

# 新型电弧故障保护装置\*

鲍洁秋<sup>1,2</sup>, 蔡志远<sup>1</sup>, 马少华<sup>1</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:** 讲解了电弧故障的产生机理和特征,以及电弧故障保护装置的相关行业标准。分析了电弧故障保护装置的基本工作原理以及保护特性。通过国内外电弧故障保护装置的专利情况,研究了国内外电弧故障检测技术,包括保护装置的结构组成、电弧特征量提取算法以及电弧故障的判定方法。最后介绍了国内外几种典型电弧故障保护装置。可供从事电弧故障保护装置研究的人员参考和借鉴。

**关键词:** 电弧故障; 检测技术; 电弧特征量; 判定方法; DSP

**中图分类号:** TM 501+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8188 (2015)21-0066-05



鲍洁秋 (1983—), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电弧故障检测与电气设备故障诊断。

## New Type of Arc Fault Detection Device

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

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

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

**Abstract:** The mechanism of arc fault and characteristics, and the industrial standard about arc fault detection device were explained. The basic working principle of arc fault protection devices, as well as the protective properties were analysed. Through the patent of arc fault detection device domestic and overseas, the arc fault detection technology domestic and overseas were researched, including the structure of the detection device, extraction algorithm about arc characteristic quantity and arc fault judgement method. The several kinds of typical products arc fault protection device were introduced. The reference are provided for the researchers of arc fault detection device.

**Key words:** arc fault; detection technology; arc characteristic quantity; judging method; DSP

## 0 引言

随着经济的快速发展,用电量不断增大,用电安全性越发受到人们的重视。为了保证用电安全,低压配电系统对低压电器提出了更高的功能要求和技术指标。由于低压配电系统中普遍使用的剩余电流保护断路器不能对电弧故障实施有效保护,由此而引发的电气火灾时有发生,因此美国研制了专门用于电弧故障保护的电弧故障断路器 (Arc Fault Circuit Interrupter, AFCI)。目前,家用的 AFCI 在北美洲得到了广泛的使用,西门子公司也于 2013 年开发出具有电弧故障检测与保护

功能的低压电器<sup>[1]</sup>。

随着我国对电弧故障保护这一问题重视程度的不断提高,于 2014 年通过了电弧故障保护电器 (Arc Fault Detection Device, AFDD) 国家标准 GB/T 31143—2014《电弧故障保护电器 (AFDD) 的一般要求》。该标准于 2015 年 4 月 1 日开始实施,意味着在我国低压电器领域将迅速涌现出大量电弧故障保护装置相关产品,积极地推动我国电弧故障保护装置向前发展<sup>[2]</sup>。

## 1 电弧故障的产生与特征

电弧是高温、高导电率的游离气体,电流通过

蔡志远 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能电器。

马少华 (1963—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气可靠性。

\* 基金项目: 辽宁省自然科学基金项目 (201202168)

气体介质所产生的瞬间火花。当电极触点断开电流时,只要电流达到 80 ~ 100 mA、电压达到 10 ~ 20 V,两电极间就会产生电弧。电弧具有较高的能量,电弧弧柱具有 6 000 K 以上的温度,任何材料与之长时间接触都可能气化。

低压供配电线路中的电弧可分为两种。一种是“好弧”,即正常电气操作过程中产生的电弧,如电器设备的正常开关操作、电器电源插头的插拔过程等,“好弧”一般不会持续地存在,也不会影响低压供配电系统和线路中的其他用电设备的正常工作,更不会以此引起电气火灾危及用电安全;另一种是“坏弧”,即电弧故障,由电气设备异常操作过程中产生的电弧,或低压供配电线路发生故障情况下的电弧,如电气设备触头松动、线路绝缘老化、绝缘水平下降并击穿等。

电弧的这种区分方法是针对其能否危及用电安全的角度进行划分,没有反应在任何物理参数上,因此判断是否为电弧故障存在较大困难,同时也给电弧故障保护装置提出了较高要求。

## 2 电弧故障保护基本原理

电弧故障保护装置是一种新型智能电器,安装于低压配电线路的电源进线终端。当配电线路的负载端出现故障电弧时,装置需要在短时间内将电源切断,避免电气火灾的发生。其控制电路采用集成电路和 MCU 来实现,主要任务是识别出故障电弧脉冲,并对脱扣机构发出动作信号;又要将故障电弧与“好弧”区分开来,确保系统不产生误动作。电弧故障保护装置是目前有效识别电弧故障并对配电线路实施保护避免电气火灾发生的一种新型电气防火产品。

