

基于 Canberra 距离的串联电弧故障诊断方法

占友雄, 张认成, 杨建红, 杨凯

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为进一步降低低压电弧故障的误识率, 针对串联电弧故障, 提出一种基于脉冲信号变换的 Canberra 距离诊断方法。将负载电流转变为脉冲波, 随机电弧故障表现出脉冲波的非周期波动。通过脉冲宽度的时间序列数值差分提取电弧故障的随机特征, 构造出基于差分序列统计特性的故障特征向量。特征向量点值图呈现出明显的聚类特征。根据特征向量的 Canberra 距离分析结果与脉宽特征, 给出电弧故障误识别问题的解决方法, 确定了电弧故障的诊断算法。参考 UL1699 的电弧故障仿真试验和实际样机测试结果验证了该方法的可行性和较高的可靠性。

关键词: 电弧故障; 脉冲宽度; 数值差分; Canberra 距离; 故障诊断

Series arcing fault diagnosis based on Canberra distance

ZHAN You-xiong, ZHANG Ren-cheng, YANG Jian-hong, YANG Kai

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Aiming at reducing the error recognition rate of low-voltage arcing fault, based on signal conversion, this paper develops a novel detecting algorithm for series arcing fault diagnosis. Via hysteresis comparator, the load current is converted to pulse signal, creating a time series of pulse width. The unpredictable fault current makes the time series fluctuate aperiodicity, thus, after a proper difference processing, the arc-fault signal is extracted from the time series, which results in a fabulous clustering distribution character in the statistical point value figure. The feature vectors are constructed. Based on the different Canberra distance of steady current and fault current, an arcing fault diagnosis algorithm with pattern recognition of pulse-width fluctuation is confirmed. Solutions of false recognition problem of AFCI are also discussed. The prototype of AFDD has been developed after results of algorithm simulation became desirable. Testing results show that this algorithm can be applied to online arcing fault detection with high feasibility and reliability.

Key words: arcing fault; pulse width; numerical difference; Canberra distance; fault diagnosis

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)12-0030-07

0 引言

电弧故障是建筑配电系统普遍存在的问题, 系统在电线绝缘老化破损或电气触点接触不良时, 常会发生电弧故障。由于负载阻抗的存在, 电弧故障电流通常小于短路电流, 使传统过流保护器不能及时断开电路^[1-2], 给予电弧充分的时间积聚能量引燃故障位置的可燃物质从而引发火灾^[3]。电气线路产生的故障电弧已成为居民建筑电气火灾的主要原因之一^[4]。

电弧故障分为串联型电弧、并联型电弧和接地型电弧^[5], 后两者的特征分别类似于过流和接地故障, 故其故障识别较为容易^[6]。由于串联电弧故障信号易被负载电流所湮没, 故障波形受负载的影响, 这给故障的准确识别造成了很大困难^[7]。事实上, 研究发现在安装了 AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter) 产品的居民住宅中, 电弧性电气火灾仍有发生^[8]。Joseph 发现包括 Combination AFCI 在内的几种类型的 AFCI 试验样品, 在测试中均不能对串联电弧故障做出有效的动作, AFCI 产品误动作也成为是一个很严重的问题^[8-9]。

电弧故障电流信号一般表现为随机性的幅值波动、高频毛刺以及电流短时为零等特征^[10]。根据这些特征已被研究的诊断方法包括基于傅里叶

基金项目: 福建省高校产学研合作科技计划重大项目 (2012H6013); 福建省自然科学基金 (2012J01214); 华侨大学国家自然科学基金培育计划资助项目 (JB-ZR1102)

分析的高频特征谐波检测法^[11-12]、通过小波提取电弧故障特征的时频分析法^[13-15]、以及基于自回归模型参数的识别方法^[16]。由于已有的电弧模型涉及到多种不易获取的物理参数^[17], 因而不适用于工程应用中的电弧故障识别。目前电弧故障的检测尚不能很好地解决误识及漏识问题, 相关的诊断方法仍需要不断的完善和改进。

