

数学形态学在串联型故障电弧诊断中的应用

刘振国¹, 孙 鹏¹, 由广祥²

(1. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011; 2. 沈阳工业大学特种电机与高压电器教育部重点实验室, 沈阳 110870)

摘要: 故障电弧是导致设备或线路电气火灾故障的原因之一。为了实现对配电系统中串联型故障电弧的快速诊断,文中提出了一种基于数学形态学的串联型故障电弧诊断方法。该方法利用数学形态学的开闭运算,有效地滤除电流信号中的噪声干扰,并通过多分辨率形态梯度(MMG)运算提取串联型故障电弧发生前后电流波形的突变特征,进而获取正常工作情况下和故障电弧发生时线路电流波形的形态梯度值。通过比较故障发生前后线路电流波形形态梯度值的大小,可以准确地判断出线路是否发生了电弧故障。该串联故障电弧诊断方法具有逻辑运算简单,计算量小且易于实现的特点。

关键词: 串联故障电弧; 数学形态学; 多分辨率形态梯度(MMG); 快速诊断

Application of Mathematical Morphology in the Diagnosis of Arc Fault in Series

LIU Zhenguo¹, SUN Peng¹, YOU Guangxiang²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Company Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China;

2. Education Ministry Key Laboratory of Special Electric Machines and High Voltage Apparatus, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Arc fault is one of the reasons which cause the equipment or lines electrical fire. In this paper, a novel diagnosis method of arc fault in series based on mathematical morphology is proposed in order to diagnose arc fault in series in distribution system rapidly. The noise interferences in the current signal can be filtrated effectively using the combination of morphological opening and closing operation, and the abrupt change features of current waveform from the pre and post during the arc fault in series could be exacted via the multi-resolution morphological gradient (MMG) computing. And then, the morphological gradient values of current during the normal working and arc fault conditions can be obtained. It can be judged accurately whether arc fault has been occurred or not by comparing the size of current morphology gradient values pre and post of the arc fault. The proposed method of arc fault in series diagnosis has advantages of simple logic operation, small computation amount and easy to realize.

Key words: arc fault in series; mathematical morphology; multi-resolution morphological gradient(MMG); rapid diagnosis

0 引言

在配电系统中,故障电弧是导致设备或线路发生故障的重要电气原因之一。故障电弧包含有串联型故障电弧和并联型故障电弧。串联型故障电弧是指故障电弧发生点与线路负载呈串联关系,电弧仅在一条线路中燃烧,经常发生在线路或设备的绝缘老化、绝缘破损或导体连接有松弛的地方。并联型故障电弧是指故障电弧发生点与线路负载呈并联关

系,经常发生在线路的相线与相线之间或相线与中性线之间,所以并联电弧可以称为短路电弧。当其发生时回路电流较大,现有的保护设备具备隔离保护的能力。而对于串联型故障电弧,因受到线路负载的限制,其回路电流往往与负载正常工作时的电流相近且不会超过线路的负荷电流,因此,传统的保护设备和方法无法对其进行隔离保护,进而有可能导致事故的发生。因此,对串联型故障电弧特性进行分析与研究,从而快速及时的检测出电弧故障具有重要的工程实用价值^[1]。

收稿日期:2016-03-22; 修回日期:2016-05-20

故障电弧发生时除了电磁效应以外还伴随着声、光、热和压力等物理效应。因此,国内外学者根据上述效应提出了不同的诊断方法。一类是根据物理效应设置非电量传感器对声、光、热等非电类物理参数进行监测^[2-5];但是由于电弧发生时的位置是不确定的,而传感器需要放置在电弧发生点附近,因此,该类方法在具体应用时难度较大;另一类是当电弧发生时对线路电流波形进行分析,进而判断线路中是否出现故障电弧。该方法对故障电弧发生时的具体位置没有要求,只需要检测出线路电流即可。此类故障电弧诊断方法包括:基于小波分析原理对电弧电流信号的特征频段进行分析^[6-7]、利用小波熵来反应故障电弧发生前后电流信号的能量分布^[8]从而判断线路中是否有故障电弧的发生。此类方法逻辑计算较复杂,计算量较大,对单片机的性能和成本要求会提高。