电弧故障保护装置的工作原理:首先电流采集电路对线路电流进行采样,接着 MCU 对采样数据进行特征分析。若为电弧故障属性,即认为出现一个故障电弧;如果在 0.5 s 内出现超过 8 个故障电弧,该装置便会切断电源。

由于大量非线性电气负载正常运行,电流波形中包含了许多故障电弧的特征,故要将故障电弧在众多非线性负载中以较高的准确度识别出来,是电弧故障保护装置面临的一个难题。这需要经过对大量故障电弧波形进行研究,同时也需要掌握大量非线性负载的电流特征,发现相互之

间存在的一些共性和个性特征,以此作为判定电弧故障的重要依据。因此电弧故障保护装置的 MCU 中需要存储大量的故障电弧特征数据,以及大量电气负载正常运行的电流特征数据,或者是将在线自学习功能集成到电弧故障保护装置中,以便采取自学习方式,使电弧故障保护装置在运行状态下对线路中产生的故障电弧和新型电气负载电流特征进行实时更新和记忆。

## 3 电弧故障保护技术

### 3.1 国外电弧故障保护技术

美国于 2012 年 4 月公开了一个发明专利(专利号 US20120098672 A1)<sup>[3]</sup>,涉及一种新型的电弧故障保护装置。该电弧故障保护装置已经形成了从硬件到软件一套完整的系统,并且可以安装在电源插座进线端或电源的入户端,能够实现对电源插座上所接各类电气负载线路中出现的电弧故障及室内配电布线中的电弧故障进行检测和保护。该装置符合美国的民用电器标准,即额定电压为交流 120 V,频率 60 Hz。

(1) 美国专利所涉及的电弧故障保护装置的系统框图如图 1 所示。该装置由断路器、电流采样、直流电源、宽带放大器、集成电路以及测试电路和复位电路等部分组成。其中断路器脱扣触点位于供电线路的相线上,采样电路也是针对相线电流,并通过精密采样电阻将电流信号转变为电压信号传递给宽频带差分放大器电路;经过放大处理的电压信号输入到复合信号集成电路,进行处理与运算分析;根据分析结果对线路中的电弧状态进

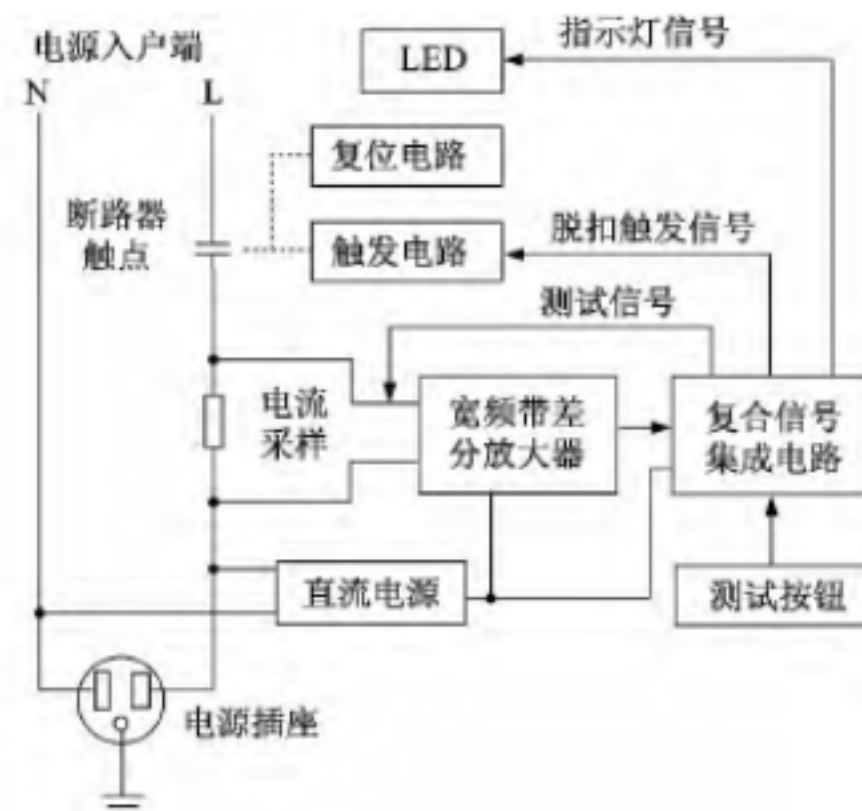


图 1 电弧故障保护装置的系统框图

行判断,决定是否发出断路器脱扣信号和电弧故障报警指示灯信号。测试电路能够发出测试信号,用于测试装置的可靠性;复位电路能够将全部计数器和计时器清零,用于对装置的复位;直流电源为放大器电路和集成电路提供  $\pm 5\text{ V}$  直流电源。

