和移相获得。具体地,对母线零序电压信号进行拟合,消除电弧畸变干扰;然后,对拟合结果(得到的正弦公式)进行求导,实际算法中通过对拟合结果公式进行移相 90° 实现。

3 方法流程

基于故障旁路特征的电网电弧接地故障辨识流程如图9所示。

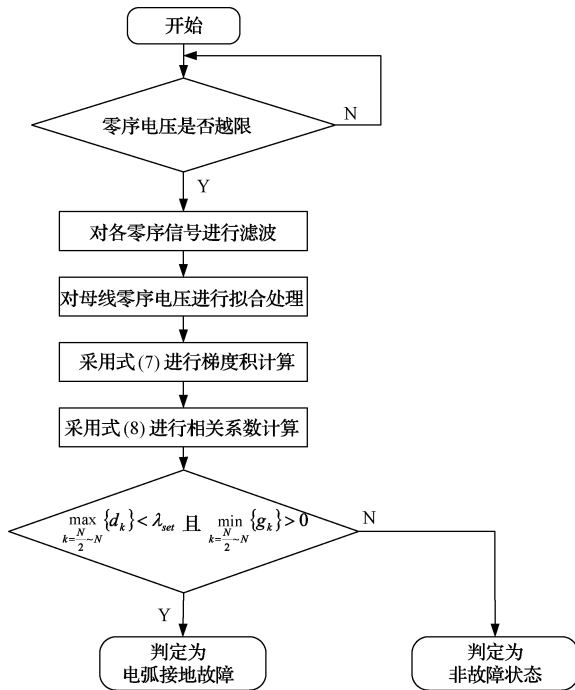


图9 电弧接地故障的辨识流程

Fig. 9 The identification process of arc grounding faults

判断梯度积数组和相关系数数组是否同时满足下式:

$$\max_{k=\frac{N}{2} \sim N} \{d_k\} < \lambda_{set} \text{ 且 } \min_{k=\frac{N}{2} \sim N} \{g_k\} > 0 \quad (9)$$

式中: d_k 和 g_k 分别为求得的梯度积和相关系数; λ_{set} 为阈值, 取值为 0.2; N 表示总采样次数; $k = 1, 2, \dots, N$ 。

若满足式(9), 则将该故障判定为非故障状态, 否则判定为电弧接地故障。

4 方案验证

4.1 仿真验证

为验证所提方法的有效性, 参考相关资料^[15-17], 在 Simulink 中搭建如图 10 所示仿真模型进行测试。

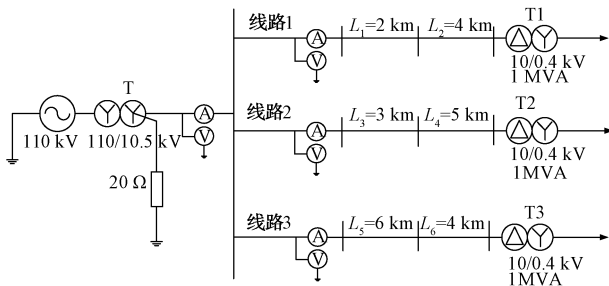


图10 电网仿真模型

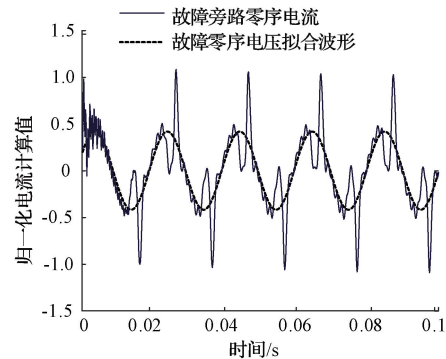
Fig. 10 The distribution network model for simulations

所搭建的仿真系统为 10 kV 中性点经电阻接地配电网, 系统频率为 50 Hz; 包含 3 条线路, 线路 1~3 长度分别为 6、8、10 km; 电弧故障模型采用 Mayr 电弧模型; 以参考

