

一种低压电弧故障检测的新方法^①

段培永, 周 夫, 段晨旭, 石嘉川

(山东建筑大学 信息与电气工程学院, 济南 250101)

(山东省智能建筑技术重点实验室, 济南 250101)

摘 要: 利用二进小波变换法分解低压配电线路电弧故障时的电流波形, 获得电流波形各尺度小波变换的高频系数. 电弧故障时的电流波形小波变换高频系数与负载正常启动和运行状态时相比, 有其明显的特征, 可有效地应用于电弧故障检测. 利用 LabVIEW 和 MATLAB 软件平台实现了电流在线采集和分析, 实验结果表明该方法能准确地辨识低压配电线路中的电弧故障.

关键词: 故障电弧; 小波变换; LabVIEW; MATLAB; AFCI

A Novel Detection Method for Low Voltage Arcing Fault

DUAN Pei-Yong, ZHOU Fu, DUAN Chen-Xu, SHI Jia-Chuan

(School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

(Shandong Key Laboratory of Intelligent Building Technology, Jinan 250101, China)

Abstract: Current of arcing fault in the low-voltage distribution lines is decomposed by dyadic wavelet transform in this paper, and each scale high-frequency coefficients of wavelet transform of the current waveform are gotten. Compared with the load normal starting and running state, the high-frequency coefficients have obvious characteristic when the arcing fault occurs. Effectively, the characteristic can be applied to the arcing fault detector. Based on the method, current is collected online and analysed by LabVIEW and MATLAB software platform. The result of experiment shows that the method can accurately identify the arc fault on low-voltage distribution lines.

Key words: arc fault; wavelet transform; LabVIEW; MATLAB; AFCI

建筑低压电气线路中会因电路短路、电线老化、接触不良、电器产品故障等原因而在线路中产生故障电弧现象. 电弧是一种气体放电现象, 电流通过某些绝缘介质(例如空气)所产生的瞬间火花. 据测 2~10A 的电弧电流就可以产生 2000~4000℃ 的局部高温, 进而引发电气火灾事故. 传统的电路故障保护装置只能针对漏电流、过电流和短路电流等提供保护, 不能可靠地检测和保护电弧故障. 因此, 对电弧故障的检测方法进行深入研究, 对于改进电路故障保护装置, 有效预防电气火灾事故, 具有重要的意义.

电气线路中发生故障电弧时, 现场会有明显的弧声、弧光和发热等物理现象. 但由于线路中发生故障电弧的位置具有随机性, 利用这些物理现象实现故障电弧

检测的方法, 在实际推广应用中的局限性较大, 一般适用于开关柜、配电箱等场合^[1]. 另一类是基于电流波形时域或频域特征的故障电弧检测方法, 一般仅能够区分电路电弧故障状态和额定运行状态^[2-5]. 事实上, 开关闭合和某些电器的启动时的电流波形也存在故障电弧发生时的部分特征, 上述方法难以做出快速而准确的判断. 本文提出一种基于二进小波变换的多尺度小波分解算法, 辨识电路中的电弧故障, 并利用 LabVIEW 和 MATLAB 软件平台实现在线电弧故障检测.

1 故障电弧的电流波形特征

如果将故障电弧看作是电网网络中一种元件, 则它是一种随时间变化的非线性欧姆组件, 正是这种特

^① 基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2009G004)

收稿时间: 2013-03-08; 收到修改稿时间: 2013-04-12

性使其电流波形存在以下特征^[6]:

1) 每半个周期都存在电流接近为零的区域, 称为“平肩部”, 电弧故障波形如图 1 所示. 这是由于电弧在电流过零前后存在一个熄灭和重燃的过程, 但“平肩部”的宽度是随机的;

2) 由于“平肩部”的存在, 使得电流每半个周期都有突变, 且突变也是随机的;

3) 有些波形甚至会缺失半个周波;

4) 故障电弧波形顶峰存在高频谐波.

除了以上特征, 电弧的发生通常还具有间歇性和随机性.

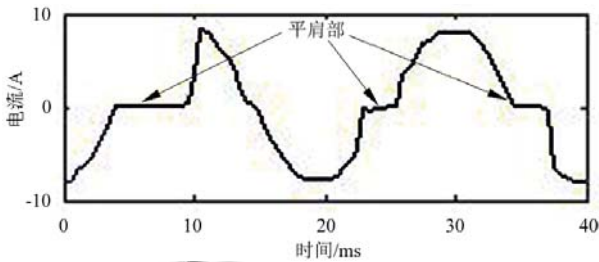


图 1 电弧故障波形图

故障电弧检测的难点不仅在于其随机性, 还需要区别一些特殊负荷以及插拔电器等操作产生的类似电弧信号. 特殊负荷包括日光灯、吸尘器、压缩机、风扇等, 它们的电流特征与故障电弧电流特征非常相似, 利用时域或频域方法都难以准确地将它们区分.

