

# 低压故障电弧检测概述

3

杨 艺, 董爱华, 付永丽

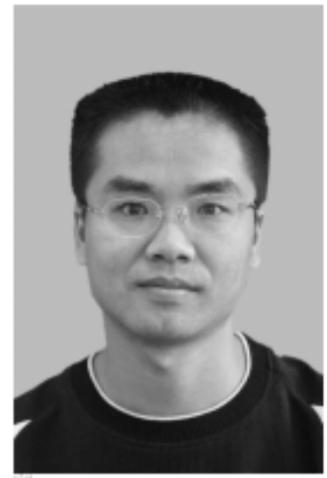
(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: 综述了目前故障电弧检测的研究内容、成果及发展方向。指出低压配电柜和家庭供配电系统各自产生故障电弧时所表现的物理特征不同,使得各自的故障电弧检测方法有所差异。分别讨论了基于电弧数学模型、电弧物理现象和电流电压波形的电弧检测方法。

关键词: 电气火灾; 故障电弧; 检测

中图分类号: TM 501+.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-2531(2009)05-0001-2

04



杨 艺 (1980—), 男, 讲师, 硕士, 从事电气火灾预警及信号检测与处理研究。

## Overview of Low Voltage Fault Arc Detection

YANG Yi, DONG Aihua, FU Yongli

(School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo454000, China)

Abstract: The present research, achievement and developing trend of fault arc detection were overviewed. That difference existed in fault arc detection because of the different physical characteristics of low voltage power distribution cabinet and home power supply and distribution system when fault arc occurred was indicated. Arc detection ways were discussed respectively based on arc mathematic model, arc physical phenomena and current/voltage waveforms.

Key words: electrical fire; fault arc; detection

## 0 引言

据 2005年的《中国消防年鉴》的最新统计, 2004年共发生火灾 142 568起, 其中电气火灾 2 948起, 占 20.7%。电气火灾导致 398人死亡, 427人受伤, 直接经济损失 4.8亿元, 占被调查火灾总损失的 42%。特大火灾中, 电气火灾 10起, 占总数 27起的 37%, 直接损失更是占到了 74%, 达到 2.1亿元<sup>[1]</sup>。故障电弧是引起电气火灾的罪魁祸首之一, 仅 0.5A 的电弧电流就足以引起火灾, 而 2~10A 的电弧电流就可以产生 2 000~4 000 的局部高温, 在低压开关设备中, 约 15ms内大气压力将上升到约  $2 \times 10^5 \sim 3 \times 10^5$  Pa。设备内的零部件(如门)在这样的高压力作用下就会脱离其固定机构并被掀开。高温还会使

某些物质熔化并蒸发产生大量的有毒气体。故障电弧还能造成设备的损坏, 若配电柜内部的电弧短路故障不及时消除, 还会发展成为中低压母线故障, 造成供电系统失稳、大面积停电、开关设备严重烧毁等灾难性后果, 甚至造成人身伤亡事故和重大的经济、财产损失。

## 1 故障电弧的定义及分类

当两电极间的电场强度足够大, 极间自由电子的运动能量撞击空气中的中性分子或原子并足以使其游离出更多带负电的自由电子和带正电的正离子时, 电场强度会进一步加强。在该电场中, 电子撞向阴极, 而正离子撞向阳极。若正离子的能量能使阴极游离出新的电子, 辉光放电就转化为弧光放电, 即形成电弧。由此可见, 电弧是一种

董爱华 (1955—), 男, 教授, 从事电气火灾预警及智能检测技术研究。

付永丽 (1984—), 女, 硕士研究生, 从事信号检测与信息处理的研究。

3 基金项目: 河南省科技攻关项目资助 (0624460012)

气体游离放电现象,也是一种等离子体。GERM 2 ER等的研究表明:接通过程产生的电弧与触头材料及电路电压有关,而分断电路过程产生的电弧还取决于电路的电流。交流电弧也有类似特性。

低压配电柜中产生的电弧常常是由于触头松动、切断电路等断开电路动作产生的。因低压配电柜中电流较大,所产生电弧特征十分明显。

家庭供配电线路中电流相对较小,产生的电弧的特性相对于配电柜而言较弱。家庭供配电系统中产生的电弧可分为正常电弧和非正常电弧(即故障电弧)两种。一般认为,电器的正常开关、插头插拔等操作引起的电弧属正常电弧;而触头松动、绝缘老化、击穿、接地故障等引起的电弧视为故障电弧。图 1 为故障电弧引起的电气损坏。这种区分仅仅是人为的分类,并不反应在任何物理参数上,这就给判断是否为故障电弧带来了较大的困难,同时也给检测方式和检测算法提出了较高的要求。