(2) 复合信号集成电路主要由逻辑控制电路、DSP、A/D 转换器、存储器、PWM 模块组成,结构框图,如图 2 所示。经过宽频带差分放大器处理的信号输入复合信号集成电路后,首先需要经过 A/D 转换器将模拟信号转换成数字信号,再将数字信号输入 DSP 中进行运算处理。

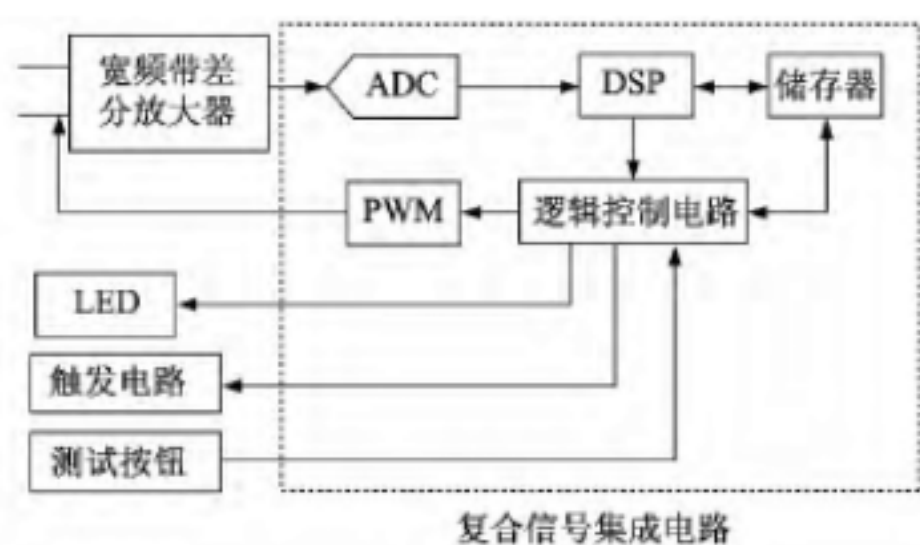


图 2 复合信号集成电路结构框图

DSP 对输入信号的处理过程主要包括提取输入信号的低频分量和输入信号的高频带分量。DSP 的结构中包括低通滤波器和带通滤波器结构框图,如图 3 所示。DSP 还要完成对电流低频分量均方根的计算和电流高频带分量的信号强度的检测,最后将运算处理后的结果输入到逻辑控制电路中进行分析。

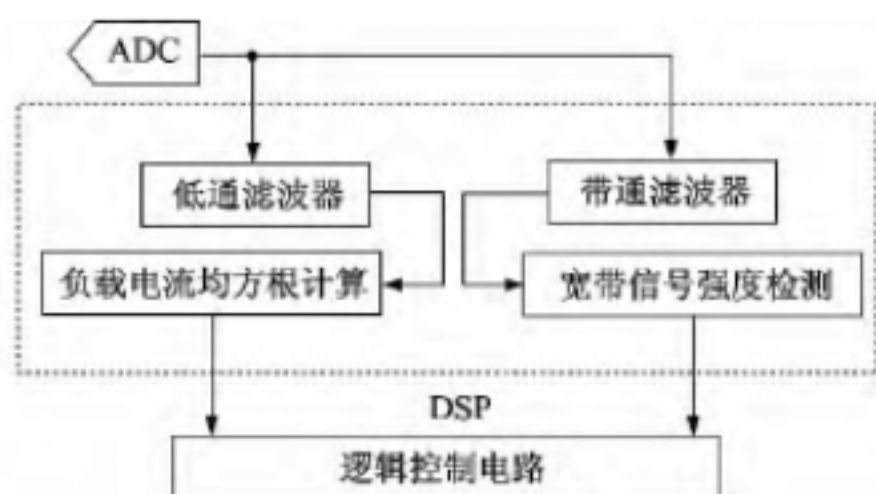


图 3 DSP 结构框图

逻辑控制电路结构框图如图 4 所示。逻辑控制电路对电流低频分量均方根和电流高频带分量的信号强度进行综合分析,从中提取电弧故障特征。如果提取出的电弧故障特征值与存储器中存储的数据库特征量吻合,脱扣触发逻辑判断电路

