

电弧故障保护电器动作特性测试分析系统

苏晶晶,许志红

(福州大学 电气工程与自动化学院 福建省新能源发电与电能变换重点实验室,福建 福州 350116)

摘要:针对电弧故障保护电器动作特性测试项目多、操作复杂、试验效率低等问题,研究了一种电弧故障保护电器动作特性测试分析系统。利用电磁开关设计综合试验电路,以开关的状态作为控制和观测量,实现综合试验电路的自动化控制及其状态监测;采用基于电压和机械位移量的机电耦合反馈控制策略,改善电弧故障模拟装置的运行性能,提高电弧故障模拟的成功率;同时,上位机平台对下位机硬件设备的运行状态进行控制和监测,并实时采集电弧电压和电流波形。测试系统不仅能够实现对电弧故障保护电器动作特性的自动测试,还具有波形采集与存储、测试报告自动生成等功能,大幅度提高试验的自动化水平和试验效率,减少测试过程中人为因素的干扰,为进一步研究故障电弧的形成机理与故障电弧检测技术奠定基础。

关键词:特性测试;电弧故障保护电器;故障电弧;功能配置;反馈控制

中图分类号:TP 23;TM 501⁺.2

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201910006

0 引言

电弧故障保护电器 AFDD(Arc Fault Detection Device)是一类新型的保护装置,该装置通过检测电弧电流,将其与火灾危险动作值进行比较,当电弧电流超过火灾危险动作值时断开被保护电路^[1-2],防范电气火灾。因此,研发 AFDD 的关键技术是准确识别故障电弧并及时切除故障线路。为了验证 AFDD 动作的可靠性和稳定性,有必要对 AFDD 的动作特性进行标准化测试。

2015 年国家标准 GB/T 31143—2014《电弧故障保护电器(AFDD)的一般要求》正式实施,标准对 AFDD 的极限动作值及其动作特性的测试方法提出了明确的要求。进行 AFDD 动作特性测试时,需要将产品接入带电弧的线路中,并检测产品能否在规定的时间内脱扣。因此,测试结果的有效性与测试设备产生的故障电弧有直接关系。根据标准要求,电弧故障模拟装置产生的电弧应该满足 AFDD 动作特性测试的需求,即在不接入 AFDD 产品的情况下,当试验电弧电流小于 75 A 时电弧的燃弧时间应该超过 AFDD 极限动作值;当试验电弧电流大于 75 A 时,0.5 s 内电弧电流半波数应该超过 AFDD 在 0.5 s 内允许的最大半波数。

利用 2 个带电电极在接通或分离瞬间产生电弧是常用的电弧故障模拟方法^[3-6]。然而,引发故障电弧的原因与用电系统的实际运行工况有关。拉弧装

置一般适用于模拟触头拔插、接线端子接触不良、导线断裂、开关电器触头分合闸等原因产生的电弧现象,而对于其他故障如导线绝缘表皮老化、破损、并联金属性短路等引发的故障电弧却不再适用。文献[7]利用电缆碳化装置模拟因电缆破损、老化、碳化引起的串联电弧现象;文献[8]分析了并联金属性电弧故障产生的原因,设计了切割电缆试验装置,用于模拟相间金属性短路电弧故障;文献[9]研制了 3 类电弧故障发生装置,并实现了对电弧电压、电流的采集。上述装置解决了电弧故障模拟的难题,然而这些装置的目的是产生故障电弧,借此研究故障电弧的形成机理和检测技术,并未考虑 AFDD 动作特性测试的需求,且试验过程复杂、试验效率低。文献[10-12]对 AFDD 测试方法进行了探讨,提出了 AFDD 动作特性验证的试验设想。AFDD 动作特性测试的试验项目和负载种类多,每个试验项目都有与之对应的试验电路,接线复杂,操作繁琐;同时,故障电弧随机性强,燃弧过程具有不确定性;这些问题导致试验的耗时长,结果一致性差。因此,有必要改进试验手段和方法,提高试验效率和试验结果的可靠性。

本文将集成化设计方法和反馈控制策略引入 AFDD 动作特性测试分析系统的设计中,利用电磁开关之间的切换和组合设计综合试验电路,以开关的状态作为反馈量实现系统运行状态的跟踪和过程控制,并以燃弧位置端电压和执行机构的位移量作为电弧故障模拟装置的反馈控制量,改善装置的运行性能,提高试验的成功率和重复性;系统整体功能由上位机进行远程调控,同时采集、分析线路电压、电流和 AFDD 动作状态,实现对 AFDD 动作特性的在线测试。