(a) 故障电弧引起的绝缘损坏



(b) 接触不良引起的接线柱碳化  
图 1 故障电弧引起的电气损坏

## 2 故障电弧检测的现状

要检测故障电弧首先需检测到电弧,然后考虑如何判断是否为故障电弧。目前,国内外电弧检测的方法大致可以归纳为 3 类:建立电弧模型,并通过检测相应的参量检测电弧;根据电弧发生时所产生的物理现象,如弧光、噪声、辐射、温度变化等检测电弧;根据电弧发生时的电

流、电压波形变化检测电弧。

### 2.1 基于电弧数学模型的检测方法

目前,在电弧焊和高压灭弧领域对电弧的应用及防治较多,对电弧所建立的数学模型在该领域也较多。而对于本文要研究的低压故障电弧而言,最接近的应该是空气开关电弧的数学模型。

从能量平衡原理出发,可得

$$dq/dt = egi - \rho \quad (1)$$

式(1)中,dq/dt为单位长电弧弧柱中能量的变化;egi为单位弧长的功率;i为电弧电流;e为弧柱中电场强度;\rho为单位长的功率损失。若引入电弧单位长电导g,则可得电弧现象的普遍数学模型

$$\frac{1}{g} \left[ \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{gge^2}{\rho} - \right) = \frac{1}{\rho} \left( \frac{ige}{\rho} - \right) \right], \quad (2)$$

$$= \frac{gg(dg/dt)}{\rho}$$

若令为电弧时间参数 $\tau_0$ ,\rho为电弧电压梯度E<sub>0</sub>,即可得到 Cassie电弧模型

$$\frac{1}{g} \left[ \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_0} \left( \frac{gge^2}{E_0} - \right) \right] \quad (3)$$

若令为电弧时间参数 $\tau_M$ ,\rho为电弧耗散功率,即可得到 Mayr 电弧模型

$$\frac{1}{g} \left[ \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_M} \left( \frac{ige}{\rho} - \right) \right] \quad (4)$$

上述 Cassie模型和 Mayr 模型分别是 1939年和 1943年提出的<sup>[2]</sup>,随着对电弧认识的进一步加深,以及 20世纪 50~80年代现代等离子体物理学的建立,先后出现了开关电弧的辐射数学模型、链式电弧模型、二维 MHD 电弧数学模型、三维 MHD 电弧数学模型、器壁侵蚀型电弧数学模型等<sup>[3]</sup>。

目前,低能直流电弧的数学模型主要应用于检测和设计本质安全型电路研究,建立了静态伏安特性模型、动态伏安特性模型和电流线性衰减模型<sup>[4]</sup>。

由于电弧数学模型使用条件的限制、检测参数多等困难,目前利用电弧数学模型进行故障电弧检测进展得十分缓慢,仅停留在仿真阶段<sup>[5]</sup>。但对电弧数学模型的研究能深入了解电弧本质,并对故障电弧的检测起到基础性作用。

### 2.2 基于电弧物理现象的检测方法

电弧产生时,会伴随着一些明显的物理现象,如弧光、噪声、辐射、温度变化等。

(1) 在配电柜中产生电弧,由于电流较大这些物理现象明显,表现为高温、高压、噪声和强烈的电弧光。

1998年SIDHU等人利用压力分区话筒(Pressure Zone Microphone, PZM)、红外线接收器及回路天线检测电弧放电时的噪声、热量及电磁辐射等特性,设计了一种电弧检测装置<sup>[62]</sup>。CORLISS和SLADE使用分光镜照相的方法,VOZGEL和MIYACHI使用光谱仪,KEY使用光谱仪和光学多通道分析器对弧光进行检测。TAKEUCHI等提出了使用两套彩色线阵CCD、分光镜和附加的滤光片组成检测系统,可得2个光谱强度在1个弧柱截面上的投影分布。随着多信息融合技术的逐渐成熟,基于故障电弧物理现象检测的可靠性也得到逐步提高<sup>[9]</sup>。

