

利用电磁辐射信号的串并联电弧故障检测

丁浩江, 张认成, 杨凯, 杨建红, 陈首虹

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对电弧故障检测过程中的漏判问题,提出一种新的检测方法.通过电容耦合方式获取电弧故障产生的电磁辐射信号,采用对数放大器压缩其动态范围以增加小幅值电弧故障辐射信号的增益,经电平比较器将放大器输出转换为电平脉冲,最终根据电平脉冲宽度的特性实现电弧故障的检测.样机研制和测试结果表明:该方法对串联和并联电弧故障都具有较为理想的检测精度,适应于串、并联电弧的检测.

关键词: 电弧故障;串、并联;电磁辐射;对数放大器

中图分类号: TM 930.12 **文献标志码:** A

电弧故障是引发电气火灾的主要原因之一^[1-2],其检测方法已成为建筑配电系统安全与火灾防范领域的关键技术.电弧故障检测的关键问题是要揭示电弧故障与正常负载电弧以及插头插拔电弧的本质区别,检测方法应使各种负载及电弧类型具有普适性.电弧故障的检测方法多基于回路中电流有无电弧故障时的状态特征^[3].典型的诊断方法包括频域分析法^[4]、时域波形分析法^[5]、自回归模型参数法^[6]、高阶谱分析法^[7]等.但因电弧模型物理参数不易获取及电弧故障的可屏蔽性、负载的多样性,上述方法尚不能较好地解决电弧故障误识别及漏识别问题.为解决这些问题,许多学者进行了有益的探讨^[8-13].将电磁辐射信号作为电弧故障诊断的特征量,降低了电弧故障识别的误识率和漏识率,但由于电弧故障发生位置的随机性,利用天线接收电磁辐射信号在工程应用中可行性不高.本文采用电容耦合器从供电回路接收辐射信号的高频成分,经检波和对数放大后压缩高频信号的动态范围,使高频信号中的低幅值成分幅值增大,高幅值成分幅值降低,以期提高电弧故障的检测效果.

1 电弧的电磁辐射现象

电弧是两电极间气体放电的一种特殊形式.当放电进入弧光放电区,放电通道有明显的边界,通道中的温度可达 6 000 K,电流密度可达 $10\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$,电离方式主要为热电离,电极间隙被具有良好导电性能的等离子体贯通.等离子体粒子所处的能量状态发生变化时,对外表现为各种形式的辐射现象.

电流元沿 x 轴产生的磁场,如图 1 所示.在距离为 R 处,由一长度为 δ 的电流元在沿 x 轴方向所产生的电场大小^[14]可表示为

$$E_{\text{rad}}(\boldsymbol{R},t)\approx\frac{\sin\theta}{4\pi\epsilon_0\boldsymbol{R}c^2}\int_0^\delta\frac{\text{d}i}{4\text{d}t}\text{d}y.$$
 (1)

式(1)中: θ 为电流与 \boldsymbol{R} 向量之间的夹角; i 为电流; ϵ_0 为介电常数; c 为光速.假设电弧电阻在整个动态过程中保持不变,在忽略电弧电感的情况下,其功率谱^[11]可近似表示为

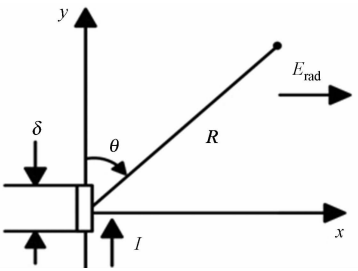


图 1 电流元沿 x 轴产生的磁场
Fig. 1 Electromagnetic field radiated by a current component oriented along x -axis

$$P_{\text{arc}}(\omega) \approx \frac{k^2 I_{\text{arc}}(0)^2 \omega^2 R_{\text{arc}}^2 C_{\text{S}}^2}{1 + R_{\text{arc}}^2 C_{\text{S}}^2 \omega^2} \tag{2}$$

式(2)中: k 为常量; $I_{\text{arc}}(0)$ 为电弧电流初始上升率; C_{S} 为两触点之间的容值; R_{arc} 为电弧电阻; ω 为电弧固有频率. 当角频率 ω 趋近无穷大时, 式(2)将达到最大值 $k^2 I_{\text{arc}}(0)^2 \omega^2$; 当 $\omega = 1/R_{\text{arc}} C_{\text{S}}$ 时, 功率谱达到最大值的一半. Kayano 等^[15] 在一项电极为银的电弧放电实验中发现: 放电初始阶段的辐射信号频率高达 10 MHz, 电弧阶段将超过 100 MHz.