收稿日期:2018-11-20;**修回日期:**2019-08-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707039);福建省科技厅产学研合作项目(2016H6008)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51707039) and the Production-Study-Research Cooperation Project of Science and Technology Department of Fujian Province(2016H6008)

1 测试分析系统的整体方案

为了实现 AFDD 动作特性测试过程的自动化,本文利用串口通信和高速数据采集卡作为媒介,使得 AFDD 动作特性测试分析系统的上位机平台和下位机硬件资源协同工作,系统的原理框图如图 1 所示。

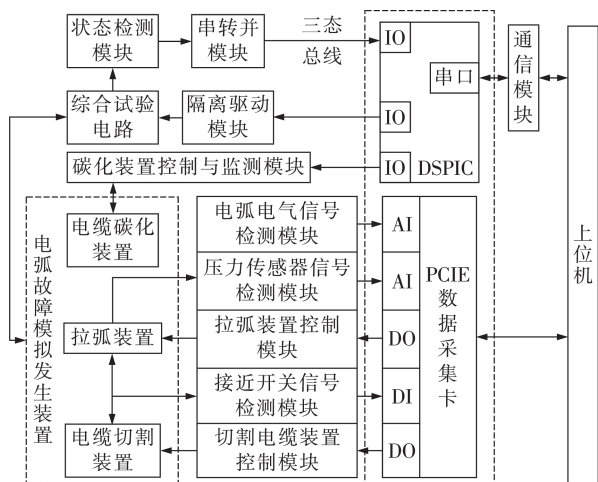


图 1 系统原理框图

Fig.1 Schematic diagram of test system

以数字信号控制器 DSPIC 为核心的控制单元,通过通信模块实现下位机与上位机之间传递综合试验电路的控制及其状态指令,经由隔离驱动模块和状态监测模块控制综合试验电路的电磁开关动作,自动组合成测试项目对应的电路,并执行各个操作步骤。以 PCIE (Peripheral Component Interconnect Express) 数据采集卡为核心的控制单元,通过数字通道实现对 3 种电弧故障模拟装置运行过程的控制和状态监测,同时通过模拟输入通道实时采集电弧电气信号。上位机为系统的控制中枢,根据试验配置自动提取综合试验线路功能信息网络的有效信息形成操作指令,实现对综合试验电路和电弧故障模拟装置的控制及其实时状态监测,并对电弧电压、电弧电流、拉弧装置电极之间的压力值进行检测与分析。此外,上位机还具有过程信息存储、波形显示与分析、测试报告生成与打印等功能。

2 测试分析系统的设计

2.1 集成化的综合试验电路

综合试验电路采用集成化的设计理念进行设计。利用电磁式开关将 AFDD 动作特性涉及的全部试验电路进行集成,功能信息网络由各类测试项目的有效开关序列与操作流程指令构成,以程序流的形式存储于上位机,功能信息网络结构见附录 A 中的图 A1。软硬件相互配合自动组合生成独立试验电路,如附录 A 中的图 A2 所示。以突发串联故障电

弧试验为例,当前功能信息网络中的有效开关序列为 1、5、6、7、8、9、10 时,对应的执行流程为:

(1) 控制全部有效开关闭合,无效开关序列保持断开,上位机实时采集线路电流和电压,并调制程控电阻使得线路电流达到设置的试验电流;

(2) 断开 KM_5 ;

(3) 断开 KM_9 ,接入已碳化后的电缆试品,出现电弧现象;

(4) 当 AFDD 脱扣或燃弧时间达到标准规定的 AFDD 极限分断时间限值时,断开全部开关,一次试验结束。

为了确保测试系统能够正常工作,避免综合试验线路出现短路或开路故障,本文采用基于开关状态信息的反馈控制方式对综合试验线路的运行过程进行控制并监测运行状态,控制流程图见附录 A 中的图 A3。试验时,上位机接收线路实际运行状态指令并进行解码,将解码后的指令与功能信息网络对应步骤进行对比,若二者匹配则继续执行操作;否则进入等待状态直至超时报警并结束试验。