近年来,一种新兴的数学形态学(mathematical morphology, MM)方法在电力系统信号处理方面得到了广泛的应用^[9-12]。它是一种非线性分析方法,经过其处理过的信号不存在相位移和幅度衰减。另外数学形态学分析方法只有加减运算和取极值运算,没有乘除运算;因此,该方法计算简单,对实时信号处理速度快,时延小。文中基于数学形态学,构造形态开闭运算滤波器对电流信号进行滤波,然后通过多分辨率形态梯度运算,获取串联故障电弧发生前后线路电流波形的形态梯度值,并以此作为诊断故障电弧时的特征量。

1 数学形态学及其相关算法

数学形态学是建立在集合论和积分几何学基础之上的学科,是几何形态分析与描述的有力工具^[13-14]。形态学着眼于波形形态而不是进行频域分析,最早应用于对岩相学的定量描述,后被广泛应用于信号和图像分析等工程领域。目前形态学技术和应用不断扩展,已经在电力系统行波保护去噪^[15]、电能质量扰动检测^[16]、介质损耗在线监测^[17]及变压器励磁涌流识别^[18]等方面得到应用。数学形态学对信号处理时只取决于待处理信号的局部特征形状,对电力系统信号分析的主要手段是经过波形变换突出信号的突变特征,对信号进行滤波降噪处理、对信号波形进行波形分解、对波形进行形态的谱分析等。

1.1 形态学滤波

数学形态学以腐蚀和膨胀两种基本运算为基础。设 $f(x)$ 是一维输入信号, $g(x)$ 作为结构元素(也是一个信号)可以用作收集信号信息的一种“探针”,以

便提取有用的信息,进行信号的特征分析和描述。 C 和 D 分别为 $f(x)$ 和 $g(x)$ 的定义域, $C=\{1,2,\dots,M\}$, $D=\{1,2,\dots,N\}$, 且 $M \geq N$; 则结构元素 $g(x)$ 对信号 $f(x)$ 的膨胀和腐蚀定义为

$$(f \oplus g)(x) = \max[f(x-y) + g(y)]; \quad (1)$$

$$(f \ominus g)(x) = \min[f(x+y) - g(y)]. \quad (2)$$

式(1)、(2)中, $x \in C, y \in D$ 。膨胀和腐蚀是形态变换的基本算子。在膨胀和腐蚀基础上定义的形态开运算 $f \circ g$ 和形态闭运算 $f \cdot g$ 分别为

$$(f \circ g)(x) = [(f \ominus g) \oplus](x); \quad (3)$$

$$(f \cdot g)(x) = [(f \oplus g) \ominus](x). \quad (4)$$

开运算主要抑制信号中的峰值噪声,闭运算主要抑制信号中的波谷噪声。在开闭和闭开运算的基础上再定义其级联形式的滤波运算算子,即开闭和闭开运算算子:

$$O_c[f(x)] = (f \circ g \cdot g)(x); \quad (5)$$

$$C_o[f(x)] = (f \cdot g \circ g)(x). \quad (6)$$

开运算能够消除信号散点和毛刺,具有光滑信号的作用,而闭运算则与之相反;所以经开闭运算处理后的信号输出幅度偏小,经闭开运算处理后的信号输出幅度偏大。在很多情况下单独使用二者之一并不能取得最好的滤波效果。因此可以将二者结合,方法如下,设输入信号为 $f(x)$, 经过开闭和闭开运算滤波输出为

$$y(x) = \lambda_1 O_c[f(x)] + \lambda_2 C_o[f(x)]. \quad (7)$$

式(7)中: $f(x)$ 包含有原始信号和噪声; $y(x)$ 为滤波后得到的信号; λ_1, λ_2 为权系数。

一般通过最优化方法不断修正权系数 λ_1 可以得到最优滤波效果,但是在优化过程中会出现大量的迭代计算,这样便不能够体现形态滤波算法快速性的特点。因此,基于上述考虑文中将其进行简化,令 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1/2$, 即滤波输出为

$$y(x) = \{O_c[f(x)] + C_o[f(x)]\}/2. \quad (8)$$

1.2 多分辨率形态学梯度(MMG)

