

# 电弧故障识别及保护的新技术

蔡志远<sup>1</sup>, 鲍洁秋<sup>1,2</sup>

(1. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 介绍了电弧故障的产生机理和特征, 及国外有关电弧故障检测和判别方法。分析了近年来电弧故障保护产品的概况, 包括电弧故障断路器的组成原理, 电弧故障信号的检测方法和要求, 电弧故障识别和判定方法及国外最新专利技术。

**关键词:** 电弧故障; 电弧故障断路器; 串联电弧; 并联电弧

**中图分类号:** TM 561 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5531(2014)10-0024-04



蔡志远(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能电器。

## New Intelligent Technique of Arc Fault

CAI Zhiyuan<sup>1</sup>, BAO Jieqiu<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** The mechanism and characteristics of arc fault, as well as foreign related arc fault detection and identification method were introduced. Some techniques arc fault protection products in recent years were analysed, including the composition principle of arc fault circuit interrupter, arc fault signal detection method, arc fault identification method, as well as the latest foreign patent technology etc.

**Key words:** arc fault; arc fault circuit interrupter; series arc fault; parallel arc fault

## 0 引言

随着社会进步和经济的发展,用电量不断增加。虽然各国对供电可靠性、连续性和安全性要求越来越高,但电气火灾仍一直处于攀升趋势。据2012年中国消防年鉴统计,2011年我国共发生电气火灾37 960起,占火灾事故的30.3%<sup>[1]</sup>;欧洲每年报道的火灾次数超过十万次,电气火灾占25%以上<sup>[2]</sup>。在电气火灾中,电弧故障占绝大多数,其原因在于供电线路中普遍应用的小型断路器和剩余电流保护装置不能对电弧故障给予有效的保护,电弧故障引发的电气火灾已对人员、设施和建筑物构成严重威胁。

为防止电弧故障引发电气火灾,美国自上个世纪末就开始研究电弧故障断路器(Arc Fault Circuit Interrupter, AFCI)<sup>[3]</sup>。目前,家用AFCI已经在北美洲广泛应用;2013年西门子公司将带有电弧故障保护功能的5SM6AFD装置引入

市场<sup>[2]</sup>;随着国内对电弧故障保护的重视程度逐渐提高,我国也颁布了有关电弧保护设备的法规,2013年11月讨论通过了《电弧故障保护电器的一般要求》送审稿。该标准实施以后,将为我国AFCI的应用做好铺垫。

## 1 电弧故障产生的原因及分类

许多电路中经常发生的电弧多数是“安全”或可控制的电弧,电气线路和用电设备在设计时可以承受这些“安全”或可控制电弧的作用。UL 1699:2011《电弧故障断路器》定义的电弧故障是电路中绝缘介质发生的非正常弧光放电,通常伴随着部分电极的挥发<sup>[4]</sup>。

电弧故障按其发生部位可分为串联电弧故障和并联电弧故障;按其发生原因可分为金属性点接触和电线绝缘碳化形成放电通道。电弧故障类型如图1所示。

鲍洁秋(1983—),男,博士研究生,研究方向为电弧故障识别与检测、电气设备试验与故障诊断。

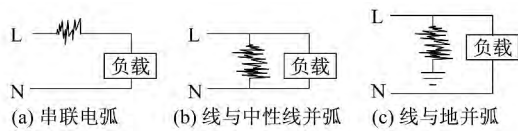


图1 电弧故障类型

图1(a)为串联电弧故障,发生于一根导线上,一般是由于导体机械断裂,或导体电接触不良,或电线绝缘碳化形成放电通道而产生电弧故障。由于电弧相当于阻性元件,与负载相串联,线路电流通常较未发生电弧故障时有所减小,不会引起小型断路器动作,因而串联电弧故障只能用 AFCI 加以保护;图1(b)为发生于线与中性线之间的并联电弧故障,因其间歇性发生,且电流有效值和持续时间比直接短路情况小,有可能不会引起过流保护装置动作,因此也需要用 AFCI 加以保护;图1(c)为发生于线与地之间的并联电弧故障,虽然剩余电流保护装置能很好地对接地故障进行保护,但一般要求电源中性点接地,所以对电弧故障所起的保护作用有一定的限制,还需要用 AFCI 加以保护。20 A 小型断路器的过流保护特性如图2所示。