2.2 基于反馈控制策略的电弧故障模拟装置

2.2.1 电弧故障模拟装置的工作原理

电弧故障模拟装置由电缆碳化装置、拉弧装置和电缆切割装置组成,结构示意图如附录 A 中的图 A4 所示。

电缆碳化装置是利用 2 kV/300 mA 高压回路制备碳化导线使其绝缘表皮破损处形成稳定的碳化路径通道,当试验电流通过导线时将产生电弧,实现对电线因绝缘破损、老化而碳化时引发的电弧故障的模拟,适用于串联、并联电弧故障试验,如图 A4(a) 所示。为了快速确定碳化效果,以灯泡的亮度作为判断依据。基于大量试验,确定稳定碳化路径通道形成时的亮度经验参数,当亮度满足经验参数时,认为碳化成功,系统自动将碳化导线接入综合试验电路中,否则进行二次碳化。

拉弧装置、电缆切割装置是以 2 种步进电机作为动力装置的装置。拉弧装置利用电极分离至一定距离时产生的电弧现象模拟因触头松动、接线端子接触不良、电线断裂等引发的电弧故障,结构如图 A4(b) 所示。电缆切割装置是利用钢制刀片前后切割 2 根带电导线从而产生电弧,用于模拟相间导体短路引发的并联电弧故障,结构如图 A4(c) 所示。图 A4(b)、(c) 中,接近开关起到限位保护,避免电极和刀片的位移超程,造成机械损坏。试验前,拉弧装置、电缆切割装置的执行结构都必须进行自检和复位。利用拉弧装置进行试验时,在可移动电极开始向固定电极方向移动前,系统将预先检测压力传感器初始压力值 F_0 (单位为 N)。在两电极接触运动过程中,系统将实时检测压力传感器的实际值并与初

压力进行对比。通过大量试验可知,当电极间的实时压力值大于 $F_0 + 0.1 \text{ N}$ 时,表明两电极已良好接触。拉弧时,移动电极沿相反方向平移,当两电极分开一定距离时产生电弧。利用电缆切割装置进行试验,在试验前,装置将自检并确定刀片已处于初始最高位置。试验时,刀片由电机牵引向下垂直运动,当刀片切割内侧电缆的导体与其接触后,将与外侧电缆的导体产生电弧性接触。

2.2.2 反馈控制策略

试验发现,采用给定速度的开环控制方式常常无法产生满足 AFDD 动作特性测试需求的故障电弧,图2为未引入反馈控制策略下,拉弧装置和电缆切割装置试验波形图。

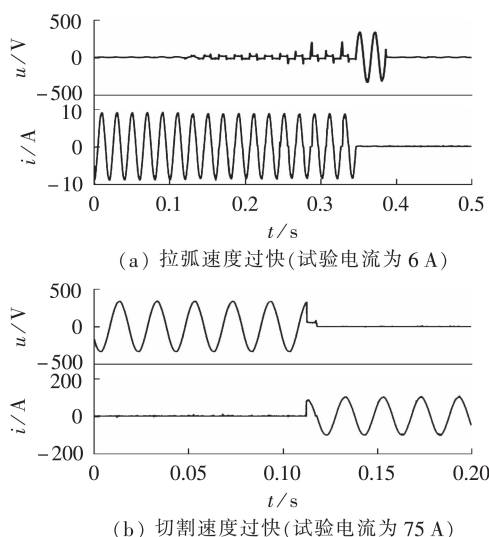


图2 未引入反馈控制方式时的试验波形

Fig.2 Experimental waveforms without feedback control

由图2可见,当拉弧速度过快时,虽然能够产生电弧,但是电弧燃弧时间短,电极将快速分开;当切割速度过快时,刀片将快速与两电缆接触,导致不起弧或最多只有一个半波的电弧电流,无法满足 AFDD 动作特性测试需求。同时,试验还观察到当拉弧速度太慢时,将出现起弧困难的现象,即使能够成功起弧,由于拉弧时间过长将难以采集到完成的试验数据,且在燃弧的初始阶段,电弧波形特征微弱,这一阶段的电弧无法使得 AFDD 动作;同时,在大电流下,如果拉弧速度太慢,电极间的拉力不足以抵抗电弧力,一旦 AFDD 不起保护作用,电弧将无法熄灭,导致电极熔焊;如果切割速度太慢,刀片切割力度可能不足以破坏电缆绝缘表皮,导致试验耗时长,甚至引起电机堵转。

针对电弧故障模拟时起弧困难、燃弧稳定性差、持续时间短等问题,将基于燃弧位置电压和执行机构位移量的闭环反馈控制策略引入电弧故障模拟装置的控制中,以产生符合标准的故障电弧,如图3