目前,利用电弧物理现象的故障电弧检测装置已有成套系统,如德国Moeller公司用于低压开关柜的故障电弧保护系统、芬兰Vaasa公司的VAMP系统等,都是基于检测电弧故障时发出的弧光以及过流双判据,提供快速而安全的母线保护,这为限制电弧故障损坏提供了一种有效的解决方案。由ABB公司研制的ARC Guard System,利用检测电弧故障所产生的特定弧光的频谱和电弧短路电流实现了对故障电弧的检测。金钟默勒公司研制的ARCON系统主要由光检测系统和电流检测系统组成。光检测系统用于检测故障电弧产生的弧光,并能实现电弧发生位置的定位;电流检测系统用于检测电流瞬时值是否达到所设阈值;当两个系统检测信号同时满足条件时,才认定有故障电弧产生。

(2) 家庭供配电系统基于电弧物理现象的检测方法大致与配电柜检测方法相同,但由于电弧的物理现象相对较弱,故所用传感器灵敏度相对较高,这同时给检测故障电弧带来了3个突出问题:由于传感器灵敏度较高,易造成故障电弧误报;检测点必须靠近电弧发生的位置,然而绝缘损坏、接地故障等引起的故障电弧很难预测其发生位置,这给检测带来极大不便;家庭供配电系统所产生的正常电弧或故障电弧都会产生

基本相同的物理现象,要区分开来较为困难。

### 2.3 基于电流电压波形的电弧检测方法

无论电流较大的配电柜或是电流较小的家庭供配电系统,在故障电弧情况下,电网中的电压和电流波形都会出现明显变化。因此,可利用电压电流的特性检测故障电弧。

(1) 配电柜系统中发生故障电弧时,电网电压、电流变化具有一定的规律性,电网电压会突然下降,电流上升。首先是电压急剧下降,持续时间 $10\mu s$ 然后按指数曲线上升,电压升高时间为 $100\sim 800\mu s$ 利用该规律设计的电子式电弧检测系统在Ostrava技术大学 $0.4kV$ 配电站,Detraroviec发电厂 $0.4kV$ 配电设备,Dakovang核电站 $0.4kV$ 分配电设备及煤矿 $0.5kV$ 配电设备上运行,效果良好。

(2) 家庭供配电系统产生故障电弧时,电流电压波形与负载情况有关。分别就纯感性负载、纯电阻性负载和阻感性负载做了定性研究。当负载为电阻和阻感性时,电弧的电流电压波形如图2、3所示。

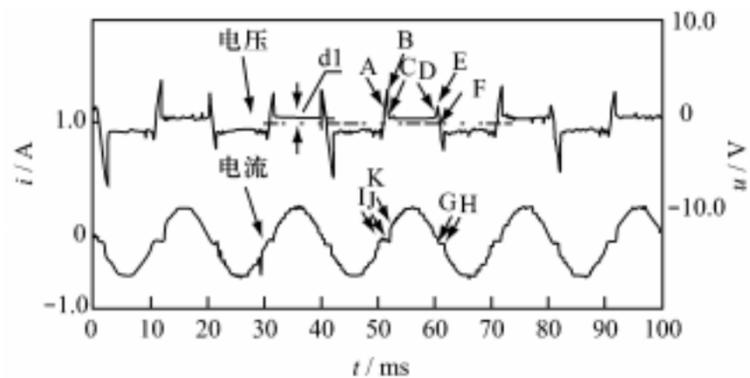


图2 电阻性负载的电流电压波形

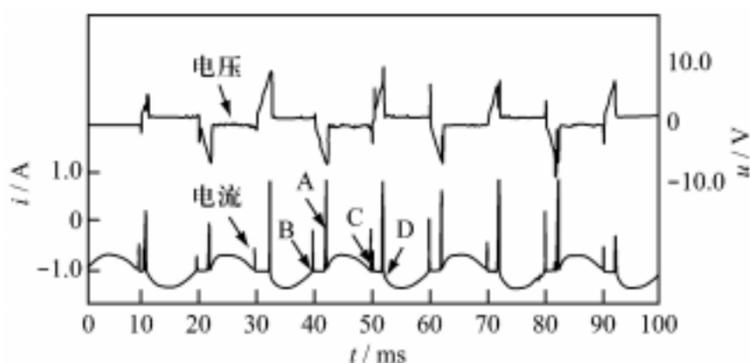


图3 阻感性负载的电流电压波形

当负载为电阻时(见图2),两电极间电压达到A时电弧起燃,直到C点电弧正常燃烧,D点电弧开始熄灭,F点完全熄灭。到负半周期电压值反向增加,又会击穿气隙,电弧重燃。电弧燃烧和熄灭的一个周期内,电流波形出现两个电流短