论文从实际研制电弧故障检测装置的角度, 探索了一种新的串联电弧故障识别方法。通过将负载电流转换为脉冲信号, 使得故障信号的非周期随机特性集中体现在脉冲宽度的随机变化中, 利用时间序列差分法分离电弧故障信号成分, 利用其统计量构造出故障特征向量, 确定了基于归一化 Camberra 距离的电弧故障诊断算法。算法滤除了周期电弧的干扰, 实现了对负载的正常非周期电流的识别, 并一定程度上解决了由于负载的正常操作电弧或启动电流导致的误识别问题。

1 电弧故障特征研究

1.1 故障电流特征

实验研究的不同功率负载如表 1 所示。

表 1 实验负载

Table 1 Experimental load samples

负载	A	B	C
额定输入功率	1 015 W	2 170 W	2 800 W
额定电压/频率	220 V/50 Hz	220 V/50 Hz	220 V/50 Hz

参考 UL1699 标准搭建电弧故障实验平台, 用 USB-1208FS 数据采集卡以 20 kHz/s 的频率采集电流互感器的输出信号, 得到各负载的电流波形如图 1 所示。

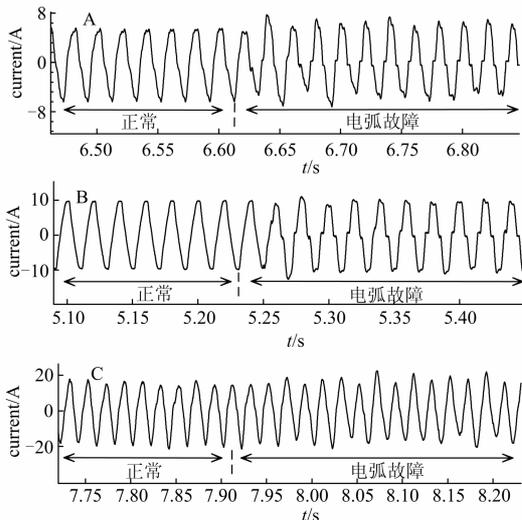


图 1 不同功率的负载发生电弧故障前后的电流波形

Fig. 1 Steady current and arcing fault current of different load

可见三种试验负载故障特征为: 负载 A: 电流出现明显的“零休”现象以及电流变化率突增、幅值不对称、波形失去周期性、出现高频毛刺等; 负载 B: 电流“平肩”、过零点后的电流变化率突增、电流幅值不稳定; 负载 C: 电流波形仅表现为幅值的非对称、不稳定随机波动。

图 1 表明, 随着额定输入功率的提高, 负载的电弧故障电流趋于连续^[18], 以至于不存在“零休”, 仅表现为幅值的不稳定波动, 这种情况下故障信号中便不再含有明显的高频成分, 传统的高次谐波检测法在这种情况下不再适用。图 1 说明不同功率的负载电弧故障时的共同特征是非周期随机突变性。

1.2 脉冲信号特征

图 2 为一段整流后的串联电弧故障波形(局部放大)及其整形后的脉冲波形, 可见电弧故障时电流的零休时间及过零点后电流上升率的变化, 使得电流曲线滞留在阈值线 TH 和 TL 内的时间发生变化, 因而输出了不同宽度的电平脉冲。由于小电流电弧故障不做考虑^[19], 比较器的阈值设置原则是对 3 A 以下负载电流不做识别。图 2 表明, 电弧的“零休”、“高频成分”、“幅值波动”等非周期特征被集中转换为脉冲波宽度的随机变化, 电弧故障可通过捕捉脉冲来进行诊断识别。