零时刻(0 s)开始设置故障, 信号采样频率设为 6 000 Hz; 分别设置电弧接地故障和非故障状态进行仿真测试^[18-19]。

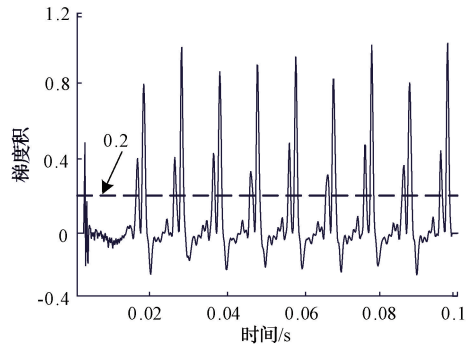
1) 电弧接地故障

设置电弧接地故障, 电弧模型具体参数设如下: 电弧时间常数 τ 设置为 0.6×10^{-5} s, 电弧耗散功率 P_s 设置为 2×10^3 W, 电弧初始电导 $g(0)$ 设置为 1×10^4 S。采集故障旁路零序电流, 得到电压拟合正弦曲线、梯度积、相关系数曲线, 结果如图 11 所示。



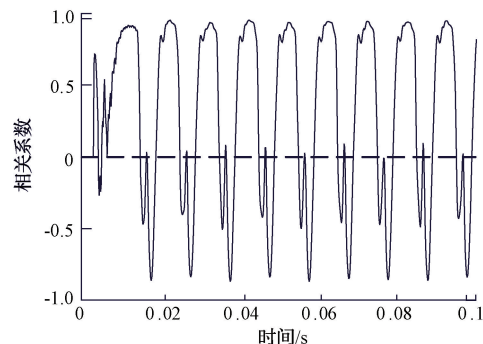
(a) 故障旁路零序电流及正弦拟合曲线

(a) Fault bypass zero sequence current and sinusoidal fitting curve



(b) 故障旁路零序电流梯度积曲线

(b) Fault bypass zero sequence current gradient product curve



(c) 故障旁路零序电流相关系数曲线

(c) Fault bypass zero sequence current correlation coefficient curve

图11 电弧接地故障判别情况

Fig. 11 Identification results of arc grounding faults

由图 11(a)可见, 两曲线在波峰、波谷处存在较大差异, 而在其他波形区段相似度较高。此点可通过图 11(b) 梯度积变化较为剧烈进行印证; 图 11(c) 中电弧接地故障

故障旁路零序电流与正弦曲线相关系数在 $[-1, 1]$ 之间往复震荡也可辅助印证。此时,求得的梯度积与相关系数均不满足式(9)。两项判据均不满足,可判定该故障为电弧接地故障。

2) 非故障状态

设置系统非全相运行,未运行相为A相,采集线路L3的零序电流,计算并绘制零序电压对应的正弦拟合曲线(已折算为与电流同一数量级)、零序电流梯度积、相关系数曲线,结果如图12所示。

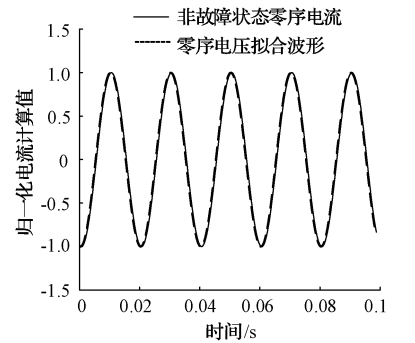
由图12(a)可见,两曲线在整个波形区段相似度均较高。此点可通过图12(b)梯度积变化较为平缓进行印证;图12(c)中非故障状态下的零序电流与正弦曲线相关系数始终趋近于1也可辅助印证两曲线较为相似。此时,求得的梯度积与相关系数均满足式(9)。两项判据均满足,可判定该故障为非故障状态。