暂为零的区域。很多电弧检测原理就是检测这两个奇异点。当为阻感性负载时 (见图 3), 由于电感的储能作用, 在电压发生突变的地方电流会出现更加明显的突变, 这为电弧的检测提供了方便。

利用电弧的电流电压检测电弧最成功的是电弧故障断路器装置 (Arc Fault Circuit Interrupter, AFCI) 和技术。AFCI 装置的提法首先于 1993 年在美国出现。2004 年 8 月 1 日以后, 美国市场销售的家用空调要求必须带具有 AFCI 功能的电源插头。2003 年 GREGORY 等人在研究电弧的特性基础上, 给出了电弧故障断路器装置的设计原理, 该装置可对接触松动、接地电弧、相间漏电等原因引起的电弧故障进行检测和报警<sup>[1023]</sup>。

在文献 [14] 中详细地给出了 AFCI 的检测原理及软硬件设计。首先将某一周期的电流量取绝对值相加, 求取平均值; 然后将此周期的平均值与前一周期的平均值相比较, 若差距大于一个门限值, 就认为产生了一个电弧; 最后根据当时电压和电流的关系, 运用傅里叶变换法则, 得到负载的相位角状态, 判断出负载的类型, 从而得出电弧的产生属于正常或异常的判断。这种检测方式只对突变信号灵敏, 当电弧正常燃烧时, 电流的波形保持稳定, 不会产生突变, 检测算法失效。且电路中其他原因引起的电流突变可能致使误报和漏报。另外, 该算法需要通过负载的相位角判断负载类型, 同时与存储的负载特性比较, 由此判断检测到的电弧是正常电弧还是故障电弧, 这带来了两个困难: 需对所有的电器进行特性研究, 并将其归纳到相位角参数上; 检测设备要有足够的存储空间, 且查询、比对、判断速度要快。然而在电器不断增多的今天, 很难把所有电器的特性研究清楚, 而且电器的种类越多所需的存储空间越大, 查询比对速度相应要变慢。因此, 这种算法不具有普遍性。

由于交流电弧的电流波形在过零时会周期性地发生畸变, 而周期信号便于用傅里叶分解来分析谐波成分, 因而确定故障电弧的特有谐波成分也是一种理想的检测方法。JAMES 等人将傅里叶分解、神经网络等理论引入到直流电弧检测中, 得到了较为准确的结果<sup>[15216]</sup>。

把电弧电流信号的周期性畸变看作是信号的奇异性点, 这就是利用小波变换分析电弧信号的

基本出发点。韩国学者比较了 db 4 (daubechies 4)、syn 5 (synlets 5)、bior 3. 1 (biorthogonal 3. 1) 及 coif 4 (coiflets 4) 这 4 种母波, 最后选择 db4 作为母波。

本文在大量实验基础上采用了具有双正交性、紧支撑性的正交二次样条小波作为母小波, 并通过分析信号中是否具有周期性奇异性点来判断电路是否发生故障电弧, 得到了较好的效果<sup>[17]</sup>。

利用电弧的电流电压检测故障电弧易于实现, 且检测位置受限制较小, 已成为目前的研究热点。但由于电网中存在与故障电弧的电流电压波形相似的波形, 如单相全波整流电路在交流侧所产生的电压波形类似故障电弧的电压波形。因此, 如何有效区分电流电压的波形畸变是否由故障电弧引起是一个重要的问题。

### 3 故障电弧检测的发展方向

在配电柜中, 由于故障电弧检测点固定, 电弧物理现象十分明显, 故检测方法主要是利用弧光和电流瞬时值。在家庭供配电系统中, 由于检测点不固定, 电弧物理现象相对较弱, 检测方法多采用检测电流电压波形来实现。

目前, 对故障电弧检测的研究基本还停留在电弧发生后再检测。能否有效地对故障电弧实施预警, 即在电弧发生之前实现故障电弧检测, 将是故障电弧检测的一个新课题。已有研究表明, 电弧燃弧前, 空气会被击穿从而产生超声波, 通过对超声波的检测可以达到故障电弧预警的目的。