2 电弧故障检测原理与方法

2.1 电弧故障检测原理

电弧故障电流波形与正常电路电流波形相比, 最明显的特征是存在随机的平肩部和突变. 小波变换是以短时傅里叶变换为基础发展而来的, 时频窗口可改变的时频局部化分析方法. 它的时频窗口大小随着分析频率的变化而变化, 能对信号进行多尺度的细化分析, 对信号具有自适应性. 另外, 二进小波变换还具有另一个重要的特性——平移不变性: 在平移量 b 等于奇异点位置时, 小波变换系数的值可达到其上界. 因此, 可选择一合适的光滑小波作为基波, 对电流信号进行二进小波变换, 检测电流波形中的平肩部和突变特征.

二进小波变换是对连续小波变换的尺度参数 a 进行二进离散(取 $a=2^{-j}, j \in \mathbb{Z}$), 而平移参数 b 保持连续变化的一种变形, 二进小波变换公式如下:

$$W_{\phi_j} f(b) = \int f(x) \overline{\phi_{j,b}}(x) dx \quad (1)$$

结合小波变换多分辨率分析的概念, 将电流信号在 V, W 空间上逐级二分解为两个分量之和, 分解过程如图 2 所示.

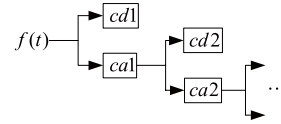


图 2 小波分解过程示意图

基于二进小波的分解算法公式如下:

$$\begin{cases} a_j(n) = a_{(j-1)} * h^{(j-1)}(n) \\ d_j(n) = a_{(j-1)} * g^{(j-1)}(n) \end{cases} \quad (2)$$

其中 a_j 为原始信号的逼近信号, d_j 为细节信号, 即不同尺度下分解出来的信号高频部分. d_j 中包含着信号波形的主要特征, 所以对电流波形特征的提取就变成了对 d_j 信号的分析, 本文即是通过电流波形不同尺度细节信号的重构和对比实现电弧故障点的判断.

为便于算法的软件实现, 用 Mallat 快速算法实现对电流信号的二进小波分解, 则:

$$d_j(n) = WT_f(2^j, n) \quad (3)$$

其中 $j=1 \dots \dots$ 为二进栅格上各点的小波变换.

2.2 电弧故障检测方法

低压配电线路中的故障电弧电流波形与负载类型有密切关系, 但都存在前文中所列的特征. 辨识电弧故障不仅要避免其他电路中的谐波干扰, 还要准确地区分负载启动, 正常运行和电弧故障状态^[7,8].

由于采集的电流信号中常含有白噪声和脉冲噪声, 为了避免这些噪声对电弧故障检测的干扰, 在对电流进行小波变换前还需要对电流波形进行小波滤波处理, 图 3 是对阻性负载电流波形基于 db4 小波滤波前后的对比图.

对比图 3 中滤波前后的电流波形图可以看出: 滤波后的波形图消除了原来波形中存在的毛刺和小的突起, 使波形变得更平滑, 但仍能保持故障电弧信号中原有的特征.

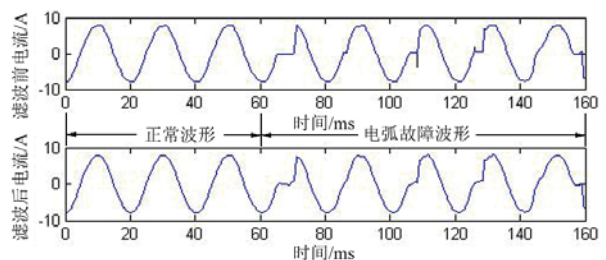


图 3 阻性负载电弧故障电流及其滤波

以下仍以 db4 小波作为基波^[9], 对滤波后的阻性负载电流波形进行二进小波分解. 图 4 是对滤波后的电流波形进行三尺度分解后, 各尺度高频部分重构的结果. 对比图 4 和图 3 可看出: 重构的第 2 尺度的小波细节部分准确地反应了故障电弧电流的局部特征, 包括突变点和持续时间, 用于判断故障电弧效果最佳.