对三相绝缘不对称情况也做了相应的测试,信号波形及测试结果与上述类似。所提方法能有效判定其为非故障运行状态。限于篇幅,不在此赘述。

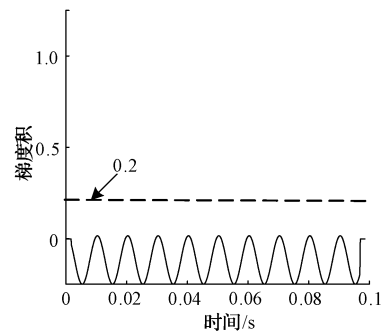
4.2 广泛测试与方法对比

为验证本方法在各种工况下进行电弧故障辨识的有效性,仍借助上述实验环境,通过改变仿真参数,对本文所提方法、基于谐波能量的检测方法、基于互补经验模态分解特征的检测方法进行多组对照仿真测试。

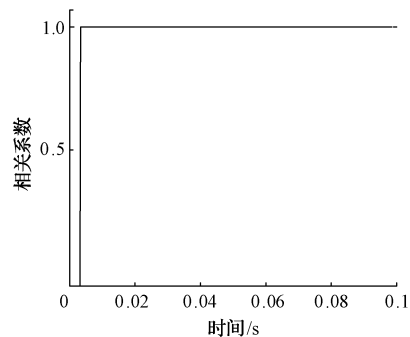
非故障状态模拟仿真参数依据上述实验条件,主要通过改变三相绝缘不对称情况、系统运行电压、系统未运行相和抽样线路位置进行测试与对照分析。共生成100组非故障状态进行对照测试。电弧接地故障模拟仿真参数取值除参照上述参数外,另修改了电弧的3个关键量(耗散功率、时间常数、电弧初始电导)进行测试。具体地,耗散功率变化范围为 $1.5 \times 10^3 \sim 4 \times 10^3$ W,时间常数取值范围为 $3 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-3}$,电弧初始电导为1 000 ~ 4 000 S。共生成100组电弧接地故障进行对照测试。测试结果如表1所示。



(a) 零序电流及正弦拟合曲线
(a) Zero sequence current and sinusoidal fitting curve



(b) 零序电流梯度积曲线
(b) Zero sequence current gradient product curve



(c) 零序电流相关系数曲线
(c) Zero sequence current correlation coefficient curve

图12 非故障状态判别情况

Fig. 12 Non-fault state identification

表1 3种方法的故障检测结果

Table 1 Fault detection results of three methods

检测方法	基于谐波能量的检测方法	基于互补经验模态分解特征的方法	本文所提方法
非故障状态准确识别次数	100	100	100
电弧接地故障准确识别次数	62	80	100
识别准确率/%	81	90	100

试验结果表明,3种方法均能有效识别非故障状态,但基于谐波能量和互补系综经验模态分解特征的方法对电弧接地故障的识别误差分别为38组和20组。这些误差组的特性均为电弧耗散功率均小于 2×10^3 W,导致电弧过零时间短,零休特性不明显。随机选取一组识别失效组,如图13所示。

基于谐波能量的方法通过将故障信号小波分析后d2能量波是否大于阈值(0.1)来判断故障类型。如图13(b)所示,电弧故障值始终小于阈值,该方法会将其误判为非故障状态。在基于分解特征的方法中,通过互补经验模态分解对疑似故障信号进行处理,得到多个分量,选取能量差值最大的分量作为信号源,然后利用时频域特征进行计