发出断路器脱扣信号给触发电路,同时驱动 LED 发出报警指示。

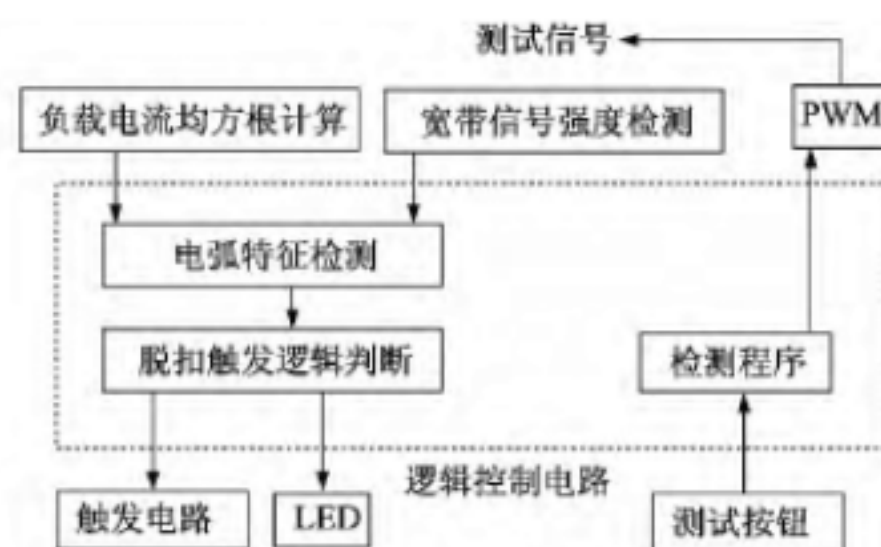


图 4 逻辑控制电路结构框图

(3) 该项美国专利所涉及的电弧故障保护装置判断电弧产生以及切断电路电源的系统流程图如图 5 所示。

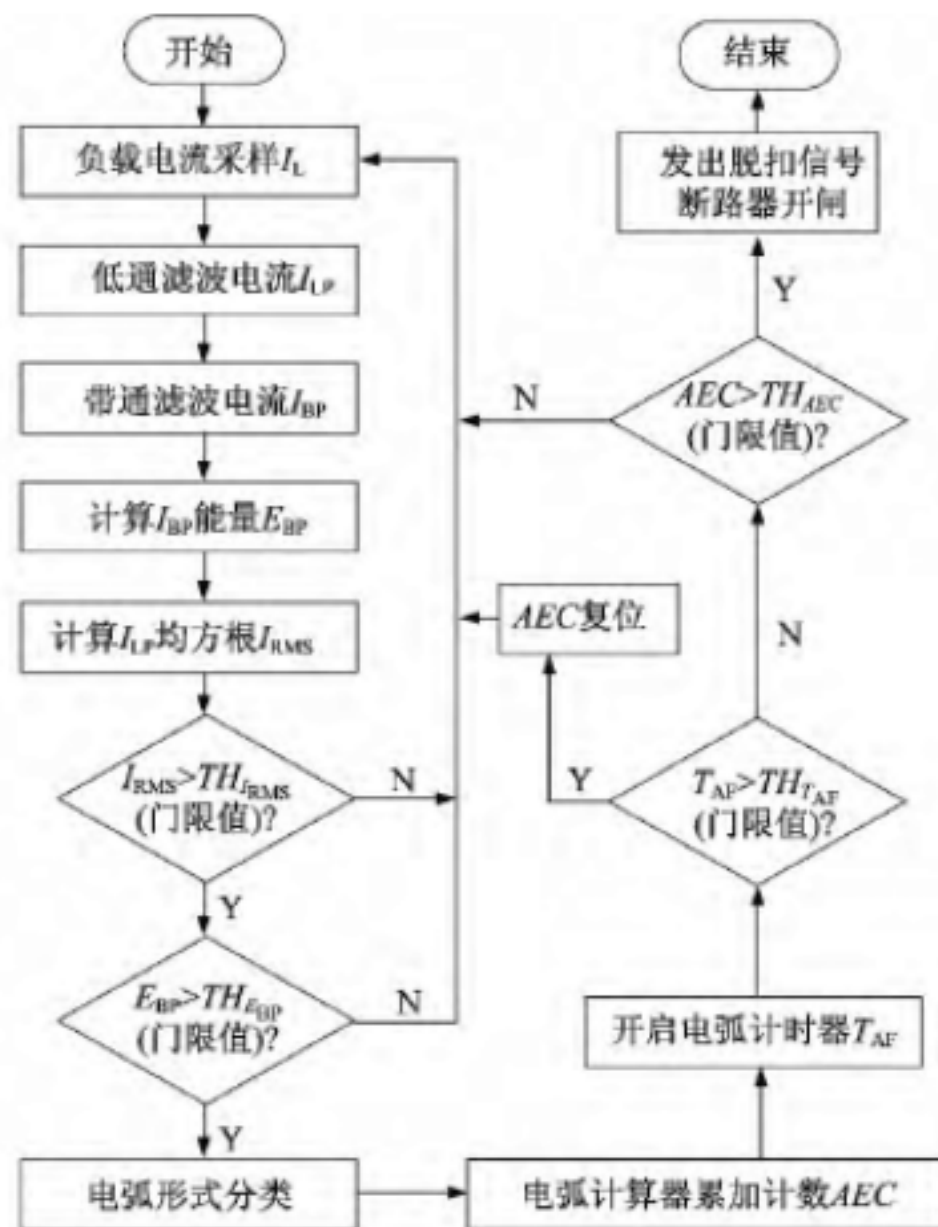


图 5 电弧故障保护装置系统流程图

具体流程如下:① 利用电流采样电路采集负载所在线路的电流信号  $I_L$ 。② 对采集到的电流信号进行处理,提取  $1\text{ kHz}$  以下的低频电流信号分量  $I_{LP}$ 。③ 利用带通滤波器获得频率为  $10 \sim 100\text{ kHz}$  范围的高频带电流信号分量  $I_{BP}$ 。④ 计算  $10 \sim 100\text{ kHz}$  高频带电流信号的能量值  $E_{BP}$ 。⑤ 计算电流低频分量的均方根值  $I_{RMS}$ 。⑥ 判断电流低频分量的均方根值  $I_{RMS}$  是否超出了门限阈

值  $TH_{I_{RMS}}$ : 如果没有超过门限阈值, 返回到步骤①, 开始下半个周期的电流信号的采集; 如果超出了门限阈值  $TH_{I_{RMS}}$ , 执行下一步。