所示。

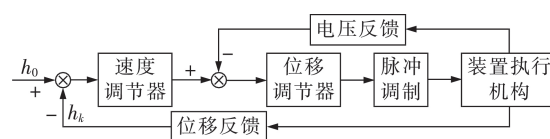


图3 反馈控制策略结构图

Fig.3 Structure diagram of feedback control strategy

位移调节器和速度调节器采用增量式比例-积分-微分(PID)算法实现,其数学模型^[13]为:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (1)$$

其中, $u(k-1)$ 、 $u(k)$ 分别为 $k-1$ 、 k 时刻 PID 控制器的输出值。

根据 PID 控制原理可知:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{m=0}^k e(m) + K_d (e(k) - e(k-1)) \quad (2)$$

进一步推导可以得到:

$$\Delta u(k) = A e(k) + B e(k-1) + C e(k-2) \quad (3)$$

其中, $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 分别为 k 、 $k-1$ 、 $k-2$ 时刻 PID 控制器输入信号的偏差值; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数; $A = K_p + K_i + K_d$; $B = -K_p + 2K_i$; $C = K_d$ 。

由于拉弧装置和电缆切割装置的执行机构运动行程、速度、方向分别与步进电机的总转角、转速、转向直接相关,因此,由步进电机控制原理^[14]可知,执行机构的位移量正比于输入控制脉冲个数 N ,当执行机构移动 $L(\text{mm})$ 时所需脉冲个数为:

$$N = L / d = 360 N_s L / (\theta_0 l_0) \quad (4)$$

其中, θ_0 为步距角; N_s 为细分数; l_0 为丝杆导程; d 为脉冲当量, $d = \theta_0 l_0 / (360 N_s)$ 。执行机构的运动方向取决于电机的转向,运行速度取决于控制脉冲频率 f 。

$$f = N_s v / l_0 \quad (5)$$

其中, v 为执行机构的运动速度。

以电缆切割装置的控制过程为例,以电缆两端的电压和刀片位移量作为反馈量实现对装置工作过程的控制,其工作示意图见附录 A 中的图 A5。在一次试验过程中,装置的工作过程分为下行和上行 2 种模式。

(1) 工作模式 1: 刀片下行,切割电缆。由于刀片的实际总位移量受电缆试品规格和装设位置的影响,而电缆规格多样且安装位置可调,这给刀片位置跟踪带来了困难。为了提高系统的通用性,刀片初始位置固定为 h_0 。由式(4)可实时计算刀片下行时实际位移量 Δh 及其所在高度 h_{down} 。

$$\begin{cases} \Delta h = N_{\text{down}} d \\ h_{\text{down}} = h_0 - \Delta h \end{cases} \quad (6)$$

其中, N_{down} 为刀片向下运行时上位机输出的脉冲

步数。

刀片向下移动且未与两电缆接触时,线路无电流,电缆两端电压为正弦波形,其有效值为电源电压 U_s ,见图 A5(a),这一阶段刀片加速下行。

当刀片与电缆产生电弧接触时,两电缆之间的电压波形将近似马鞍形且呈现动态变化,有效值明显低于 U_s ,见图 A5(b)。在速度调节器和位移调节器的作用下,刀片降速并限制切割位移量。AFDD 未脱扣时,电弧将间歇性燃烧。等待 AFDD 脱扣或切割时间超过 0.6 s 时,综合试验电路的全部开关将断开,刀片将执行工作模式 2。

(2)工作模式 2:刀片复位。在试验开始前和试验结束时,需要将刀片复位至初始位置,以确保装置正常运行。复位时,综合试验电路已经停止工作,此时线路电压和电流均为 0,且不存在动态变化过程,如图 A5(c)所示;此时,以当前刀片的高度 h_{up} 为状态观测量,刀片加速上行。当 $h_{up}=h_0$ 时,刀片停止移动。

$$h_{up}=h_{down}+N_{up}d \quad (7)$$

其中, N_{down} 为刀片向上运行时上位机输出的脉冲步数。

3 测试分析系统的性能分析

3.1 电弧故障模拟装置性能及波形分析

为了验证引入反馈控制策略后电弧故障模拟装置的性能,在阻性负载下进行试验,3 种装置的试验现象、电压 u 、电流 i 及其对应的时频谱图 f_w 、 f_i 波形如附录 B 中的图 B1—B3 所示,上位机界面如附录 B 中的图 B4 所示。