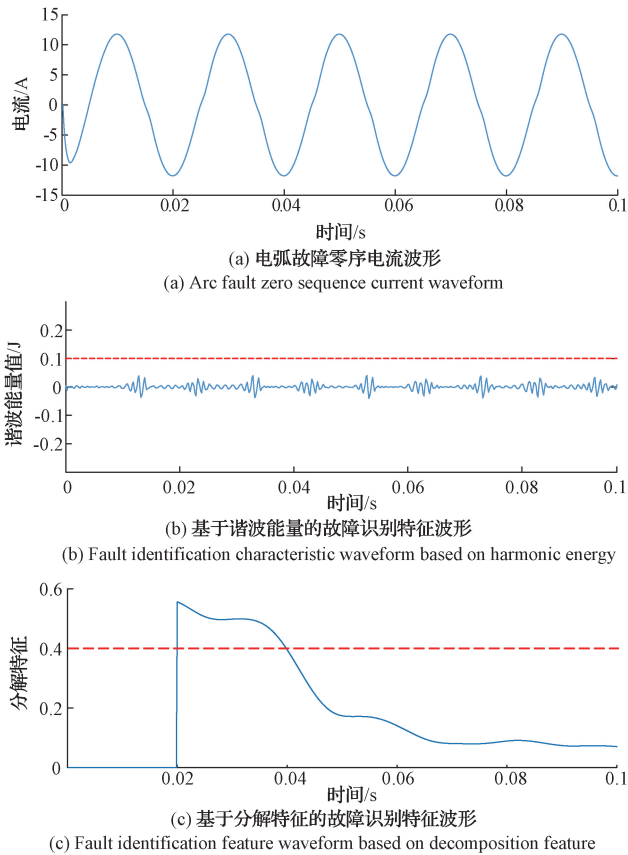


图 13 基于谐波能量和分解特征的识别结果

Fig. 13 Identification results based on harmonic energy and decomposition feature

算,当信号超过阈值(0.4)时判断为非故障。如图 13(c)所示,有部分分解特征大于阈值,该方法将其误判为非故障状态。

从表 1 可以看出,本文形成模型可以很好地识别电弧接地故障和非故障状态。在某些电弧故障过零特征不明显,该模型还能适应和识别故障类型。在基本特征参数和辅助特征参数的影响下,保证了该模型的精度。本文方法的详细识别结果如图 14 所示。

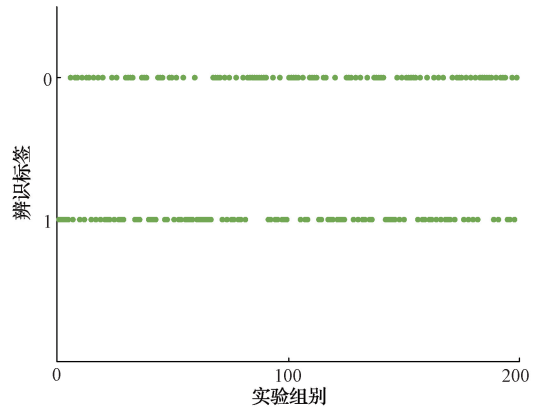


图 14 模型对样本组的识别情况

Fig. 14 Identification of sample groups using models

4.3 实验验证

为了尽可能真实地模拟电弧故障,参考国标 GB/T31143 和 UL1699 的规定,基于电网仿真模型(图 10),综合设计搭建电弧接地故障实验平台。实验平台主要由电源装置、工作接地电阻、电弧过渡电阻、电弧故障发生器、信息采集装置、模拟配电线路和负载组成,如图 15 所示。

电源装置选择型号 LGYD-01A 的安全用电实训装置,该装置额定电压为 380 V。工作接地电阻选择一块额定功率为 100 J,电阻值为 100 Ω 的金属外壳电阻。电弧过渡电阻选择一块额定功率为 100 J,电阻值为 10 Ω 的电阻与额定功率为 100 J,电阻值为 100 Ω 的电阻串联。信