在形态学图像处理中提出了几种梯度,文中用到的是其基本形态学梯度。其定义为原始信号 $f(x)$ 经过结构元素 $g(x)$ 腐蚀和膨胀后的差分。表示为

$$G_{\text{grad}} = (f \oplus g)(x) - (f \ominus g)(x). \quad (9)$$

图像处理中,若某一点的梯度值大,则表示该点明暗变化迅速,可能有边沿通过。同理,在信号处理中,若梯度值变化增大,则表明该点信号发生突变。且梯度值的大小能够反映信号波形突变的大小。所以梯度运算可以对信号进行处理,突现边缘信息。但是仅利用普通的形态学梯度运算很难满足高灵敏度的奇异性检测。因此,类似于多分辨率小波分析一

样,可以将多分辨率分析的概念应用于数学形态学即多分辨率形态学梯度。

在多分辨率形态学梯度中,结构元素的形状和大小对信号处理结果有很大的影响。所选用结构元素要尽可能的简单并且其结构特征要尽量接近待分析信号的图形特点,这样可以更加准确获取待分析信号的突变特征,而且计算所用时间也会变短。为了提取信号波形中的上升沿和下降沿,设计了一种可变并具有不同原点位置的结构元素,如下所示:

$$g^+ = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, g_l^*\}; \quad (10)$$

$$g^- = \{g_l, g_{l-1}, \dots, g_2, g_1\}. \quad (11)$$

式(10)、(11)中:结构元素 g^+ 用来提取波形中的上升沿; g^- 用来提取波形中的下降沿; g_l^* 和 g_l 分别为结构元素 g^+ 和 g^- 的原点位置。结构元素宽度 $l = 2^{1-\alpha} l_1$, α 为多分辨率形态梯度的分析层数, l_1 为结构元素在第1层的初始宽度。

由以上分析,多分辨率形态梯度 ρ^α 定义为

$$\rho_g^\alpha(x) = (\rho_g^{\alpha-1} \oplus g^+)(x) - (\rho_g^{\alpha-1} \ominus g^+)(x); \quad (12)$$

$$\rho_g^\alpha(x) = (\rho_g^{\alpha-1} \ominus g^-)(x) - (\rho_g^{\alpha-1} \oplus g^-)(x); \quad (13)$$

$$\rho_g^\alpha(x) = \rho_g^\alpha(x) + \rho_g^\alpha(x). \quad (14)$$

α 和 l 对运算结果有重要的影响。当 α 和 l 增加时,结构元素更能有效地提取信号的特征,但是计算量会增加,所耗费的时间也越长;当 α 和 l 减小时,虽然能够减小计算量,加快运算速度,但是有可能漏掉信号中有用的信息。

文中根据所采集电流数据去量纲化处理结果,通过多次试验选取长度为11点的曲线形结构元素对线路电流波形进行一层MMG变换。该结构元素在保持原始信号特征的同时,能够最大限度的消除毛刺形状的噪声。在进行电流信号特征提取时,能够最好地将信号特征提取出来并缩短计算所用时间。该结构元素为

$$g^+ = [1.000, 0.995, 0.980, 0.954, 0.917, 0.866, 0.800, 0.714, 0.600, 0.436, 0];$$

$$g^- = [0, 0.436, 0.600, 0.714, 0.800, 0.866, 0.917, 0.954, 0.980, 0.995, 1.000].$$

2 基于数学形态学的故障电弧诊断

2.1 故障电弧模拟实验

根据UL1699AFCI标准设计了故障电弧模拟实验装置,模拟不同负载情况下串联型故障电弧产生的过程。故障电弧发生装置示意图见图1,步进电机通过移动横向调节螺栓使动静触头发生分离,从而产生电弧,实验时电极开距约为0.3 mm。静触头由圆形铜杆制成,动触头由石墨电极构成,呈尖端形