⑦ 判断 10 ~ 100 kHz 高频带电流信号的能量值  $E_{BP}$  是否超出了最高门限阈值  $TH_{E_{BP}}$ : 如果没有超过门限阈值  $TH_{E_{BP}}$ , 返回到上一步; 如果超出了门限阈值  $TH_{E_{BP}}$ , 执行下一步。⑧ 对电弧形式进行分类。⑨ 利用计数器对电弧燃弧的次数进行累计, 得到燃弧次数  $AEC$ 。⑩ 开启电弧燃弧时间的计时器, 得到燃弧时间  $T_{AF}$ 。⑪ 判断电弧燃弧时间  $T_{AF}$  是否超出了预设时间的门限阈值  $TH_{T_{AF}}$ : 如果燃弧时间超出了预设时间的门限阈值  $TH_{T_{AF}}$ , 将电弧燃弧次数计数器复位, 并且返回到步骤①; 如果燃弧时间没有超出预设时间的门限阈值  $TH_{T_{AF}}$ , 执行下一步。⑫ 判断电弧燃弧次数  $AEC$  是否超出了预设的次数门限阈值  $TH_{AEC}$ : 如果没有超出门限阈值  $TH_{AEC}$ , 返回到步骤①; 如果超出了预设次数门限阈值  $TH_{AEC}$ , 执行下一步。⑬ 向执行机构发出脱扣信号, 使断路器断开并切断电弧故障线路的电源系统。

### 3.2 国内电弧故障保护技术

2015 年 7 月公开了一个专利 (专利号: CN 201510157638) 涉及了一种利用被保护线路中的高频脉冲信号检测电弧故障的方法<sup>[4]</sup>。