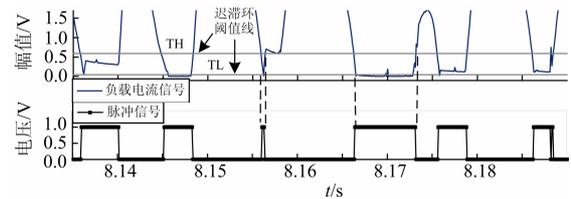


图 2 电弧故障电流波形的脉冲信号输出

Fig. 2 Pulse signal transformed from arcing fault current

2 电弧故障特征的提取

2.1 故障信号的分离

由于电弧故障表现为脉冲时间宽度的非周期变化, 通过对脉宽时间序列进行一阶滞后差分, 滤除原信号中的工频周期成分, 可得到电弧故障的非周期随机扰动信号。故障信号的分离过程如下:

(1) 捕捉经过信号变换后得到的脉冲信号中每个脉冲持续时间, 将得到的一系列脉宽数据记为时间序列 $\{x_t\} (t=1, 2, \dots, N)$;

(2) 对脉宽时间序列 $\{x_t\}$ 进行一次滞后差分, 求得差分序列 $\{\nabla x_t\}$, 其中

$$\nabla x_t = x_t - x_{t-2} \quad (t=3, 4, \dots, N) \quad (1)$$

根据上述数据处理步骤, 实验负载的电弧故障

信号的分离过程如图 3 所示。可见脉宽时间序列经过差分滤波后,很好地剔除了脉冲波脉宽信号中对应负载正常工作时间段的周期趋势项,而电弧故障时间段的随机非周期成分则被保留下来。

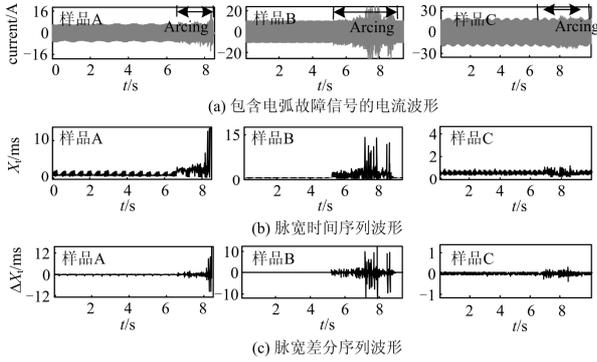


图 3 电弧故障信号的分离

Fig. 3 Separation of arcing fault signal

2.2 脉宽差分数据的统计分析

将脉宽差分序列记为 $\{\nabla x_i\}$, 对序列 $\{\nabla x_i\}$ 进行如下数据处理:

(1) 将序列 $\{\nabla x_i\}$ 分为均匀的若干段(设为 l 段), 每段长度为 N , 记第 i 段序列为

$$\nabla x_i^{(l)} (i=1, 2, \dots, l; t_i = (i-1) \cdot N + 1, \dots, (i-1) \cdot N + N)$$

(2) 求各段序列 $\nabla x_i^{(l)}$ 的一阶统计特性为

$$\mu_i = E\{\nabla x_i^{(l)}\} = \frac{1}{N} \sum_{t_i=(i-1) \cdot N + 1}^{(i-1) \cdot N + N} |\nabla x_i^{(l)}| \quad (2)$$

(3) 求各段序列 $\nabla x_i^{(l)}$ 的二阶统计特性为

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{t_i=(i-1) \cdot N + 1}^{(i-1) \cdot N + N} E\{(|\nabla x_i^{(l)}| - \mu_i)^2\} \quad (3)$$

(4) 以 μ_i 为横轴、以 σ_i^2 为纵轴绘出数据统计特性点值图。

对表 1 中的三种负载的脉宽差分序列进行统计分析, 得到的统计特性点值图如图 4 所示。

图 4 表明, 一般负载在正常工作时, 其对应的信号统计特征点始终相对集中地出现在原点附近时, 而电弧故障时, 相应的统计特性点则随机地散布于远离原点位置, 反映出了负载处于不稳定的运行状态。对于点值图中的点分布情况, 可用向量距离测度方法区分出“电弧故障”与“正常工作”的个体差异, 进而得到电弧故障的识别依据。

3 电弧故障诊断

3.1 Camberra 距离测度

设向量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 的距离为 $d(x, y)$, camberra 距离定义为