状,便于起弧。

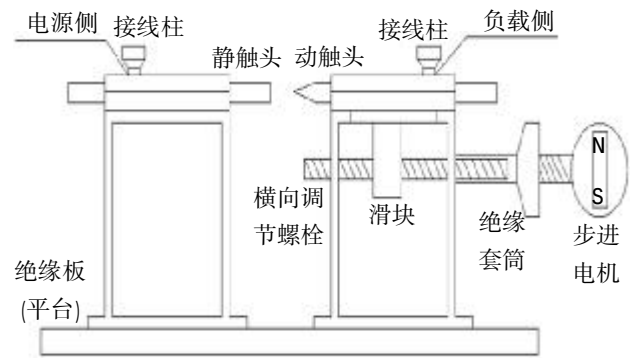
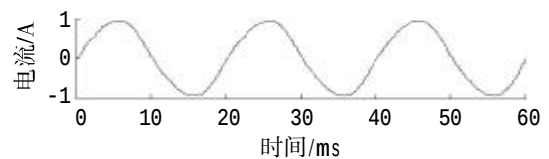


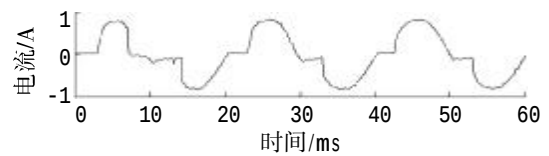
图1 故障电弧发生装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of arcing fault deviser

在实验过程中,线路两端所施加的电压为220 V,选择30 Ω 电阻和1 mH电感串联作为典型的线性负载;选择固态调压器、30 Ω 电阻和2 mH电感串联作为典型的非线性负载,通过选择不同的电阻值和调节固态调压器的导通角来采集不同情况下的串联故障电弧电流数据,将采集得到的数据经过归一化处理得到的结果见图2、3。图2为阻感性负载条件下的实验结果,在零时刻发生故障电弧;图3为固态调压器、电阻和电感串联条件下的非线性负载实验结果,在30 ms时刻发生故障电弧。



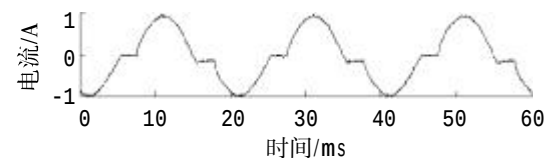
(a)正常工作电弧电流波形



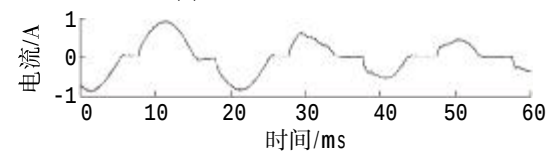
(b)故障电弧电流波形

图2 阻感性负载正常工作和故障电弧电流波形

Fig. 2 Resistance and inductive load current waveform of normal working and arc fault occurs



(a)正常工作电弧电流波形



(b)故障电弧电流波形

图3 固态调压器负载正常工作和故障电弧电流波形

Fig. 3 Solid-state regulator load current waveform of normal working and arc fault occurs

由图 2(a)可知,阻感性负载正常工作时负载电流波形近似于标准的正弦波。图 2(b)所示,当发生串联故障电弧时电流在过零点处会出现一段电流值为零的区域,即“零休”现象,同时伴有高次谐波的出现,电流波形发生明显畸变。

由图 3(a)可知,固态调压器负载正常工作时的电流波形与阻感性负载发生串联故障电弧时的电流波形相似即存在“零休”现象,在此情况下准确及时的判断出电弧故障比较困难。图 3(b)所示,当固态调压器负载发生电弧故障时,电流波形会发生严重畸变且有大量高次谐波的出现。