电弧辐射产生的电磁波是以波动形式存在的电磁场, 可在空气及金属导体中传播. 发生电弧故障时, 天线及回路导线都能接收到辐射电磁波. 在导电介质中传播时, 电磁波因介质导电吸收能量振幅逐渐衰减, 其衰减快慢与导电介质的介电常数、电导率及电磁波波长有关.

2 电弧故障诊断

2.1 电弧电磁辐射信号的获取

利用高频电容耦合电路感测电弧故障发生时产生的电磁辐射信号, 输入端并联在负载电源端, 输出端作为检测电路的输入, 如图 2 所示. 电容耦合器在获取信号的同时, 也起到强弱电的隔离作用. 耦合器中选用容量为 10 nF, 耐压值为 400 V 的聚丙烯电容. 在串联电弧故障试验中, 以电阻炉作为负载, 供电电压为 220 V/50 Hz 交流电, 从变压器端采集高频电压信号(图 3(a)), 采集工具为 DPO4104-L 型示波器, 采样率为 50 MHz. 由图 3(a)可知: 高频信号轮廓呈现马鞍形状, 两侧的高频信号较中间的幅值更大, 同时信号出现周期性零休, 零休周期为 100 Hz. 高频信号的零休与电弧电流的零休是一致的, 在电弧电流零休期间, 电弧熄灭, 弧隙间的电离现象趋于停止, 消电离作用极为强烈, 上述的辐射现象也将减少.

2.2 电弧故障诊断方法

电弧故障特征信号处理过程, 如图 3 所示. 对数检波放大器在对高频信号检波的基础上进行对数放大, 输出信号与固定电平进行比较, 高于该电平输出高电平; 否则, 反之, 由此得到脉冲信号. 高频信号的“零休”、“幅值波动”等特征被集中转换为脉冲波宽度的随机变化, 微处理器通过捕获脉宽实现电弧故障诊断: 10 ms 内捕获脉宽大于设定阈值时, 判定当前半波为电弧故障半波; 移动累加 0.5 s 内电弧故障半波总数, 总数大于阈值则判定发生电弧故障.



图 2 耦合电路
Fig. 2 Coupling circuit

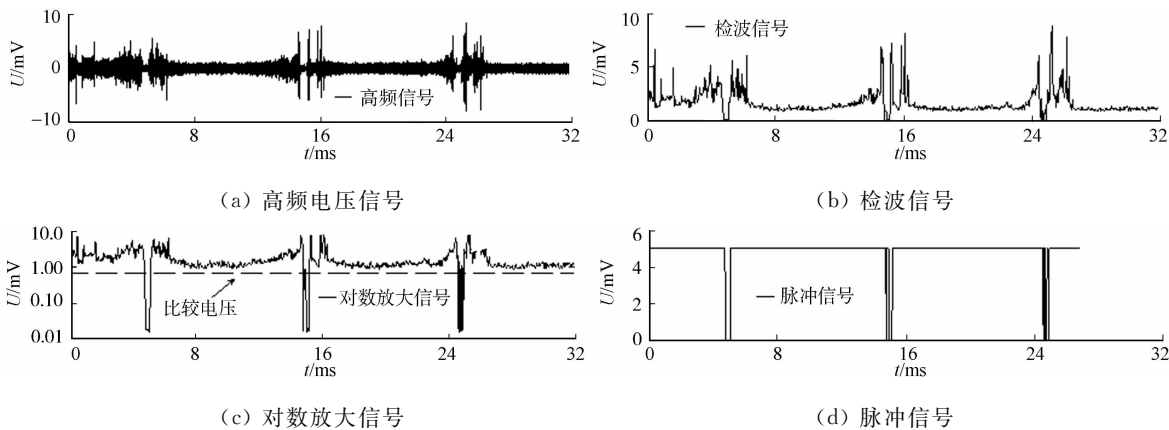


图 3 电弧故障高频信号处理过程

Fig. 3 Processing of arc fault high frequency signal

比较电平的大小对电弧故障的诊断起决定性作用. 将检波信号直接输入电平比较器(图 3(b)), 若比较电平过低, 微小噪声信号易被识别为电弧故障信号, 导致误判; 若比较电平过高, “马鞍”中间检波信号幅值低于比较电平, 造成电弧故障信号损失, 导致漏判. 检波信号经对数放大后, “马鞍”两侧高幅值信号被压缩, 中间低幅值信号幅值增大(图 3(c)), 即电弧期间的信号维持在高幅值水平, 电弧零休期间的信号停留在低幅值水平, 拉开了有无电弧故障时信号幅度的距离. 参考 UL 1699《故障电弧断路器标

准》,对吸尘器、手电钻、开关电源、空压机等典型负载进行大量实验,确定检测效果较理想的比较电平.