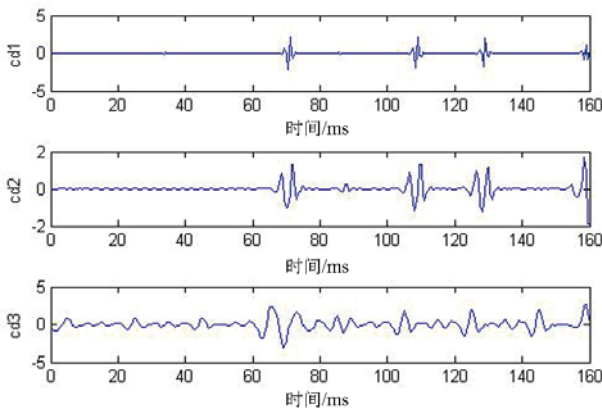


图 4 阻性负载电流小波分解图

但是当负载启动时, 电流波形也含有与故障电弧波形相同的特征, 图 5 所示是对阻性负载启动时的电流波形分析结果. 美国 UL1699 标准提出, 在 AC 电路中每 0.5s 内检测出 8 个半周波的突变信号认为是发生电弧故障. 参考 UL1699 标准, 在此引入 M 值的定义: 把每半个周波电流(即每个 10ms)的 cd2 的绝对值求平均值. 本文将 0.5s 内 M 值大于规定值的次数作为电弧故障发生的判断标准, 图 6 是对图 3 中的电流波形求取 M 值的结果. 基于 M 值的判断标准与文献 10 相比, 不仅能准确的检测出电弧故障的发生, 而且避免电路中的负载启动、电器调档和高次谐波等突变信号对检测结果的干扰.

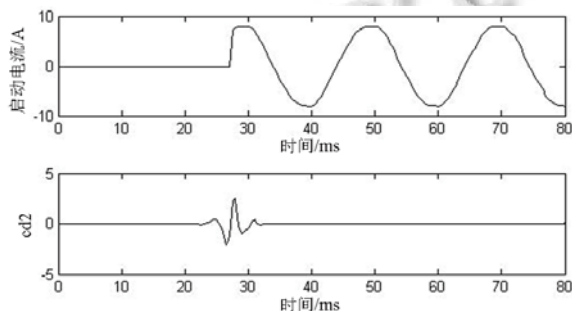


图 5 阻性负载启动电流小波分析图

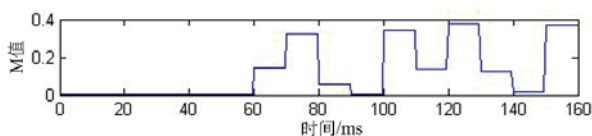


图 6 M 值图

3 电弧故障检测的实现

3.1 电弧故障模拟与数据采集

为有效模拟低压供电系统中的电弧故障, 搭建了一个实验平台, 并制作了电流数据采集装置. 实验装置如图 7 所示.

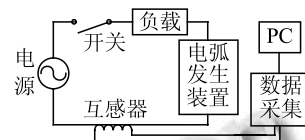


图 7 故障电弧模拟实验装置图

放电装置采用接触、分开产生电弧. 负载装置有两个接线柱, 可将不同的负载连接到装置中, 模拟不同种类负载下的电弧故障. 电流互感器额定输入为 20A, 额定输出 25mA, 将互感器初级串联于总回路中, 次级接 500Ω 可调电阻. 数据采集系统采用 stm32 驱动 cs5460 对电流数据实时采集, cs5460 最高采样频率为 4KHz, A/D 转换精度为 24 位, 将采集的电流信号通过串行外设接口(SPI)传输给 stm32. 采集的电流信号经 stm32 简单的处理后, 通过串口传输给上位机.

3.2 LabVIEW 编程

LabVIEW 和 MATLAB 是工程技术领域两款比较强大的数据处理软件, 它们在数据的采集, 处理和分析方面有各自的优势和不足. 本文利用这两款软件各自的优势, 采用混合编程的方式实现故障电弧的检测: 用 LabVIEW 实现对电流信号的采集和结果显示^[11]; 用 MATLAB 对电流信号进行小波变换.

LabVIEW 的每一个程序都称为一个 VI, 一个 VI 可以实现一个或几个函数功能, 且能够被其它 VI 调用, 被调用的 VI 称为子 VI. LabVIEW 用这种方式来实现模块化编程.

如图 8 所示: 在 LabVIEW 程序框图中首先配置串口, 接收通过串口上传的电流信号; 再通过串口读控件将串口写入内存中的数据传递给数据处理子 VI; 数据处理子 VI 能把接收到的字符型数据转换成一维实数数组, 即电流波形数据; MATLAB 脚本调用小波变换工具箱中的函数对电流信号进行小波变换; 最后通过波形图控件显示电流波形和 MATLAB 分析结果.