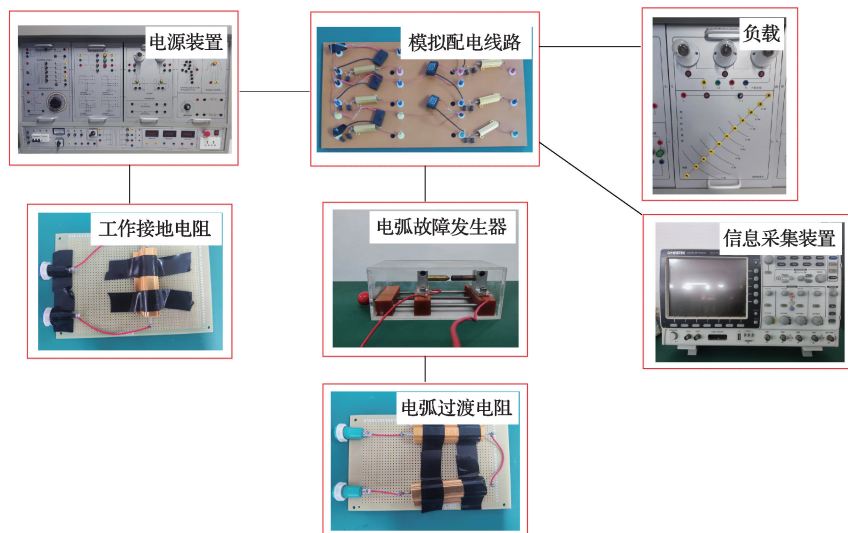


图 15 电弧接地故障实验平台装置连接

Fig. 15 Arc ground fault test platform device connection diagram

息采集装置采用型号为 GDS-2104A 的数字存储示波器。模拟配电线路选择酚醛树脂板作为实验线路载体,选择焊制两条线路,包括电阻、电感、电容,线路设备参数如表 2 所示。线路负载选择安全用电挂箱上的三相负荷及灯泡模块。电弧故障发生器选用由电极合成法形成电弧的发生装置。

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

参量	数值	参量	数值
交流电源电压	380 V	线路对地电容	0.68 μ F
线路电阻	0.1 Ω	故障过渡电阻	110 Ω
线路电感	0.1 mH	采样频率	10 kHz

模拟实验中配电网共设置两回线路,分别为线路 1 和线路 2。设置线路 2 作为故障线路,故障发生于线路 2 的 B 相上。

首先将线路正常通电,此时负载正常工作,示波器实时采集模拟线路板线路电流信号,如图 16 所示;之后将电弧发生装置的调节旋钮缓慢旋转,使得移动电极逐步接近静止电极;当观察到负载开始异常工作时(频闪)停止通电,此时说明线路中存在异常故障情况;利用示波器采集此时异常故障线路的电流信号并进行保存。

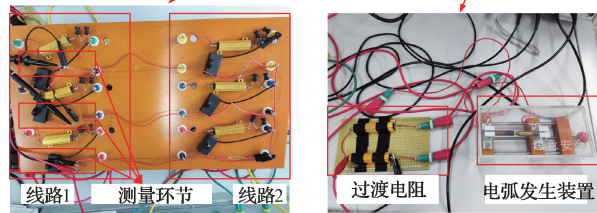
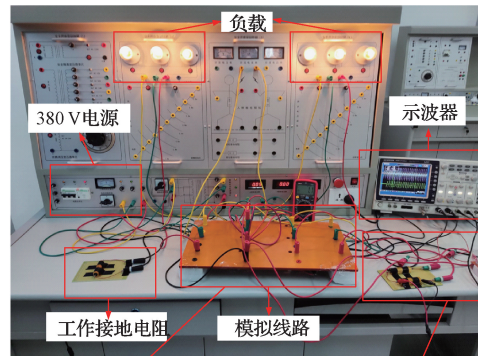