2.3 对数放大

为实现对数放大,在耦合电路后增加一级连续检波式对数放大器^[16].理想的输入输出间的关系为

$$V_{out} = V_y \log_{10}(V_{in}/V_x).$$
(3)

式(3)中: V_{out} 为输出电压; V_{in} 为输入电压; V_x 为截止电压; V_y 为斜率电压,用以调节增益.在实际电路中,当输入电压低于截止电压值时,输出输入不再维持对数关系,输出电压将稳定在一个固定值.对数放大器的增益 K 为

$$K = \frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}} = \frac{V_y}{V_{in}} \frac{1}{\ln 10}.$$
(4)

由式(4)可知:对数放大器的增益与输入信号有关,输入信号越小,放大器的增益越大;反之,输入信号越大,增益越小,从而起到压缩大信号幅值,增大小信号幅值的作用.

3 实验部分

3.1 实验平台

电弧故障发生平台,如图 4 所示.碳化路径电弧故障试验机利用 8 000 V 交流电压碳化破损导线形成碳化路径,模拟线路老化或接触不良产生的电弧故障(图 4(a));电缆切割电弧故障试验机模拟利器切割并行导线时产生的电弧故障(图 4(b));点接触电弧发生器利用铜与碳之间的点接触产生电弧故障(图 4(c)).

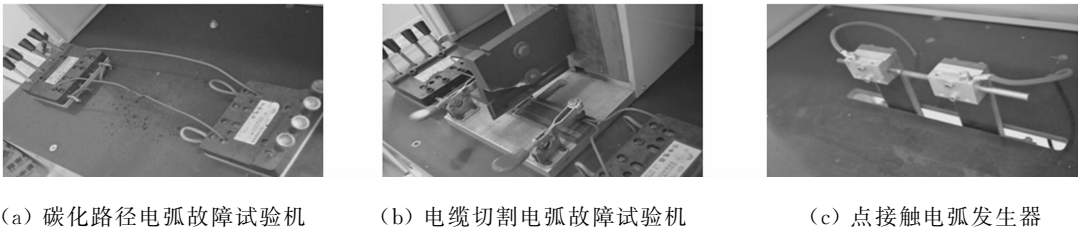


图 4 实验设备
Fig. 4 Experimental equipment

3.2 实验方案

实验包括碳化路径串联电弧故障试验、碳化路径并联电弧故障试验、电缆切割电弧故障试验、点接触串联电弧故障试验.研究表明:建筑供电系统中,22~24 MHz 频率范围内背景噪声较小,电弧高频信号具有较高的信噪比^[17].因此,在耦合电路与对数放大器之间配置一个中心频率为 23 MHz 的带通滤波电路,用以减小背景噪声带来的影响.

测试在 220 V/50 Hz 的供电情况下进行,试验电路如图 5 所示.数据采集工具为 DPO4104-L 型示波器,采样率为 50 MHz,同时采集高频滤波信号及对数放大器输出信号.串联电弧测试负载类型有吸尘器、手电钻、卤素灯、空压机、开关电源、调光灯,其额定功率分别为 1 100,850,360,2 200,400,1 000 W.

3.3 对数放大器输出效果

以典型负载吸尘器为例,电缆切割电弧故障高频信号幅值较小,且具有周期性(图 6(a));点接触电弧故障高频信号幅值较大,且不规则(图 6(b)).无电弧故障时,对数检波信号稳定在低水平;有电弧故障时,幅值随高频信号包络线变化.碳化路径串、并联电弧故障试验与电缆切割电弧故障试验结果类似.