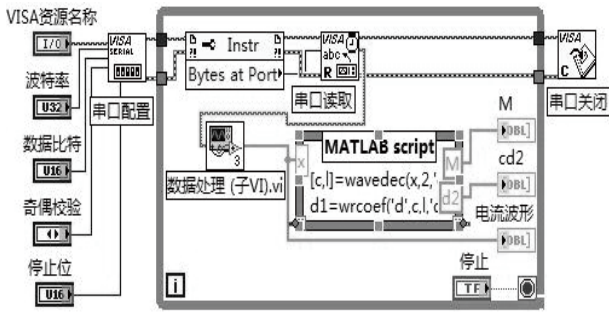
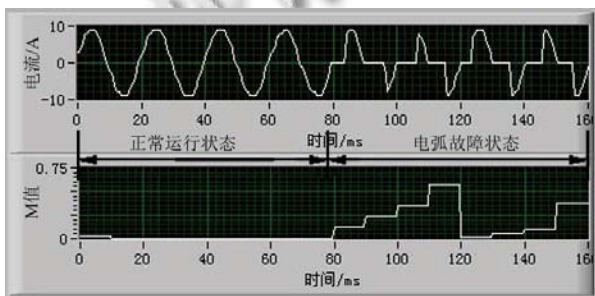


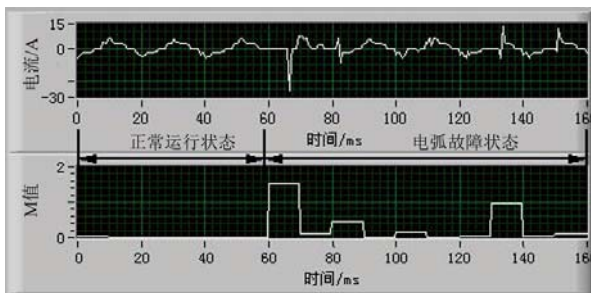
图 8 LabVIEW 程序框图

3.3 几种典型负载的实验结果

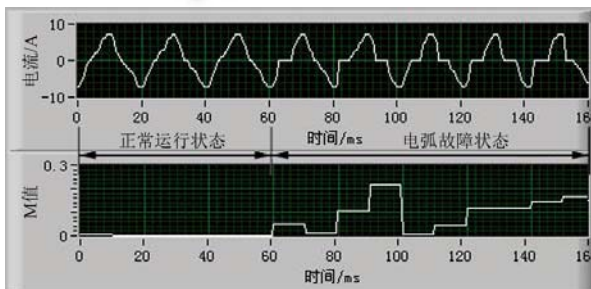
为检验本文提出的算法和系统对不同类型负载电弧故障检测的有效性和适用性, 分别对电水壶、日光灯和电风扇三种负载的正常运行状态和电弧故障状态进行在线检测. 对三种负载电流检测时截取的程序运行结果如图 9 所示.



(a) 电水壶



(b) 日光灯



(c) 电风扇

图 9 三种负载情况下程序运行结果图

对比图 9 中的三种负载下的程序运行结果可以看出: M 值的起伏完全跟随电流波形中的突变信息, 而且突变量越大, 对应的 M 值也越大, 不受负载类型的限制. 分别对三种负载情况下电流波形的 M 值统计结果如表 1 所示.

表 1 不同负载情况下的 M 值

负载	正常运行	电弧故障
电水壶	<0.033	>0.122
日光灯	<0.043	>0.228
电风扇	<0.016	>0.110

由表 1 可见电弧故障状态下的最小 M 值是正常运行状态下最大 M 值的 4 到 7 倍, 两者有明显差异. 参考美国 UL1699 标准提出的通过检测 0.5s 内 M 值大于规定值的次数作为判断电弧故障出现的标准, 能有效地辨识电弧故障的发生, 具有良好的鲁棒性.

4 结论

故障电弧的随机性, 以及电路中类似故障电弧信号的干扰, 使得故障电弧检测的难度较大. 针对这一问题, 本文提出利用二进小波变换检测信号奇异性的能力, 对电流信号特征提取, 再通过小波高频系数的均值判断电路中的电弧故障, 并利用 LabVIEW 和 MATLAB 软件平台实现故障电弧的在线检测. 程序运行结果表明该方法能有效检测出电路中的电弧故障, 从而保障用电安全.