图 16 电弧接地故障实验平台
Fig. 16 Arc ground fault test platform

将部分实测信号转化为输出数据代入本文所提方法流程中,可得与 4 节仿真实验中结果相同的实验曲线,结果如图 17 所示。

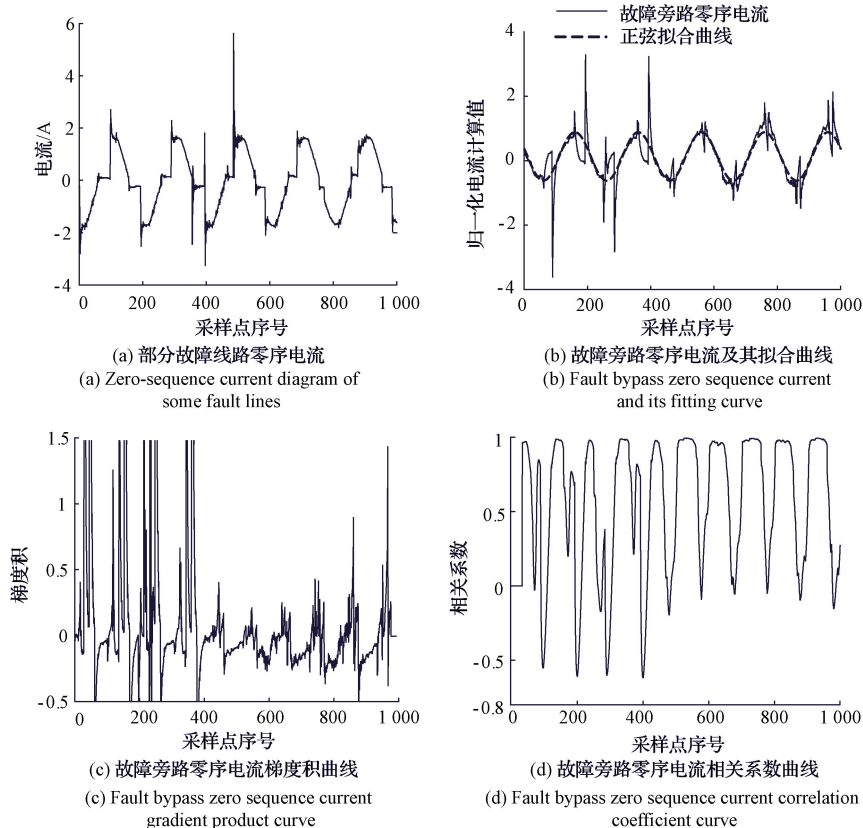


图 17 实测信号的故障判断

Fig. 17 Fault judgment of measured signal

此时,求得的梯度积与相关系数均不满足式(9)。两项判据均不满足,可判定该故障为电弧接地故障。

5 结 论

现有依据故障线路零序电压/电流信号特征的中性点有效接地电网电弧接地故障检测方法存在不足之处,尤其在电弧耗小散功率较、零休时长较短时电弧故障检测效力与准确性将大幅降低。电网的零序电压对电弧故障的传递作用使故障旁路中存在较为丰富的故障特征,可作为电弧接地故障辨识的依据。基于此,本文基于故障旁路零序电流梯度积与相关系数的电弧接地故障检测方法,可实现常规场景以及零休期很短的特殊场景中的电弧故障辨识。仿真测试结果与实验结果表明,本文方法的有效性及可靠性;对比测试结果表明,相比于常见的电弧检测方法更具优势。