3.4 峰值线性检波与对数检波效果对比

为了验证对数检波放大器对数放大的作用,搭建峰值线性检波电路对比二者的检波效果.碳化路径串联试验中两检波效果对比图,如图 7 所示.由图 7 可知:电弧故障辐射的高频信号幅值较小时,线性检

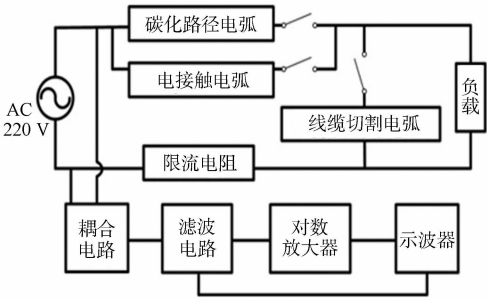


图 5 试验电路
Fig. 5 Experimental circuit

波后的信号幅值较小或截止,造成电弧故障诊断信息的损失. 对数放大器在输入信号微小的情况下,依旧能保持较大的幅值输出,最大程度保留电弧故障特征信息.

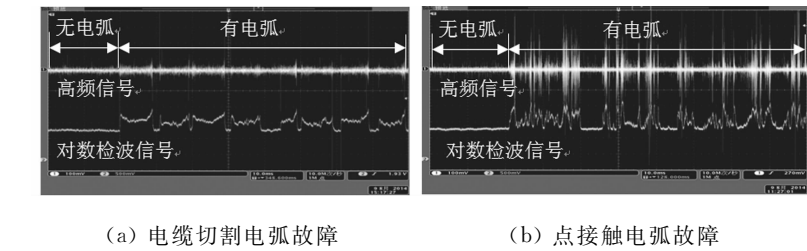


图 6 对数放大器输出

Fig. 6 Output of logarithmic amplifier

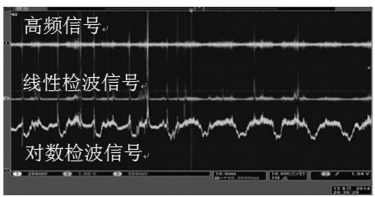


图 7 检波效果对比

Fig. 7 Comparison of detection effect

4 电弧故障检测装置及测试结果

为验证检测方法的可行性,设计了一款电弧故障检测电器(AFDD)样机,其结构如图 8 所示. 整个系统主要由脱扣电路、高频耦合电路、滤波电路、对数放大器、比较器、微处理器、电源等部分组成. 电源直接从零火线上取电,将市电转换为 5 V 直流电为比较器、对数放大器、微处理器供电. 达到脱扣要求时,微处理器发出脱扣信号断开回路.

每组测试进行 50 次重复性试验,试验结果如表 1 所示. 表 1 中: δ 为漏判率,由表 1 可知:样机对串、并联电弧的检测均有效. 在误脱扣实验中,分别测试每种负载下启动、功率调节、正常运行 3 种工况下的误判率($\eta_1 \sim \eta_3$),每种工况下进行 50 次重复性实验,测试结果如表 2 所示. 表 2 中:“—”表示不存在此工况. 由表 2 可知:负载为手电钻时,其功率疾速变化,样机易受手电钻电刷电弧影响而脱扣,其他情况下样机并未因负载差异或工况变化而脱扣.

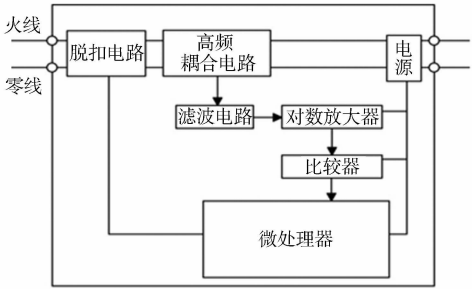


图 8 样机结构

Fig. 8 Structure of prototype

表 1 电弧故障检测试验结果

Tab. 1 Result of arc fault detection test

测试项目	电弧类型	$\delta/\%$
碳化路径电弧故障试验	串、并联电弧	4
电缆切割电弧故障试验	并联电弧	4
点接触电弧故障试验	串联电弧	2

表 2 误动作测试试验结果

Tab. 2 Result of mal operation test

								%
负载	η_1	η_2	η_3	负载	η_1	η_2	η_3	
吸尘器	0	0	0	空压机	0	0	—	
手电钻	0	0	5	开关电源	0	0	—	
卤素灯	0	0	—	调光灯	0	0	0	

5 结束语

通过电容耦合方式接收电弧故障辐射信号,利用对数检波放大器压缩其动态范围. 测试结果表明:文中方法降低了电弧故障诊断的漏判率,适用于串并联电弧故障的检测,检测方法受负载差异或工况变化影响较小,可为现有 AFDD 装置设计提供参考.