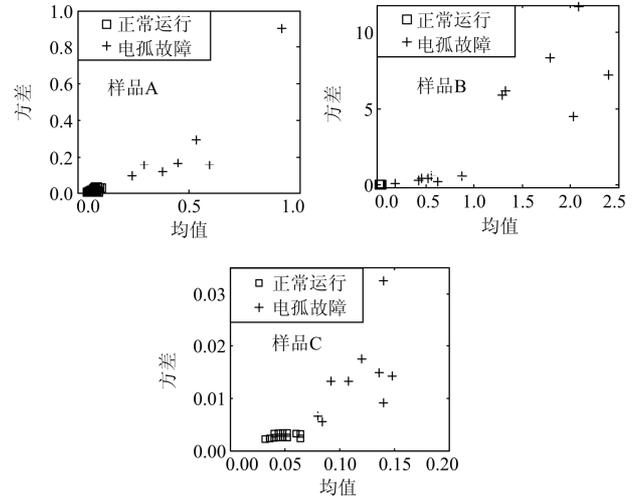


图 4 脉宽差分序列的统计量点值图

Fig. 4 Point value figures generated by the statistical analysis of differential sequence of pulse width

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i + y_i} \right| \quad (4)$$

式(4)定义的 Camberra 距离考虑元素误差占本身的比重, 做了自身的无量纲化, 适合图 4 点值图中各点所属个体的相似度的评价。用脉宽差分序列的统计量构造电弧故障特征向量, 记为

$$X_i = (\mu_{|\nabla x_i^{(l)}|}, \sigma_{\nabla x_i^{(l)}}^2) = (\mu_i, \sigma_i^2) \quad (5)$$

则根据式(4)计算图 4 中相邻特征向量 X_i 、 X_{i+1} 的 camberra 距离表达式为

$$d(X_{i+1}, X_i) = \left| \frac{\mu_{i+1} - \mu_i}{\mu_{i+1} + \mu_i} \right| + \left| \frac{\sigma_{i+1}^2 - \sigma_i^2}{\sigma_{i+1}^2 + \sigma_i^2} \right| \quad (6)$$

显然, 这个 Camberra 距离的值域为(0,2)。

3.2 电弧故障的识别

根据式(6)对图 4 所示的点值图进行 Camberra 距离计算, 数据统计段取为 0.1 s 的测试结果表明, 负载稳定工作时, 各点间的距离一般小于 0.5, 当负载出现电弧故障时, 故障点与正常点的距离则大于上述值, 电弧故障越剧烈, 故障点到正常点的 Camberra 距离则越大。为了持续跟踪 Camberra 距离的变化, 需要确定一个参考坐标(作为正常工作状态的特征向量), 选择 $d(X_{i+1}, X_i)$ 小于 0.5 时, 令 $v=i$, 得到正常工作模式特征向量参考坐标

$$V = (\mu_v, \sigma_v^2) \quad (7)$$

识别电弧故障 Camberra 距离表达式为

$$d(X_i, X_v) = \left| \frac{\mu_i - \mu_v}{\mu_i + \mu_v} \right| + \left| \frac{\sigma_i^2 - \sigma_v^2}{\sigma_i^2 + \sigma_v^2} \right| \quad (8)$$

当 $\mu_i \gg \mu_v$ 且 $\sigma_i^2 \gg \sigma_v^2$ 时, $d(X_i, X_v)$ 取得最大值,

$$d(X_i, X_v)_{\max} = \left| \frac{\mu_i}{\mu_i + \mu_v} - 0 \right| + \left| \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \sigma_v^2} - 0 \right| \approx 1 + 1 = 2 \quad (9)$$

图 4 各点值图不同点的识别结果如图 5 所示, 由于是每 0.2 s 对接收到的脉宽数据计算一次 Camberra 距离, 因而图 5(b) 比相应电流波形中看到的故障时间有所滞后。对比图 5(a)、图 5(b) 可知, 在负载正常工作时间段, 其特征向量的 Camberra 距离在区间(0,0.5)内波动, 而发生电弧故障时段, 这个值基本在(0.8,2)区间内波动。换言之, Camberra 距离越小, 负载的运行状态就越稳定, 反