对比图 B1、B2 可见,相对于拉弧装置而言,因电缆碳化产生的故障电弧,燃弧过程平稳,从起弧阶段至线路断开,电弧电压呈现马鞍形具有明显的燃弧和熄弧尖峰,电流波形存在零休期且周期性明显;然而,因电极间隙空气击穿而产生电弧受电极间距和拉弧速度的影响,且拉弧装置产生故障电弧波形具有明显的阶段性特点。在初始拉弧阶段,电极间隙窄,电弧电压波形近似矩形,无明显的燃弧和熄弧尖峰,电弧电流仍为正弦波,零休期短。随着电极分离距离不断增大,电弧现象愈加明显,燃弧尖峰和熄弧尖峰随之增大,电压波形近似马鞍形,电弧电流零休期也逐渐延长,直至两电极分开距离增大至电源电压无法维持电弧燃烧时,电弧熄灭。根据电压、电流时频分析图可见,电缆碳化装置产生的电弧,其时频特征相对稳定,而拉弧装置产生的电弧故障电压、电流随着燃弧越加炽烈,高频段能量逐渐增大,呈现增长的趋势。

电缆切割装置产生的故障电弧与前述 2 类电弧不同,其在 1 个电源周期内存在半波丢失现象,如图

B3 所示。这是由于刀片与电缆产生电弧接触时,其刃口和电缆导体切口处将因电弧高温而被侵蚀,使得刀片与电缆间隙过大,电弧熄灭;当刀片再次与电缆产生电弧接触时,电弧重燃;刀片与电缆之间非持续性的电弧接触使得电弧具有间断性。由时频分析图可见,在电弧间断性燃烧过程中,电压、电流波形的高频段能量明显高于正常时,说明此时信号中存在高频噪声。

综上所述,发生电弧时,燃弧位置端电压和线路电流的时频特性将发生突变,据此可以作为故障电弧检测的依据。图 B1、B2 的燃弧时间分别为 1.2 s、2.8 s,图 B3 在 0.5 s 内共有 12 个电弧电流半波数,满足试验电流在 6 A 和 75 A 时的测试需求。在不同试验电流下进行试验,结果显示基于反馈控制策略的电弧故障模拟装置能够得到较好的故障电弧模拟效果,且燃弧时间和 0.5 s 内的电弧电流半波数能够达到 AFDD 动作特性测试规定的极限动作值。

3.2 AFDD 动作特性标准化测试

本文研制的 AFDD 测试分析系统目前已经在国内某检测机构正式投入运行。通过对多批次 AFDD 产品动作特性的标准化试验,实现了测试系统的整体性能的验证,试验结果显示系统运行良好,给 AFDD 动作特性测试试验带来了方便,节省了试验时间和人工投入,提高了试验的成功率。进一步地,以额定电压为 AC 230 V、额定电流为 32 A 的样机作为被测对象,对测试系统的整体功能进行说明。

首先,使用电缆碳化装置进行突发、闭合和接入 3 类串联电弧故障试验,试验电路如图 4 所示。试验电流 I_{set} 分别为 3 A、32 A,每类项目在不同电流下分别重复试验 3 次,3 种串联电弧故障试验结果中的 1 组波形如图 5 所示。由图可见,AFDD 均能脱扣并且脱扣时的燃弧时间分别为 0.174、0.206、0.106 s。其余串联电弧试验的结果参见附录 C 中的表 C1,通过对每次试验进行计时可以发现单次试验时间不超过 1 min。

接着,利用电缆切割装置进行切割电缆并联电弧试验,试验电路如图 6 所示,试验电流为 75~500 A。图 7 给出了试验电流为 150、300 A 的试验波形图。由图可见,在 0.5 s 内电弧燃弧半波数达到 6、3 个时,AFDD 脱扣。其他电流等级下的试验结果如附录 C 中的表 C2 所示。可见,被测样机在不同的试验电流