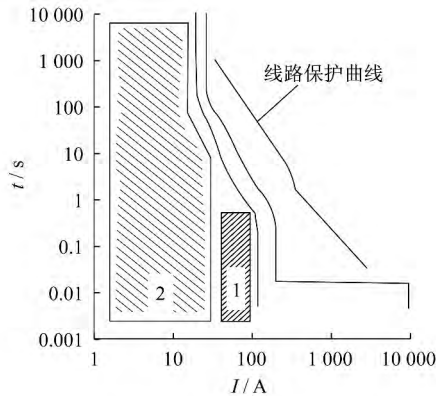


图2 小型断路器的过流保护特性曲线

为了既能实现过流保护,又能尽可能地发挥被保护对象的过流能力,小型断路器的保护动作时间须小于且接近被保护对象的允许过流时间。然而,当发生线对中性线的并联电弧故障时,其允许时间电流特性为区域1,不能引起小型断路器动作;发生串联电弧故障时,其时间电流特性为区域2,同样也不能引起小型断路器动作。在 AFCI 之前,低压供电系统普遍采用小型断路器加剩余电流保护装置的组合方式,这种保护方式不仅不能对串联电弧故障加以保护,而且对并联电弧故

障也存在保护盲区。为对引起电气火灾的过流、接地、漏电和电弧故障进行全方位保护,应将小型断路器、剩余电流保护装置和 AFCI 组合在一起使用,且要求 AFCI 能对串联电弧故障和并联电弧故障给予有效保护<sup>[2]</sup>。

## 2 电弧故障检测方法

根据使用场合不同,UL 1699 定义了三种类型的 AFCI,分别为:① 支路 AFCI,安装在配电盘中,对支路电路和馈电线路的电弧故障进行保护;② 插座式 AFCI,安装在用电器具的电源插座上,对用电器的电弧故障进行保护;③ 组合式 AFCI,满足前两种 AFCI 的要求,对分支电路和用电源插座之间的电弧故障进行保护。

由于低压配线路敷线隐蔽,且电弧故障发生点不确定,一般采用间接保护方式对电弧故障进行保护,即测量线路的电流、电压或相位等电气参数,当发生电弧故障时,这些电气参数会发生变化,据此判别是否发生了电弧故障。其中,大多数产品根据电流进行判别,典型 AFCI 原理图<sup>[3]</sup>如图3所示。其原理是利用电流传感器和剩余电流传感器测量电流,电弧故障检测和电路判别是否发生了串联电弧故障、线与中性线之间的并联电弧故障或线与地之间的并联电弧,如发生电弧故障,常闭触点动作,断开被保护电路。

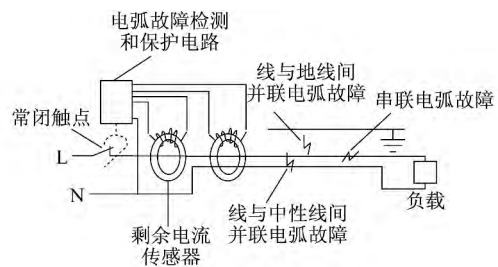


图3 典型 AFCI 原理图

国外给出了 60 Hz、120 V 交流电路的正常运行及发生串联故障电弧和并联电弧故障的电流范围<sup>[5]</sup>如图4所示。在 60 Hz、120 V 的交流馈电线路中,工作电流的范围一般是 0~20 A,典型串联电弧故障发生时,电流范围为 0~30 A。多数用电设备发生串联电弧故障时,电流有所减小,但有些用电设备发生串联电弧故障时,电流有所增加,如个人计算机和压缩机。典型并联电弧发生时,电流超过 75 A。这就要求具有串联电弧故障

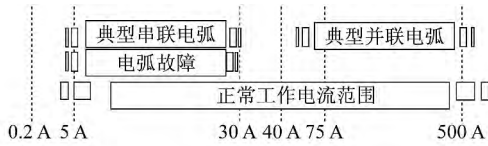
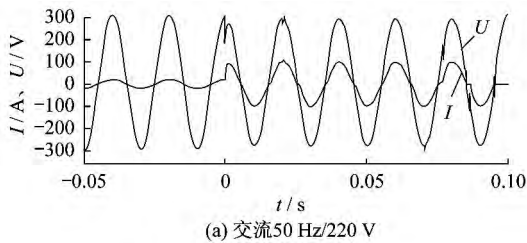


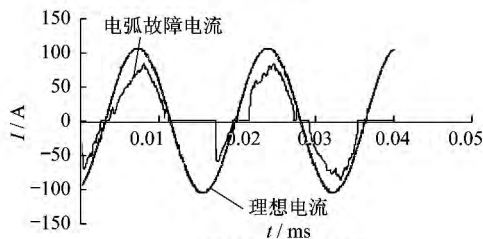
图4 典型的串联电弧、并联电弧和正常工作电流范围

和并联电弧故障保护功能的组合电弧故障的电流检测范围为 0.2 ~ 500 A, 这包含线对地的并联电弧故障, UL 1699 线对地的并联电弧检测范围为 0.05 A 及以上。