参考文献:

[1] GREGORY G D, WONG K, ROBERT F. More about arc-fault circuit interrupters[C]// Industry Applications Conference. [s. l.]: IEEE Press, 2003: 1306-1313.

- [2] PARISE G, MARTIRANO L, GRASSELLI U, et al. The arc-fault circuit protection[C]// Industry Applications Conference. [s. l.]: IEEE Press, 2001: 1817-1822.
- [3] 施惠冬, 潘东强, 付华. 电弧故障检测的分析和研究[J]. 低压电器, 2013(6): 15-20.
- [4] LEE W J, SAHNI M, METHAPRAYOON K, et al. A novel approach for arcing fault detection for medium-/low-voltage switchgear[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(4): 1475-1483.
- [5] 占友雄, 张认成, 杨建红, 等. 基于 Camberra 距离的串联电弧故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 30-36.
- [6] 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.
- [7] YANG Kai, ZHANG Ren-cheng, YANG Jian-hong, et al. Research on low-voltage series arc fault detection based on higher-order cumulants[J]. Advanced Materials Research, 2014, 889/890: 741-744.
- [8] SODJI T S, SACHDEV M S, SAGOO G S, et al. Detection and location of low-level arcing faults in metal-clad electrical apparatus[C]// Developments in Power System Protection. New Jersey: IEEE Press, 2001: 157-160.
- [9] SIDHU T S, SINGH G, SACHDEV M S, et al. A new technique for detection and location of arcing faults in power system apparatus[C]// Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. New Jersey: IEEE Press, 1992: 185-188.
- [10] SIDHU T S, SINGH G, SACHDEV M S, et al. Protection of power system apparatus against arcing faults[C]// Region 10 International Conference. [s. l.]: IEEE Press, 1998: 436-439.
- [11] KIM C J. Electromagnetic radiation behavior of low-voltage arcing fault[J]. Power Delivery, IEEE Transactions, 2009, 24(1): 416-423.
- [12] RESTREPO C E, CARLOS E. Arc fault detection and discrimination methods[C]// Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts. New Jersey: IEEE Press, 2007: 115-122.
- [13] 杨晟健, 钟清华. 基于 FFT 和电磁辐射的低压电弧故障检测[J]. 现代电子技术, 2012, 35(18): 86-88.
- [14] BONDIOU A, LABAUNE G, MARQUE J P, et al. Electromagnetic radiation associated with the formation of an electric breakdown in air at atmospheric pressure[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61(2): 503-509.
- [15] KAYANO Y, NAKAMURA T, MIYANAGA K, et al. Current and radiation noise up to GHz band generated by slowly breaking silver compound contacts[J]. IEICE Trans Electron, 2007, 90(7): 1504-1506.
- [16] 庞佑兵, 梁伟. 一种低噪声大动态连续检波式对数放大器的设计[J]. 微电子学, 2001, 31(4): 282-284.
- [17] MARTEL J M, ANHEUSER M, HUEBER A, et al. Schutz gegen parallele störlichtbögen in hauselektroinstallation[C]// Kontaktverhalten und Schalten. Berlin: VDE VERLAG, 2011: 1-11.

Series and Parallel Arc Fault Detection Using Electromagnetic Radiation Signal

DING Hao-jiang, ZHANG Ren-cheng, YANG Kai,
YANG Jian-hong, CHEN Shou-hong

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

Abstract: In order to resolve the missing judgement in detecting arc fault, a new detecting method is put forward in this paper. The electromagnetic radiation signal radiated by arc fault is obtained through a capacitive coupling method, aimed at increasing the gain of the radiation signal radiated by arc fault of low amplitude, a logarithmic amplifier is applied to compress the radiation signal, the output of the amplifier is processed into pulse signal via a comparator. Finally, the detection of arc fault is achieved according to the characteristics of the width of pulse signal. Prototype development and test result show that this method has an ideal detecting precision for both series arc fault and parallel arc fault, it is suitable for both series and parallel arc fault detection.

Keywords: arc fault; series and parallel; electromagnetic radiation; logarithmic amplifier