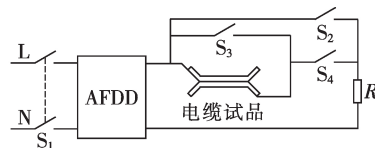


图 4 串联电弧故障试验电路

Fig.4 Circuit of series arc fault experiment

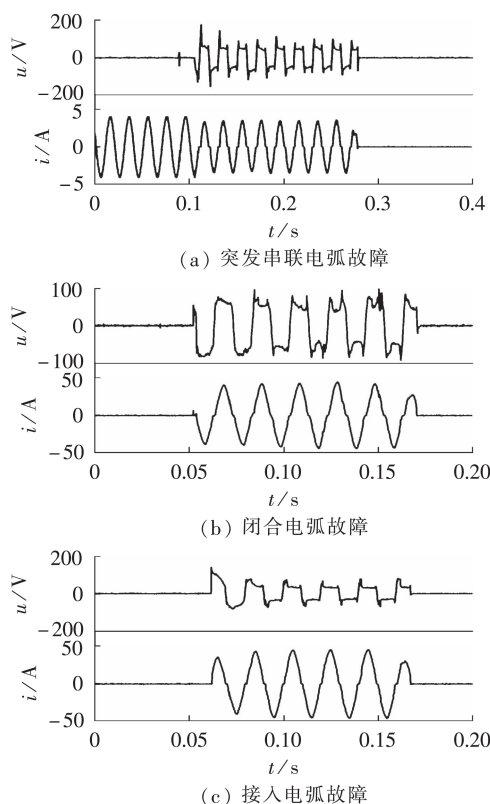


图5 串联电弧故障试验波形

Fig.5 Waveforms of series arc fault experiment

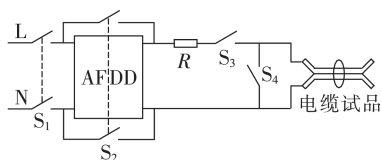


图6 切割电缆并联电弧故障试验电路

Fig.6 Circuit of cable cutting parallel arc fault experiment

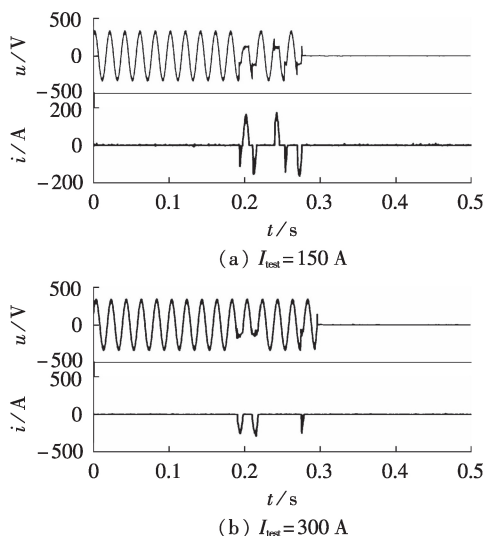


图7 切割电缆并联电弧故障试验波形

Fig.7 Waveforms of cable cutting parallel arc fault experiment

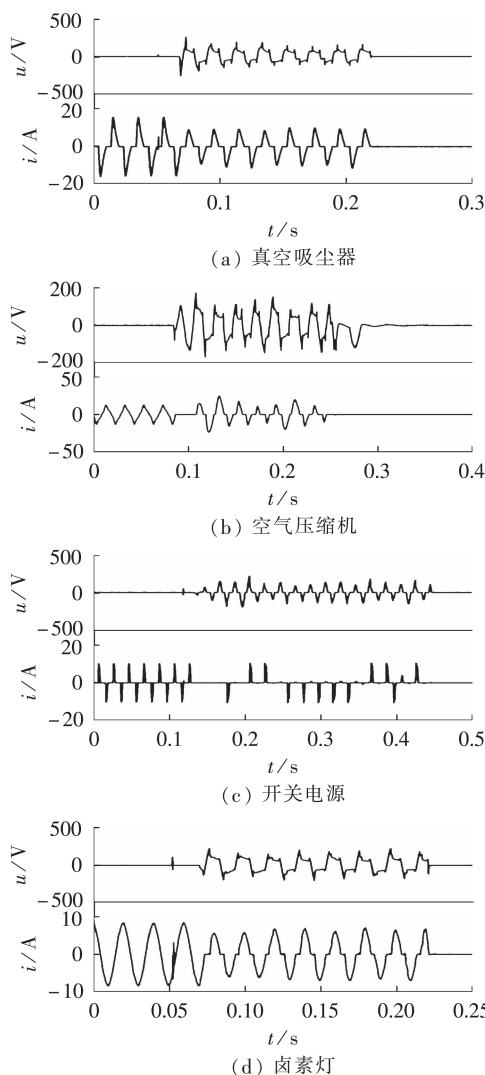
下进行切割电缆并联电弧故障试验时,能在标准要求0.5 s内最大允许的半波数内脱扣。通过对每次试验过程计时发现,单次试验耗时均不超过90 s,其中刀片向下运行和复位时间耗时较长。