之则说明负载越不稳定, 故障的可能性就越大。利用 Camberra 距离, 仅仅用一个区间(0,2)即可表示出任意不同功率负载运行状态的稳定程度。

根据图 5 故障时与正常时的 Camberra 距离分布区间, 用 CD 表示 Camberra 距离, 电弧故障信号的识别结果可表示为

$$D(i) = \begin{cases} 1 & \text{arc fault alarm} & \text{if } CD \geq 1 \\ \times & \text{reject state} & \text{if } 0.5 < CD < 1 \\ 0 & \text{none arc fault} & \text{if } CD \leq 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

其中: (0.5,1)区间是为了提高算法的抗干扰能力而设置的拒识区; reject state 表示无识别结果输出。

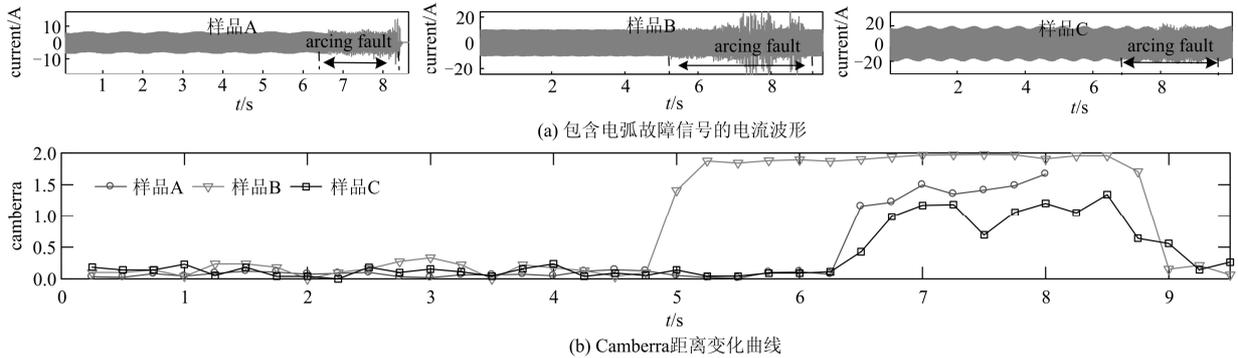


图 5 电弧故障信号的识别

Fig. 5 Identification of arcing fault

3.3 非周期干扰信号的排除

空调或吸尘器的启停、开关电源的工作电流, 都带有疑似故障的非周期性波动特点, 往往使 AFCI 误动作。对空调启动过程的测试表明, 启动电流的非周期波动持续时间一般较短, 通过 0.5 s 内多次确认故障信号的方法, 可有效排除正常启动的干扰信号; 而对于开关电源的非周期高频信号, 比较器的迟滞电压可以很大程度上消除其干扰影响。

空调启动时的电流波形如图 6 所示, 可以看到, 负载启动后出现了一段约 0.15 s 的不稳定信号, 导致该区间内的 Camberra 距离超出了阈值。图 6 的指导意义是: 应在负载启动时滤除掉第一个可能出现的干扰信号, 进一步降低误识率; 通过监测脉冲的时间宽度是否超出工频周期时间, 可识别出单一负载的启停过程。

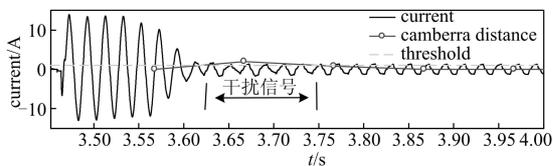


图 6 空调机启动信号

Fig. 6 Starting current of air condition compressor

3.4 诊断算法

综合前文分析, 电弧故障诊断算法原理可归结为图 7 所示的状态转移图。

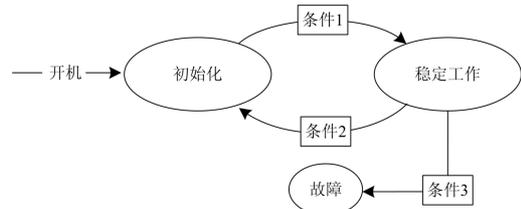


图 7 诊断算法的状态转移图

Fig. 7 State-transferring diagram of the diagnosis algorithm

其中, “初始化” 对应负载的切换工作模式后的初始状态。状态转移条件如下:

条件 1: 初始化已完成;

条件 2: 检测到负载工作状态的切换;

条件 3: 0.5 s 内检测到至少 2 个故障信号。

其中初始化为为了对负载工作状态的切换过程进行缓冲过渡, 目的是消除这个过程可能引起的算法误识别, 其操作包括滤除状态切换干扰信号并更新模式参考坐标; 条件 2 中负载工作状态的切换可指负载的启停过程或者并入了新的负载工作, 根据

脉宽均值的变化情况可监测负载电流的变化, 单个负载的启停可根据捕获到脉宽的大小是否超出工频周期来识别。

对于串联电弧故障, UL1699 根据负载电流的大小, 对不同额定电流的 AFCI 做了相应的电弧断开时间要求^[19], 算法中计算 Camberra 距离的时间序列统计长度 N 参考该表的最小分断时间取为 10(0.1 s)。

4 仿真实验

验证算法的实用性可参考 UL1699 关于串联电弧故障检测的试验项目^[19]进行仿真, 包括不同功率负载的电弧故障测试, 以及启动电流和正常操作电弧测试。表 2 为试验所选用的负载, 其额定电压/频率均为 220 V/50 Hz。在图 8 所示的实验平台采集试验数据, 进行算法仿真, 结果如图 9 所示。

表 2 试验负载

Table 2 Testing load samples

负载	手电钻	卤素灯	空压机	吸尘器	调光灯	开关电源
额定功率	850 W	360 W	2 200 W	1 100 W	1 000 W	400 W

图 9(a)中, 吸尘器、调光灯发生电弧故障后, 断开时间分别约为 0.15 s 和 0.25 s, 在加了开关电源屏蔽负载后, 卤素灯的电弧故障断开时间约为 0.35 s, 参照 UL1699 中 5 A 的串联电弧的断开时间(1 s)^[19], 上述负载电流水平(≤ 5 A)下的电弧断开时间仿真结果符合标准要求。负载的启动电流试验如图 9(b)所示, 可以看到空压机启动出现不稳定电流的时段, 相应的 Camberra 距离值超出了阈值, 由于算法对这个启动过程进行了缓冲, 屏蔽了切换状态后的干扰信号, 从而避免了这个启动过可能出现的算法误识别现象。图 9(c)中一段 30 s 的手电钻正常启停操作过程表明, 同样由于对负载工作状态切换信号的过渡, 算法没有误识别手电钻的正常操作电弧。