2.2 试验结果分析

在实际应用中,线路电流会随着负载的不同而发生变化,如果直接利用所采集的电流数据进行形态学分析,将得到的形态梯度值 ρ_m 作为故障电弧诊断判据,则 ρ_m 将与线路电流数值大小有关,不利于诊断阈值的确定。因此,在进行数学形态学变换前,首先对电流数据进行去量纲化处理,可表示为

$$k = \frac{i}{I_N} \quad (15)$$

式(15)中: i 为所测故障电弧电流; I_N 为线路额定工作电流最大值; k 为线路电流比值系数,能够反应线路电流变化规律的无量纲值。经过去量纲化处理后,可以消除由于负载发生变化对电流波形变化诊断所产生的影响。

应用数学形态学分析原理对经过处理后的数据进行多分辨率形态梯度分析,分别计算出正常工作时和故障电弧时的形态梯度值 ρ_m ,经过分析比较从而确定线路中的故障诊断阈值。正常工作时,线路或设备中的电流信号较为平稳,一旦发生故障或状态出现异常,线路中的电流波形会发生畸变,出现奇异点。数学形态学能够准确、快速地提取电流信号中奇异点所呈现的故障特征,所以形态学可以不受故障点发生位置和线路不同负载的影响,准确判断出线路中是否有故障发生。

2.2.1 阻感性负载试验

在阻感性负载试验中,分别选取 3 组不同的负载,试验线路正常工作时的电流额定值分别为 $I_{1N}=0.19\text{ A}$ (组 1)、 $I_{2N}=0.67\text{ A}$ (组 2)和 $I_{3N}=1.33\text{ A}$ (组 3),电流频率为 50 Hz 。根据形态学滤波原理,选取第 2 组故障电弧电流进行滤波处理,实验结果见图 4。图 4(a)为故障电弧发生时的电流波形,图 4(b)为经过形态学滤波处理后的波形。由图 4 可知经过形态学滤波后得到的电流波形在滤除噪声的同时能够保留故障电弧发生时的特征。

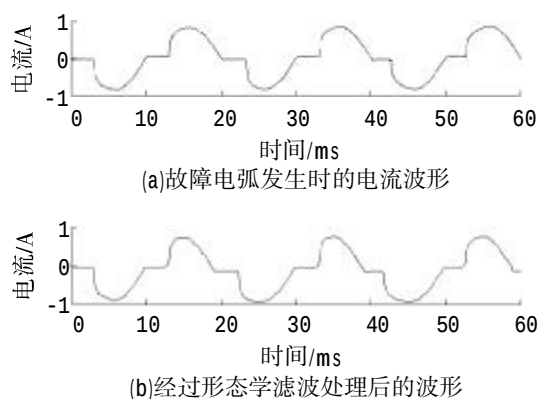


图 4 阻感性负载电弧电流形态滤波结果

Fig. 4 MM results for resistance and inductive load arc fault current

对所采集的电流波形数据进行去量纲化处理后,根据多分辨率形态梯度分析原理,分别从 3 组不同负载正常工作情况下和发生故障电弧情况下选取 3 个完整的电流周期进行多分辨率形态梯度运算,结果见图 5。图 5 中(a)、(b)、(c)上面为 3 组负载正常工作情况下的电流波形形态梯度值;图 5 中(a)、(b)、(c)下面为 3 组负载发生故障电弧时的电流波形形态梯度值。通过比较可以得出阻感性负载正常工作情况下和发生故障电弧情况下形态梯度值 ρ_m 的范围,结果见表 1。