参 考 文 献

- [1] 孟祥忠, 陈文聪, 李金宝. 中压配电网单相断线故障检测及定位的研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(6): 32-37.
- MENG X ZH, CHEN W C, LI J B. Research on detection and location of single line breakage in medium voltage distribution network [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(6): 32-37.
- [2] 耿建昭, 王宾, 董新洲, 等. 中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 85-91.
- GENG J ZH, WANG B, DONG X ZH, et al. Analysis and detection of high impedance grounding fault in neutral point effectively grounding distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 85-91.
- [3] 杨庆, 齐玥, 韦思宇, 等. 架空配电线路故障电弧的电磁辐射特性及故障定位应用[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 353-362.
- YANG Q, QI Y, WEI S Y, et al. Electromagnetic radiation characteristics of overhead distribution line fault arc and their fault location application [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 353-362.
- [4] KIM J C, NEACSU D O, BALL R, et al. Clearing series AC arc faults and avoiding false alarms using only voltage waveforms [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 946-956.
- [5] 郑鑫, 耿芸, 赵杰. 变电站弧光烟雾智能检测报警系统设计[J]. 电子器件, 2019, 42(5): 1289-1293.
- ZHENG X, GENG Y, ZHAO J. Design of substation arc smoke detection and alarm system [J]. Electronic Devices, 2019, 42(5): 1289-1293.
- [6] 韦明杰, 张恒旭, 石访, 等. 基于谐波能量和波形畸变的配电网弧光接地故障辨识[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 148-154.
- WEI M J, ZHANG H X, SHI P, et al. Identification of arcing grounded fault in distribution network based on harmonic energy and waveform distortion [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 148-154.
- [7] HYUN S Y, HONG J S, YUN S Y, et al. Arc modeling and kurtosis detection of fault with arc in power distribution networks [J]. Applied Sciences, 2022, 12(6): 2777-2777.
- [8] 蔺华, 王子龙, 郭振华, 等. 考虑弧长动态变化的配电网电弧接地故障建模及辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 31-39.
- LIN H, WANG Z L, GUO ZH H, et al. Modeling and identification of a distribution network arc grounding fault considering arc length dynamic variation [J]. Electric Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 31-39.
- [9] 刘艳丽, 郭凤仪, 李磊, 等. 矿井供电系统串联型故障电弧仿真分析及诊断方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1265-1273.
- LIU Y L, GUO F Y, LI L, et al. Simulation analysis and diagnosis method of series fault arc in mine power supply system [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1265-1273.
- [10] 向小民, 汪杰, 卢云. 基于小波时频图和 AlexNet 网络的电弧故障诊断方法[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(10): 170-177.
- XIANG X M, WANG J, LU Y. Arc fault diagnosis method based on wavelet time-frequency graph and AlexNet network [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(10): 170-177.
- [11] 高杨, 王莉, 张瑶佳, 等. 简化的 Schavemaker 交流电弧模型参数的计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 96-105.
- GAO Y, WANG L, ZHANG Y J, et al. Research on the calculation method for the parameters of the simplified Schavemaker AC arc model [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 96-105.
- [12] 张逸, 林才华, 邵振国, 等. 基于电子连续性方程的新型交流电弧炉通用模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7425-7434.
- ZHANG Y, LIN C H, SHAO ZH G, et al. A novel general model of AC electric arc furnace based on electron continuity equation [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7425-7434.
- [13] LUO M X, LI W L. Some new similarity measures on picture fuzzy sets and their applications[J]. Soft

- Computing, 2023, 27(10): 6049-6067.
- [14] 汤林, 胡岳, 王红斌, 等. 基于插值相关法的局部放电特高频脉冲信号时延估计[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3320-3325.
TANG L, HU Y, WANG H B, et al. Time-delay estimation of partial discharge UHF pulse signals based on interpolation cross-relation algorithm [J]. High Voltage Technology, 2015, 41(10): 3320-3325.
- [15] 缪希仁, 赵丹, 刘晓明, 等. 含分布式电源配电网短路保护研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3006-3019.
MIAO X R, ZHAO D, LIU X M, et al. A research review of short-circuit protection in distribution network with distributed generation [J]. High Voltage Technology, 2023, 49(7): 3006-3019.
- [16] 詹惠瑜, 刘科研, 盛万兴, 等. 有源配电网故障诊断与定位方法综述及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 660-671.
ZHAN H Y, LIU K Y, SHENG W X, et al. Review and prospects of fault diagnosis and location method in active distribution network [J]. High Voltage Technology, 2023, 49(2): 660-671.
- [17] 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 K Y, SHENG W X, DONG W J. Overview of modeling simulation and experimental research on arc grounding fault in distribution network [J]. High Voltage Technology, 2021, 47(1): 12-22.
- [18] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.
XU Y, GUO M F, CHEN B, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-64.
- [19] 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 T J, MENG J, SONG Y Q, et al. Series arc detection and protection on the DC side of string-type PVs [J]. Protection and Control of Power Systems, 2020, 48(20): 74-82.

作者简介

刘鹏辉(通信作者), 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为电网故障检测与安全防护等。

E-mail: penghuiliu@foxmail.com

张亚柠, 硕士, 主要研究方向为电网故障检测。

E-mail: 1123704564@qq.com