多信息技术的融合是故障电弧检测发展的另一个主要方向。运用神经网络、模糊数学等先进的信息融合理论, 综合弧光、噪声、辐射、温度变化、电流电压变化的信息, 必将有利于对故障电弧实施快速有效的检测。

#### 【参 考 文 献】

- [1] 毕妍, 施艺飞, 王力伯. 电弧故障引发电气火灾的原因和预防技术 [J]. 消防技术与产品信息, 2007 (4): 44-46
- [2] 黄绍平, 杨青, 李靖. 基于 MATLAB 的电弧模型仿真 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17 (5): 54-56

(下转第 27 页)

这里采用开放数据库互连 (Open Database Connectivity, ODBC)。ODBC 技术为访问不同类型的 SQL 数据库提供了通用接口。ODBC 是基于结构查询语言的, 以此作为访问数据的标准。

## 4 结 语

低功耗数控接触器配合无线编码收发模块, 由组态通信软件进行操作的控制系统可以成功解决上述工业控制柜中功率放大机构较多、体积大、结构复杂、功耗高、噪音大、连线繁琐等缺陷<sup>[5]</sup>, 并在低压电器的数字化、智能化发展方向中进行了探索, 为低压电器产品在自动化领域的应用研究打下了基础。

## 【参 考 文 献】

- [1] 马国华. 监控组态软件及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [2] 刘津平, 刘昊, 刘玉洁. 低功耗数控接触器的设计 and 应用 [J]. 低压电器, 2007 (23): 20-24.
- [3] 刘昊, 刘津平, 刘玉洁. 一体化数控接触器的设计与实现 [J]. 低压电器, 2008 (5): 19-23.
- [4] 王亚明. 组态软件设计与开发 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [5] 刘津平. 低功耗数控接触器及其组成的控制系统 (说明书): 中国, ZL2005100216420 [P]. 2006.21.22.20.

收稿日期: 2008 21 22

(上接第 4 页)

- [3] 李兴文, 陈德桂. 空气开关电弧的数学模型及其特性的研究综述 [J]. 高压电器, 2007, 43 (4): 269-273.
- [4] 孟庆海, 牟龙华, 林伯泉. 低能电弧放电模型比较分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31 (2): 201-203.
- [5] 康健. 接地故障电弧的精确数字仿真及其计算 [J]. 继电器, 2002, 30 (5): 16-18.
- [6] SIDHU T S, GURDEEP S, SACHDEV M S. A new technique for detection and location of arcing faults in power system apparatus [C] // IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1998: 185-188.
- [7] SIDHU T S, GURDEEP S, SACHDEV M S. Protection of power system apparatus against arcing faults [C] // 1998 IEEE Region 10th International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control, USA, 1998, 2: 436-439.
- [8] SIDHU T S, SACHDEV M S, SAGOO G S. Detection and location of low level arcing faults in metal clad electrical apparatus [C] // 7th International Conference on Developments in Power System Protection Conference Publication, London, 2001: 157-160.
- [9] 赵杰, 李新福, 潘立冬, 等. 低压电器电弧投影温度场的重建 [J]. 低压电器, 2006 (6): 72-10.
- [10] GREGORY G D, SCOTT G W. The arc fault circuit interrupter, an emerging product [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34 (5): 162-168.
- [11] GREGORY G D, WONG K, DVORAK R F. More about arc fault circuit interrupters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, July/August, 2004, 40 (4): 145-152.
- [12] ARUNACHALAM S, DONG B. A parametric model approach to arc fault detection for DC and AC power systems [C] // Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2007: 115-122.
- [13] KOLKER D, CAMPOLA S, DISALVO N. A study of time/current characteristics of the ignition processes in material caused by electrical arcing for application in 240 V AC Fault Circuit Interrupters [C] // Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2007: 105-114.
- [14] 罗雷, 刘晖. 新型家用电弧故障断路器的开发 [J]. 建筑电气, 2006 (2): 12-17.
- [15] MOMOH J A, KUMAR D M V. LabVIEW based implementation for DC arcing of remedial faults in a spacecraft [C] // Power Engineering Society General Meeting, 2003 (1): 491-498.
- [16] MOMOH J A, BUTTON R. Design and analysis of aerospace DC arcing faults using fast Fourier transformation and artificial neural network [C] // Power Engineering Society General Meeting, 2003 (2): 788-793.
- [17] 董爱华, 杨艺. 基于小波奇异性检测原理的故障电弧在线检测的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2007 (4): 561-564.

收稿日期: 2008 20 22