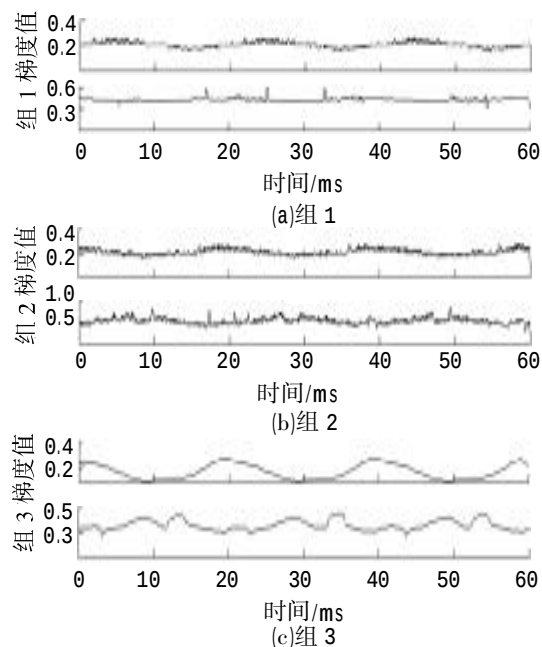


图 5 阻感性负载正常工作和故障电弧时的 ρ_m

Fig. 5 ρ_m of resistance and inductive load under normal working and arc fault occurs

由表 1 可知,阻感性负载正常工作时线路电流波形的形态梯度值 ρ_m 基本在 $0.1\sim 0.28$ 之间变化,且不会超过 0.3 ;发生故障电弧时线路电流波形的形态梯度值 ρ_m 在 $0.3\sim 0.8$ 之间变化,大于正常工作时的

表 1 阻感性负载电流波形的形态梯度值 ρ_m Table 1 ρ_m of resistance and inductive load current waveform

ρ_m	正常工作情况	故障电弧情况
ρ_1	0.15~0.25	0.30~0.60
ρ_2	0.10~0.20	0.50~0.80
ρ_3	0.17~0.28	0.30~0.40

电流波形形态梯度值。正常工作时,电流波形形态梯度值 ρ_m 基本在一定范围内稳定变化,不会出现明显的波动。而发生故障电弧时,由于电弧电流的“零休”现象以及电弧不稳定燃烧,使得电流波形发生严重畸变所以使得形态梯度值 ρ_m 明显增大。通过以上分析可以得出如下结论:对于阻感性负载,可以设定故障电弧的诊断阈值为 0.3。当测得的形态梯度值 ρ_m 大于 0.3 时则判定线路中产生了故障电弧。

2.2.2 固态调压器负载试验

在固态调压器负载试验中,分别选取 3 组不同大小的电阻负载与之串联,试验线路正常工作时的电流额定值分别为 $I_{1N}=0.6$ A(组 1)、 $I_{2N}=1.33$ A(组 2)和 $I_{3N}=3.2$ A(组 3),电流频率为 50 Hz。根据形态学滤波原理,选取第 2 组故障电弧电流进行滤波处理,其结果见图 6。图 6(a)为故障电弧发生时的波形,图 6(b)为经过滤波处理后的波形。