参考文献

- 吕辉,董爱华.基于信息融合的配电箱故障电弧在线检测. 煤矿机械,2009,(30)11:40-242.
- Xiaoming Liu,Xiangning Liu,Chunguang Hou,et al.Arc Fault Diagnosis and Analysis Based on Wavelet Neural Network. Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST).2011:187-190.
- 罗雷,刘晖.浅谈电弧故障断路器.低压电器,2009,51(14):33-35.
- Sidhu TS, Singh G, Sachdev MS. A new technique for detection and location of arcing faults in power system apparatus. Electrical and Computer Engineering,1998.1998:185-188.
- Sun P, Gao X. Series arc fault diagnosis technology research based on the analysis of current rate. Electric Power Equipment-Switching Technology(ICEPE-ST).2011: 565-568.
- Gregory GD, Wong K, Dvorak R. More about arc-fault cir-

(下转第 222 页)

4/bits,每个周期采集的数据量为 200/bits. 三种算法中整个网络的能耗如图 6 所示:

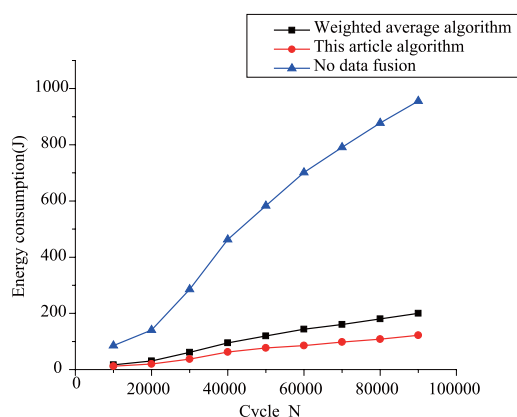


图 6 本文算法与未融合、加权均值算法总能耗比较

由图 6 仿真分析可知: 三种算法节点总能耗都随着循环周期的增加而增大, 其中本文两次阈值判定的数据融合算法能耗最小, 比加权平均算法能耗降低了 38.3%左右, 比没有进行任何融合算法降低了约 4 倍, 说明本算法能有效地节省节点能量。

4 结束语

从图 3、4、6 的仿真分析可知: 本文用了一种使总能耗最小的分簇方法, 理论计算结果和仿真结果基本符合; 在进行簇头选择时, 考虑了节点剩余能量、簇头节点与簇内节点和 sink 之间的距离、节点当选为簇头的次数这些因素的影响, 相对 LEACH 中簇头的随机选择更能均衡节点的能耗; 在对采集的数据两次设置一定阈值减少网内数据的冗余, 比加权平均算法节省了 38.3%的能量, 同时能迅速辨别出异常瓦斯数据, 使工作人员更有效地对矿井进行监控, 对现代的煤矿

安全有很大的借鉴意义。

参考文献

- 1 Chauhan S, Awasthi LK. Energy Efficient Data Gathering Protocol for Wireless Sensor Networks. Dept of CSE, National Institute of Technology, 2011: 535-535.
- 2 Zhao KQ, Wang F, Li MC. Wireless Sensor Network Data Aggregation Approach on Clonal Selection. Computer Technology and Application Progress, 2008:822-866.
- 3 Shen HY, Feng YM. Clustering Adaptive Weighted Fusion Algorithm of Wireless Sensor Network for Railway Embankment Monitor. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 12(10): 190-194.
- 4 Kiran M, Kamal K, Gupta N. Study of Data Fusion in Wireless Sensor Network. Proc. of the International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies (ACCT 2011): 535-539.
- 5 Mhatre V, Rosenberg C. Design Guidelines for Wireless Sensor Networks: Communication, Clustering and Aggregation. Ad Hoc Network Journal, 2004, 2(1): 45-63.
- 6 Heinzelman WR, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- 7 Zhou LP, Kamil M. Cluster Head Selection Algorithm in WSN Considering Security and Remaining Energy. CEA, 2012, 48(3): 88-89.
- 8 Zhao ZC, Deng SG, Jiang DC. Algorithm in Choice of Head-node on WSN based on Gaussian distribution. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(16): 83-85.

(上接第 226 页)

- cuit interrupters. IEEE Trans. On Industry Applications, 2004, 40(4): 1006-1011.
- 7 窦甜华, 段培永, 段晨旭, 石嘉川. 一种建筑物低压供电线路故障电弧检测新方法. 微计算机信息, 2011, 27(3): 159-161.
 - 8 段培永, 窦甜华, 杨修文, 郭东东, 邹苒. 基于 CMAC 神经网络的低压故障电弧检测. 山东建筑大学学报, 2011, 26(2): 105-

109.

- 9 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. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 51-56.
- 10 尹同庆, 陈洪亮. 基于小波变换的故障电弧检测技术研究. 实验室研究与探索, 2008, 27(3): 19-21.
- 11 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. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 134-138, 143.