然后,利用拉弧装置进行带抑制性屏蔽负载试验,实验负载包括真空吸尘器、空气压缩机、开关电源、卤素灯、荧光灯等,试验电路如图8所示。图9为部分负载试验波形图。由图可见,不同性质和容量的负载下,电弧电流大小和波形特性将发生改变,这与屏蔽负载自身工作原理有关。因此,配置A的试验电流取决于负载的工作电流,本文利用插值方法确定当前试验电流AFDD极限动作值。AFDD极限动作值、脱扣时实际电弧燃弧时间见附录C中的表C1。



图8 带抑制性屏蔽负载试验电路

Fig.8 Circuit of shielding loads experiment



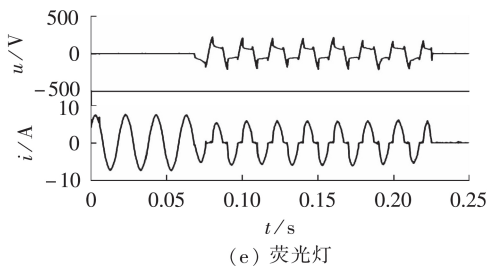


图9 带抑制性屏蔽负载试验的部分波形(配置电路A)

Fig.9 Waveforms of shielding loads experiment with Configuration Circuit A

此外,系统还可以进行串扰和误脱扣试验,试验结果见附录C中的表C1—C3。根据试验结果可知,被测样机在各项试验中都能够标准规定的极限动作值内脱扣,起到保护作用,因此本文研制的系统的测试结果与标准AFDD产品的出厂结果一致。

4 结论

本文提出了一种基于集成化设计理念和反馈控制策略的AFDD动作特性测试分析系统,对系统的设计方案和控制策略进行了深入的研究;利用该系统对不同原因引发的电弧现象进行分析,并对AFDD产品的动作特性进行测试。

(1)试验结果表明,3种电弧故障模拟均能够产生满足AFDD动作特性测试需要的标准电弧,且不同装置形成的电弧存在差异性,这些差异可以作为电弧检测与判别的依据;同时,AFDD测试分析系统能够实现了对AFDD产品的动作特性的标准化测试。

(2)本文研制的测试系统解决了传统测试方法存在的接线复杂、操作繁琐、试验耗时长、效率低、人为干扰等问题,具有理论和实际意义,为进一步研究故障电弧检测与识别技术奠定了试验基础。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘官耕,杜松怀,苏娟,等. 低压电弧故障防护技术研究与发展趋势[J]. 电网技术,2017,41(1):305-313.
LIU Guangeng, DU Songhuai, SU Juan, et al. Research on LV arc fault protection and its development trends[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 305-313.
- [2] 全国低压电器标准化技术委员会. 电弧故障保护电器(AFDD)的一般要求:GB/T 31143—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [3] 王晓远,高森,赵玉双. 阻性负载下低压故障电弧特性分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):106-110,118.
WANG Xiaoyuan, GAO Miao, ZHAO Yushuang. Characteristic analysis of low-voltage arc fault in resistive load conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 106-110, 118.
- [4] GEORGIJEVIC N, JANKOVIC M, SRDIC S, et al. The detection of series arc fault in photovoltaic systems based on the arc current entropy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5917-5930.
- [5] 林方圆,苏建徽,赖纪东. 光伏系统直流故障电弧识别方法研究[J]. 电工电能新技术,2015,34(12):7-13.
LIN Fangyuan, SU Jianhui, LAI Jidong. Study on detection method of DC arc fault in PV systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(12): 7-13.
- [6] 马少华,鲍洁秋,蔡志远,等. 基于信息维数和零休时间的电弧故障识别方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2572-2579.
MA Shaohua, BAO Jieqiu, CAI Zhiyuan, et al. A novel arc fault identification method based on information dimension and current zero[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2572-2579.
- [7] JOVANOVIĆ S, CHAHID A, LEZAMA J, et al. Shunt active power filter-based approach for arc fault detection[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 141: 11-21.
- [8] SU Jingjing, XU Zhihong. The design of detection and analysis system for low voltage arc fault[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Reliability of Electrical Products and Electrical Contacts. Changshu, China: [s.n.], 2017: 68-73.
- [9] QI ZI, GAO WEI, ZHANG YINGCONG. The development of electric arc fault simulation test device[J]. Procedia Engineering, 2013, 52: 297-301.
- [10] 吴艾伦. 电弧故障保护电器(AFDD)串联、并联电弧故障试验及抑制性负载屏蔽试验方法[J]. 电器与能效管理技术, 2018(10): 60-67.
WU Ailun. Discussion about series and parallel arc fault test and inhibitive load shielding test for AFDD[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(10): 60-67.
- [11] 卢建渠,荣耀峰,刘峥炜. 电弧故障保护电器(AFDD)自动化实验和检测技术的探索[J]. 电器与能效管理技术, 2015(21): 37-40.
LU Jianqu, RONG Yaofeng, LIU Zhengwei. Automatic testing and measuring technology exploration of AFDD[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(21): 37-40.
- [12] SU Jingjing, XU Zhihong. Design of test system for arc fault protection switch[C]//Proceedings of 2018 3rd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG). Yilan, China: [s.n.], 2018: 1-4.
- [13] 袁铮,王海全,孙治国. 高精度步进电机脉冲分配器设计[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 63-66.
YUAN Zheng, WANG Haiquan, SUN Zhiguo. Design of high precise impulse distributor of multistage stepmotor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 63-66.
- [14] 朱嵘涛,武洪涛. 基于增量式PID算法的直流电机调速系统[J]. 仪表技术与传感器, 2017(7): 121-126.
ZHU Rongtao, WU Hongtao. Design of DC motor speed regulation system based on incremental PID algorithm[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(7): 121-126.