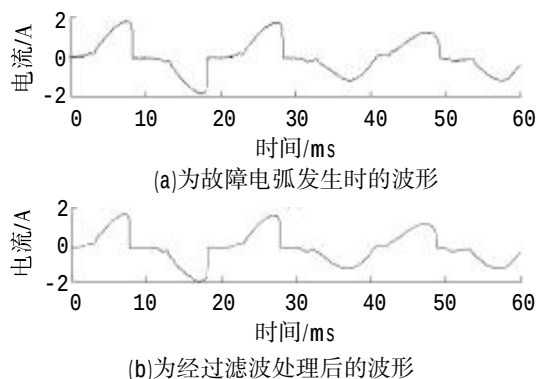


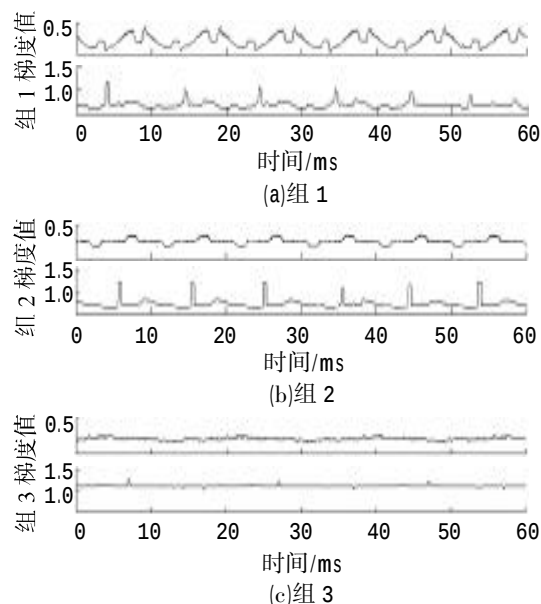
图 6 固态调压器负载电弧电流形态滤波结果

Fig. 6 MM results for solid-state regulator load arc fault current

对采集的电流波形数据进行处理后,分别从 3 组不同负载正常工作情况下和发生故障电弧情况下选取 6 个完整周期的电流波形进行多分辨率形态梯度运算,结果如图 7。

在图 7 中(a)、(b)、(c)上面为 3 组负载正常工作情况下的电流波形形态梯度值;图 7 中(a)、(b)、(c)下面为 3 组负载发生故障电弧时电流波形形态梯度值。通过对比可以得出固态调压器负载正常工作情况下和发生故障电弧情况下形态梯度值 ρ_m 的范围,结果见表 2。

由表 2 可以看出,固态调压器负载正常工作时

图 7 固态调压器负载正常和故障电弧时的 ρ_m Fig. 7 ρ_m of solid-state regulator load under normal working and arc fault occurs表 2 固态调压器负载电流波形的形态梯度值 ρ_m Table 2 ρ_m of solid-state regulator load current waveform

ρ_m	正常工作情况	故障电弧情况
ρ_1	0.10~0.40	1.00~1.40
ρ_2	0.10~0.30	1.00~1.30
ρ_3	0.15~0.25	0.80~1.20

线路电流波形的形态梯度值基本在 0.1~0.4 范围内变化,一般不会超过 0.5;发生故障电弧时线路电流波形的形态梯度值在 0.8~1.4 范围内变化,要大于正常工作时的形态梯度值。因此,可以将固态调压器负载下串联型故障电弧的诊断阈值确定为 0.8。当线路电流波形形态梯度值大于诊断阈值时,判定线路中产生了故障电弧。

实际应用过程中,为了防止由于负载的突然变化或其他因素可能导致形态梯度值 ρ_m 突然增加引起的误判,可以设定当形态梯度值 ρ_m 连续 3 个周期超过触发阈值时,即判定线路中产生了故障电弧。

3 结语

文中根据被保护线路或设备故障电弧电流波形典型特征,提出了利用数学形态学方法实现故障电弧的实时诊断方法。通过对线路电流采样数据进行去量纲化处理,消除了不同负载变化对故障诊断结果的影响;利用形态学开闭运算滤波器,可以滤除电流信号中的噪声干扰并且保留故障电弧的特征;运用多分辨率形态梯度运算可以获取线路电流比值系数形态梯度值,由于线路或设备在正常工作情况下和故障电弧情况下存在不同的形态梯度值,由此既可以诊断出线路或设备是否发生了电弧故障。

参考文献:

- [1] SHEA J J. Comparing 24 V to 120 V series arcing faults in residential wire[C]//Proceedings of 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008:27-29.
- [2] 蔡 彬,陈德桂,吴 锐,等.开关柜内部故障电弧的在线检测和保护装置[J]. 电工技术学报,2005,20(10):83-87.
CAI Bin, CHEN Degui, WU Rui, et al. Online detecting and protection system for internal faults arc in switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(10): 83-87.
- [3] 蔡 彬,陈德桂,李志鹏. 中压开关柜中内部电弧故障的仿真与实验[J]. 电工技术学报,2004,19(3):82-87.
CAI Bin, CHEN Degui, LI Zhipeng. Simulation and experiments on internal arcing faults in MV metal-clad switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(3): 82-87.
- [4] 蓝会立,张认成. 基于小波分析的故障电弧伴生弧声特征提取[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(4):57-62.
LAN Huili, ZHANG Rencheng. Study on the feature extraction of fault arc sound signal based on wavelet analysis[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities, 2008, 20(4): 57-62.
- [5] 张喜玲,杨慧霞,蒋冠前. 弧光保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(14):130-135.
ZHANG Xiling, YANG Huixia, JIANG Guanqian. Study on key technologies of electric arc protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 130-135.
- [6] 孙 鹏,董荣刚,郑志成. 基于小波分析信号特征频段能量变比的故障电弧诊断技术研究[J]. 高压电器,2010,46(7):46-50.
SUN Peng, DONG Ronggang, ZHENG Zhicheng. Arc fault diagnosis technology based on the analysis of energy variation of signal's characteristic frequency band with wavelet transform[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7): 46-50.
- [7] 刘晓明,赵 洋,曹云东,等. 基于小波变换的交流系统串联电弧故障诊断[J]. 电工技术学报,2014,29(1):10-17.
LIU Xiaoming, ZHAO Yang, CAO Yundong, et al. Series arc fault diagnosis based on wavelet transform in AC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 10-17.
- [8] 孙 鹏,郑志成,闫荣妮,等. 采用小波熵的串联型故障电弧检测方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(s1):232-236.
SUN Peng, ZHENG Zhicheng, YAN Rongni, et al. Detection method of arc fault in series with wavelet entropy[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(s1): 232-236.
- [9] WU Q H, ZHANG J F, ZHANG D J. Ultra-high-speed directional protection of transmission lines using mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1127-1133.
- [10] 欧阳森,王建华,陈德桂,等. 一种基于数学形态学的电能质量信号快速定位方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(19):25-29.
OUYANG Sen, WANG Jianhua, CHEN Degui, et al. A new fast disturbance location method based on mathematical morphology for power quality signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 25-29.
- [11] 邹 力,刘 沛,赵青春. 级联形态梯度变换及其在继电保护中的应用[J]. 中国电机工程学报,2004,24(12):117-122.
ZOU Li, LIU Pei, ZHAO Qingchun. Series multi-resolution morphological gradient and applications in protection relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 117-122.
- [12] 林湘宁,刘 沛,高 艳. 基于故障暂态和数学形态学的超高速线路方向保护[J]. 中国电机工程学报,2005,25(4):13-18.
LIN Xiangning, LIU Pei, GAO Yan. Ultra-high-speed line directional protection based on transient and mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 13-18.
- [13] SERRA J. Image analysis and mathematical morphology [M]. New York: Academic Press, 1982.
- [14] SERRA J. Image analysis and mathematical morphology [M]. New York: Academic Press, 1988.
- [15] 林湘宁,刘 沛,刘世明,等. 电力系统超高速保护的形态学—小波综合滤波算法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(9):19-24.
LIN Xiangning, LIU Pei, LIU Shiming, et al. A novel integrated morphology-wavelet filter algorithm used for ultra-high speed protection of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 19-24.
- [16] 束洪春,王 晶,陈学允. 动态电能质量扰动的多尺度形态学分析[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):63-67.
SHU Hongchun, WANG Jing, CHEN Xueyun. Multiscale morphology analysis of dynamic power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 63-67.
- [17] 王 楠,律方成,刘云鹏,等. 自适应广义形态滤波方法在介损在线监测数据处理中的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(2):161-165.
WANG Nan, LYU Fangcheng, LIU Yunpeng, et al. Study on application of adaptive generalized morphological filter in processing on-line monitoring tan δ data[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 161-165.
- [18] SUN P, ZHANG J F, ZHANG D J, et al. Morphological identification of transformer magnetising inrush current[J]. Electronics Letters, 2002, 38(9): 437-438.

刘振国(1988—),男,硕士研究生,研究方向为智能化电器、电网。

孙 鹏(1958—),男,博士,教授,研究方向为电器理论与设计、继电保护、智能电器等。

由广祥(1988—),男,本科,研究方向为电力系统继电保护。