通过对住宅中的并联电弧故障和串联电弧故障进行了大量试验, 结果表明, 在 50 Hz、220 V 的交流电路中, 刀切试验所产生的电弧故障电流峰值超过 100 A, 大多在 300 A 以上, 少数超过 400 A。其中一组电流峰值较小的并联电弧故障电流波形图如图 5(a) 所示, 国外并联电弧故障电流峰值为 75 A 以上, 如图 5(b) 所示<sup>[4]</sup>。从实测结果看, 0.2 ~ 500 A 的电流检测范围同样也适用于国内住宅电弧故障保护的要求。



(a) 交流 50 Hz/220 V



(b) 交流 60 Hz/120 V

图5 交流电路对中性线的并联电弧

### 3 电弧故障识别方法

电弧是动态的, 一直处于变化之中, 具有随机性。发生电弧时的线路电流特性与一些负载正常运行时的电流特性较为相似, 需加以区别。国内外对此进行了试验和研究, 从中找出识别并联电弧故障和串联电弧故障的判定方法。

目前, 施耐德和西门子的产品主要是通过以

下特征判别线路是否发生了电弧: ① 当发生电弧时, 线路电流中含有宽带噪声, 其频率范围为几十 kHz ~ 1 GHz, 属于粉红色噪声。粉红色噪声有时也称作闪变噪声, 是一个具有功率谱密度(能量或功率每赫兹)与频率成反比特征频谱的信号或过程。在粉红色噪声中, 每倍频程中都有一个等量的噪声功率。一旦电弧熄灭, 宽带噪声随之消失。噪声能量随频率的增加而减小。② 由于电弧在电流过零附近熄灭, 在电流过零后重燃, 因此, 宽带噪声在电流过零点附近消失, 在电流过零后出现, 周期性地交替出现和消失, 与电源频率相关, 而电路中的噪声信号不会随电源频率周期性地交替出现和消失, 这是判别电弧故障的重要特征。

利用以上特征, 可以检测线路是否发生了电弧故障。由于住宅中的一些用电器具在运行时也会产生与电源频率相关的噪声, 为防止误动作, 还需找到一些其他特性。

例如某些用电器启动时会有涌流, 在 60 Hz/120 V 交流电路中, 空气压缩机启动时峰值电流可以达到 150 A, 持续 200 ~ 500 ms, 同时有少量的宽带噪声, 但该噪声在电流过零点附近没有消失, 这与电弧故障有所不同; 真空吸尘器的涌流约 50 A(峰值), 按指数衰减到 20 A, 其运行时也存在宽带噪声, 且在过零点附近消失, 但与故障电弧不同的是, 故障电弧的宽带噪声能量不随时间衰减, 据此可将两者加以区分, 如图 6(a) 所示; 手电钻的电流约 30 A, 存在宽带噪声, 但手电钻内部电弧的产生和熄灭与手电钻的转速有关, 与电源频率无关, 即使手电钻的转速与电源频率相接近, 电弧存在时间也很短, 不能维持半个周期, 根据这个特性可以区分手电钻和电弧故障, 如图 6(b) 所示<sup>[5]</sup>。

总之, 利用宽带噪声、宽带噪声在过零点附近消失, 以及宽带噪声在半个周期内的能量分布等特点可以鉴别电弧故障, 可以避免误动作。

从美国专利看, 美国的 AFCI 基本是根据线路电流值和电流信号的宽带噪声判别是否发生了电弧故障。2013 年 10 月美国公开的一个新型 AFCI(专利号 US 8 599 523 B1) 即采用这种检测和识别方法<sup>[6]</sup>, 与原有专利产品的不同之处是该 AFCI 用了 3 个传感器, 如图 7 所示。