具体的方法如下: ① 对被保护电路的相线和中性线之间的电压进行采样并处理得到高频脉冲信号, 对被保护的电路电流进行采样并处理得到电流半波信号。② 统计高频脉冲信号在每个工频周期内的脉冲个数  $G$ 、脉冲宽度和  $H$  以及最大脉冲宽度  $M$ 。③ 统计在每个工频周期内电流半波的波动系数  $S$ 、零体变化率  $L$  以及电流变化率最大值  $U_{max}$ , 其中  $U = di/dt$ , 任一工频周期内的零体变化率为相邻的工频周期的零体变化值与该工频周期的零体变化值之差再除以该工频周期的零体变化值。④ 选定一个采样时间窗, 一个采样时间窗包含若干个工频周期, 逐个对所述采样时间窗内的各工频周期进行判断, 当  $30G + 20H + 50M > 50\ 000$ , 则判定在一个工频周期产生了一个疑似故障信号。⑤ 继续统计在所述采样时间窗内的疑似故障信号的个数  $N$ , 当  $N \geq 9$ , 则判定发生疑似电弧故障。⑥ 再逐个对产生了疑似故障信号的工频周期进行判断, 当  $40L + 30S + 30U > 50\ 000$ , 则判定发生电弧故障。

## 4 电弧故障保护装置典型产品

### 4.1 国外电弧故障保护装置典型产品

西门子公司和 GE 公司分别生产出适用于单根线路的单极 AFCI 产品和适用于两根线路的双极 AFCI 产品, 如图 6 所示。单极 AFCI 产品内部结构主要由九大功能区组成, 如图 7 所示。