图 8 电弧故障实验负载及实验平台

Fig. 8 Platform and load samples of arcing faults experiment

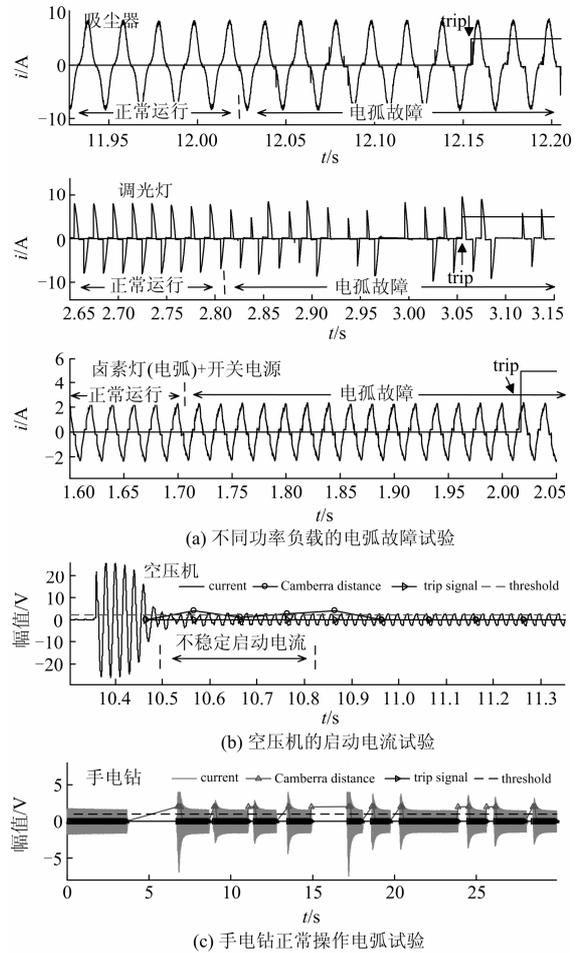


图 9 诊断算法的仿真测试

Fig. 9 Simulation of arcing faults diagnosis algorithm

5 讨论

从实际应用角度上, 一般的 MCU 都具备捕获脉冲的功能, 参考本文算法, 只需结合很少的外围电路就可使 MCU 实现电弧故障的检测。本文设计的电弧故障检测装置如图 10 所示, 其可行性在图 8 所示的实验平台上得到了验证。由于硬件实现简单, 其电路板大小仅为 $5.5 \times 4.0 \text{ cm}^2$ 。与直接分析电流信号的传统方法需要进行大量运算不同, Camberra 距离诊断算法对脉冲宽度进行的数据分析运算量小, 具有很好的实时性。同时值得注意的是, 由负载电流信号整形出的脉冲信号, 其脉宽与电流大小成反比关系, 通过事先的标定, 有望使改进的算法具有识别负载过流、短路的功能。更进一步, 结合脉宽时间及其差分数据分析, 还可对 75 A 以上的故障电流进行区分, 即根据故障电流的周期性识别出短路故障和并联电弧故障。



图 10 基于本文方法设计的电弧故障检测装置

Fig. 10 Prototype of AFDD based on this paper

6 结语

本文通过信号变换, 将串联电弧故障电流的幅值、零休、电流变化率等方面的随机变化特征集中转化为脉冲波脉宽的非周期变化, 通过对脉宽时间序列进行差分, 滤除周期成分, 得到电弧故障的非周期波动数据, 构造出以脉宽差分数据的低阶统计量构成的特征向量。利用距离测度方法, 实现了不同负载特性向量距离的归一化, 得到了一个表征负载运行状态的 Camberra 距离分布区间(0,2), 进而确定出基于 Camberra 距离的串联电弧故障识别判据。测试结果表明本文方法可应用于不同负载的串联电弧故障检测。基于电流的脉冲宽度与负载电流幅值的对应关系, 实现了负载启停及工作模式切换过程的识别, 降低了算法的误识率, 可为现有 AFCI 的误识别问题的处理提供参考。