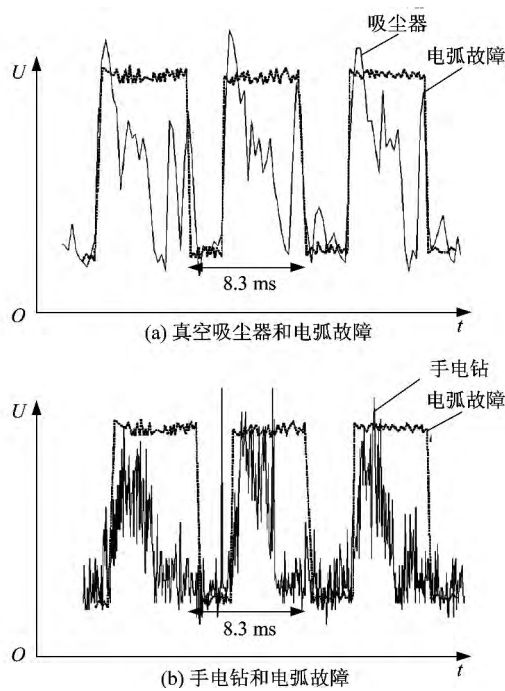


图6 某些负载与电弧故障的宽带噪声比较

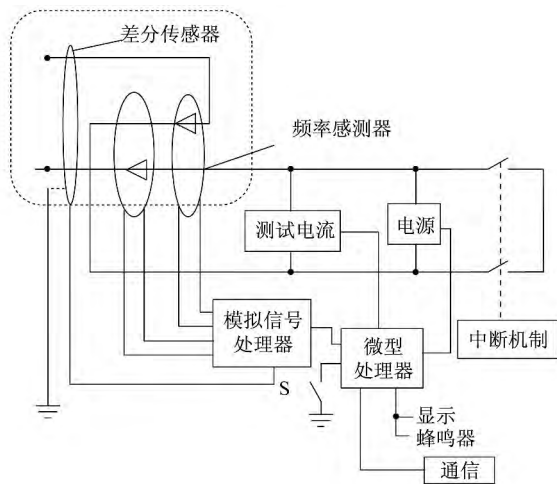


图7 带有3个传感器的AFCI原理框图

电流传感器用于测量线路电流;频率传感器用于测量线路电流信号的频率,将这两个传感器所检测的电流值和高频信号的能级信号送入处理器,即可判别是否发生了串联电弧故障和线对中性线之间的并联电弧故障。由于分别专用传感器测量线路电流及其高频分量,与使用一个宽带电流传感器相比,能更有针对性地检测被测线路的电流值,以及电流信号宽带噪声的能级,从而提高测量精度。线对地之间的并联电弧故障仍用差分电流传感进行测量。串联电弧的检测方法是:设

置多个定时周期,包括第1定时周期和第2定时周期,第2定时周期是第1定时周期的分数,第1定时周期为工频半个周波,第2周期是采样周期,每半个工频周期采集32个数据,计算第1个定时周期内的电流及其宽带噪声的频率,判断是否达到预先设定的阈值,及是否发生了串联电弧故障。并联电弧的检测方法与串联电弧相似,主要是比较电流是否超出预先设定的阈值(75 A)。线对地的并联电弧根据差分电流进行判断,利用差分电流传感器检测线路的差分电流,如果在第1时间周期内均超出预先设定的阈值,则判定发生了线对地电弧故障。

为便于组装,电流传感器和频率传感器可采用一体结构,如图8所示。

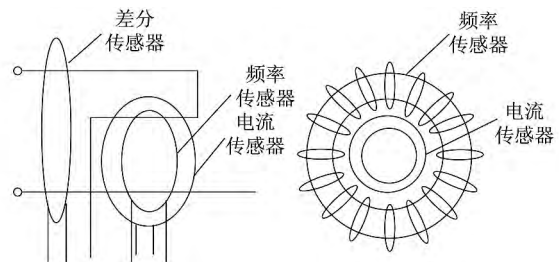


图8 一体结构的电流和频率传感器

#### 4 结语

国外电弧故障保护产品主要根据电流和频率两个特征加以判别,本文介绍了有关电弧故障检测原理,以及国外产品的最新专利技术,供国内研究与开发 AFCI 的公司参考。

#### 【参考文献】

- [1] 公安部消防局中国消防年鉴[G]. 2012.
- [2] SIEMENS. AFDD-Advanced Preventative Fire Protection [C/OL]. www.siemens.com/lowvoltage/afdd.
- [3] GEORGE D ,GREGORY ,KON W ,et al. More about arc-fault circuit interrupters [J]. Industry Application Conference 2003( 2) : 1306-1313.
- [4] UL 1699:2006 UL standard for safety for arc fault circuit interrupters [S].
- [5] CARLOS E. RESTREPO , Arc fault detection and discrimination methods [C] // the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2007: 115-122.
- [6] Arc Fault Circuit Interrupter: United States ,US 8 599 523 B1 [P]. 2013 - 12 - 03.

收稿日期: 2014-04-07