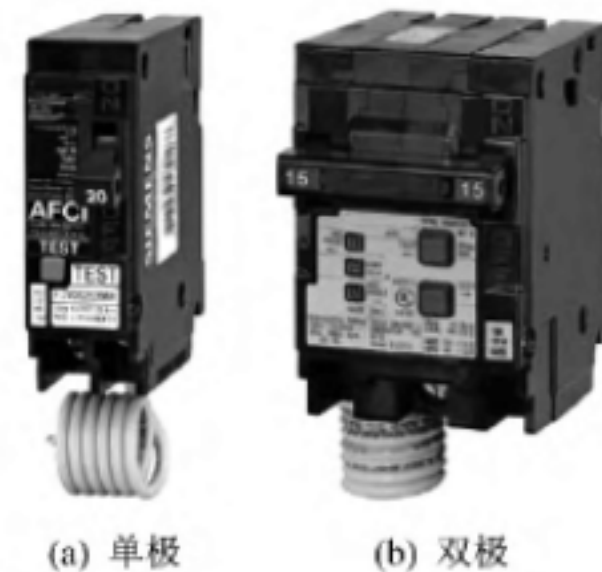


图 6 AFCI 产品外观

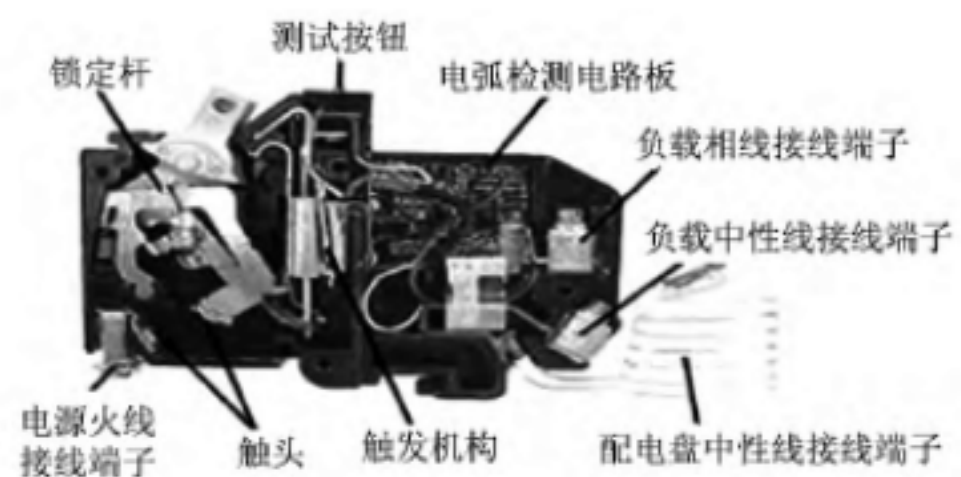


图 7 AFCI 内部结构

### 4.2 国内电弧故障保护装置典型产品

有代表性的产品是绵阳和瑞电子开发的电弧故障探测器 (Arc Fault Detector, AFD) 和 AFDD。

(1) AFD 由 AFD 单元结合小型断路器设计, 能对低压配电分支线路的短路、过流、漏电、电弧故障、过压、欠压保护等电气事故进行报警防范与保护。产品符合 3C 及 GB 14287.2/GB 14287.4 国家标准, 具有 LCD 实时数据显示和故障记忆功能, 并带有 RF 无线网络功能, 可通过 CAN bus 接入系统网络, AFD 外观如图 8 所示。

(2) AFDD 是由和瑞的 AFD 控制单元与 ABB、施耐德或西门子的小型断路器组合成的断路器, 额定电流为 16 ~ 32 A。产品能对供电线路中产生的短路、过载、漏电、过压、欠压及电弧故障进行检测并切断故障线路电源。产品符合 3C 及 GB 16917.1 国家标准还符合 AFDD 行业标准。产



图8 AFD 外观

品具有故障记忆和 LED 指示功能以及 RF 网络功能和电能管理功能, AFCI/AFDD 外观如图 9 所示。



图9 AFCI/AFDD 外观

(上接第 65 页)

总之,波形发生模块可以较好地重现试验电压、电流波形,尤其在电流失真率和零休时间方面,误差较小,电流上升率和电压失真率误差虽然较大,但平均的相对误差都在 10% 以内。

## 5 结 语

本文研制了一款新型碳化路径试验装置。该装置自动化程度高、操作方便、安全可靠,大幅度提高了试验效率。

利用本装置对具有电弧故障识别能力的断路器进行碳化路径试验。试验结果表明,试验装置具有检验 AFCI 的电弧故障识别能力的功能。

针对故障电弧的特征,利用失真率、零休时间和电流上升率等参数衡量波形发生模块的性能。试验结果表明,波形发生模块可以较好地重现电弧故障试验电压、电流波形。

### 【参考文献】

[1] 齐梓博,高伟. 串联故障电弧引燃特性试验研究

## 5 结 语

美国研发的电弧故障保护装置依据线路电流低频分量和高频分量的幅值来判断电弧的燃弧形式,并根据燃弧次数和每个电弧的持续时间判定是否发出断路器脱扣触发信号将线路电源切断。国内主要利用被保护线路中的高频脉冲信号检测电弧故障。本文介绍了电弧故障保护装置的基本原理以及国内外典型的专利产品,可以供国内研究与开发电弧故障保护装置参考。

### 【参考文献】

[1] SIEMENS. AFDD advanced preventative fire protection [C/OL]. <http://www.siemens.com/lowvoltage/afdd>.  
 [2] GB/T 31143—2014 电弧故障保护电器 (AFDD) 的一般要求 [S].  
 [3] RESTREPO C E, SREENIVASA K M, AGNIHOTRI K V, et al. Arc fault detection method and apparatus: US, 20120098672 A1 [P]. 2012-04-26.  
 [4] 莱茵斯 (厦门) 科技有限公司. 一种低压电弧故障检测方法和装置: 中国, 2015101576 38 [P]. 2015-07-22.

收稿日期: 2015-09-17

[C] // 2012 (沈阳) 国际安全科学与技术学术研讨会论文集, 2012: 272-278.

[2] 马少华, 郭家稳. 低压串联故障电弧的识别方法 [J]. 低压电器, 2013 (9): 12-16.  
 [3] ENGEL J C. Combination AFCIs: What they will and will not do [C] // Electrical Safety Workshop (ESW), 2012 IEEE IAS, 2012: 1-18.  
 [4] 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 on Electrical Contacts (HOLM), 2010: 1-11.  
 [5] UL 1699 Standard for safety for arc-fault circuit-interrupters [S]. 2011.  
 [6] 吴永亮. 故障电弧式碳化径迹试验装置: 中国, 201320034996. 9 [P]. 2013-01-21.  
 [7] 齐梓博, 高伟, 孟庆山, 等. 交流故障电弧模拟实验装置及其控制方法: 中国, 201410473666. 9 [P]. 2014-09-17.  
 [8] 郑昕, 许志红. 低压故障电弧的形态小波分析 [J]. 低压电器, 2013 (20): 1-4, 31.

收稿日期: 2015-08-18