参考文献

- [1] PARISE G, PARISE L. Unprotected faults of electrical cords and extension cords in AC and DC systems[C] // Industrial & Commercial Power Systems Technical Conf (I & CPS), 2013 IEEE/IAS 49th, Stone Mountain, GA, April 30 May 3, 2013: 1-6.
- [2] 任龙霞, 吴为麟. 虚拟仪器在低压电弧故障断路器研制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 134-138.
REN Long-xia, WU Wei-lin. Application of LabVIEW in the development of arc fault circuit interrupters (AFCI)[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 134-138.
- [3] GREGORY G D, WONG K, DVORAK R. More about arc-fault circuit interrupters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2004, 40(4): 1006-1011.
- [4] 孙晶, 姜国伟. 电气火灾成因与预防措施简析[J]. 黑龙江科技信息, 2013(12): 2.
SUN Jing, JIANG Guo-wei. The causes of fire and preventive measures analysis[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2013(12): 2.
- [5] 陈奎, 程天华, 彭伟光, 等. 馈电开关用电弧性单相接地保护方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 107-111.
CHEN Kui, CHENG Tian-hua, PENG Wei-guang, et al. Research of arc single-phase earth protection for feed switch protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 107-111.
- [6] 李夏河. 低压串联电弧故障检测方法的研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2012.
LI Xia-he. A study of detecting method of low-voltage series arcing fault[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2012.
- [7] WAFER J A. The evolution of arc fault circuit interrupters[C] // Proceedings of the 51st IEEE Holm Conference, Sept 26-28, 2005: 156-161.
- [8] ENGEL J C. Combination AFCIs: what they will and will not do[C] // Electrical Safety Workshop (ESW), 2012 IEEE IAS, Daytona Beach, FL, Jan 31-Feb 3, 2012: 1-18.
- [9] MARTEL J M, ANHEUSER M, BERGER F. A study of arcing fault in the low-voltage electrical installation[C] // 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference, Charleston, SC, Oct 4-7, 2010: 1-11.
- [10] YAN Xiang-lian, CHEN Wei-jiang, WANG Cheng-yu. Dynamic characters research of air arc at low current in long gap low current in long gap[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 165-171.
- [11] ZHANG Rui-xiang, SONG Zheng-xiang. Arc fault detection method based on signal energy distribution in frequency band[C] // Power and Energy Engineering Conference, 2012 Asia-Pacific, Shanghai, March 27-29, 2012: 1-4.
- [12] LEE W J, SAHNI M, METHAPRAYOON K A, et al. A novel approach for arcing fault detection for medium-low-voltage switchgear[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2009, 45(4): 1475-1843
- [13] LIU Xiao-ming, LIU Xiang-ning, HOU Chun-guang, et al. Arc fault diagnosis and analysis based on wavelet neural network[C] // Electric Power Equipment-Switching

- Technology (CEST-ST), 2011 1st International Conference, Xi'an, Oct 23-27, 2011: 187-190.
- [14] LI Dong-wei, SONG Zheng-xiang, WANG Jian-hua, et al. A method for residential series arc fault detection and identification[C] // Electrical Contacts, 2009 Proceedings of the 55th IEEE Holm Conference, Vancouver, Canada, Sept 14-16, 2009: 8-14.
- [15] 范李平, 袁兆强, 张凯. 基于小波变换的单相接地故障电弧模型及其PSCAD/EMTDC仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 51-56.
- FAN Li-ping, YUAN Zhao-qiang, ZHANG Kai. Simulation on arc model of single phase earth fault and PSCAD/EMTDC based on wavelet transformation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 51-56.
- [16] 雍静, 桂小智, 牛亮亮, 等. 基于自回归参数模型的低压系统串联电弧故障识别[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 213-219.
- YONG Jing, GUI Xiao-zhi, NIU Liang-liang, et al. Series arc fault identification in low voltage system based on autoregressive parameter model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 213-219.
- [17] 戴隽文, 郝瑞祥, 游小杰. 一种用于大功率电弧加热器的等离子电弧模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 129-134.
- DAI Jun-wen, HAO Rui-xiang, YOU Xiao-jie. A plasma arc model used in high power arc heater[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 129-134.
- [18] CARVOU E, BEN JEMAA N, TIAN S, et al. electrical arc characterization for AC-arc fault applications[C] // Electrical Contacts, 2009 Proceedings of the 55th IEEE Holm Conference, Vancouver, Sept 14-16, 2009: 22-27.
- [19] Underwriters Laboratories Inc. UL standard for safety for arc-fault circuit-interrupters UL1699[S]. 2011.
-
- 收稿日期: 2013-08-22; 修回日期: 2013-10-29
- 作者简介:
- 占友雄(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为低压电弧故障诊断技术及其硬件实现; E-mail: usion@foxmail.com
- 张认成(1962-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为机电系统状态监测与安全保障技术, 现代检测技术。
- 杨建红(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电气火灾预警技术, 工程机械液压智能控制。