作者简介:



苏晶晶

苏晶晶(1986—),女,福建龙岩人,博士研究生,主要研究方向为电器及其智能化技术(E-mail: 365193676@qq.com);

许志红(1963—),女,山西临汾人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电器及其智能化技术(E-mail: 641936593@qq.com)。

Test and analysis system for action characteristics of arc fault detection device

SU Jingjing, XU Zhihong

(Fujian Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion,
School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: To solve problems of a large variety of test items, complicated operation and low efficiency of test, a test and analysis system for action characteristics of AFDD (Arc Fault Detection Device) is researched. A comprehensive test circuit is designed by using electromagnetic switches, and its automation control and monitoring are realized with the switch states taken as controlling and observed quantities. The electromechanical coupling feedback control strategy based on voltage and mechanical displacement is used to improve the operation performance of arc fault simulator, and the success rate of arc fault simulation is improved. Simultaneously, the running state of the hardware equipment of the lower computer is controlled and monitored by the upper platform, and the arc voltage and current are collected in real time. The system can not only complete the automation test for action characteristics of AFDD, but also have functions of waveform acquisition and storage, test report automatic generation and so on, which greatly improves the test automation level and efficiency, reduces the interference of human factors and lays a foundation for further research on the formation mechanism of arc fault and arc fault detection technology.

Key words: property test; arc fault detection device; arc fault; function configuration; feedback control

(上接第180页 continued from page 180)

Formation of restoration path scheme considering line restoration in groups

ZHOU Guangqi, LI Shaoyan, GU Xueping, LIANG Haiping

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The restoration path of transmission line after a major blackout is an important task in the restoration process of power system, and reasonable restoration path and charging mode will help the system to recover quickly and safely. Combined with the theoretical analysis and simulation, the limit charging distance of the transmission line under typical parameters is given. Aiming at the given restoration path, the method of line restoration in groups is proposed to shorten the system's recovery time, and the integer linear programming model is established with the least number of groups as its objective. At the same time, the recovery reliability index is defined to optimize the grouping scheme when a certain restoration path has multiple line restoration schemes. In order to provide multiple alternative path schemes for operators, an integer linear programming model of the first K optimal restoration paths based on the network flow theory is established. Efficient commercial optimization software is used to jointly solve the optimization model of first K paths and the model of line restoration in groups to obtain the first K optimal path schemes and their grouping operation schemes. The results of an example show that a reasonable line charging scheme can speed up the system recovery process on the premise of ensuring the recovery safety.

Key words: system restoration; transmission line restoration operation; limit charging distance; line charging in groups; integer linear programming

附录 A

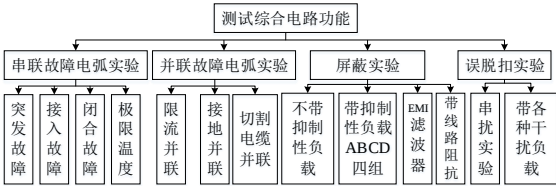
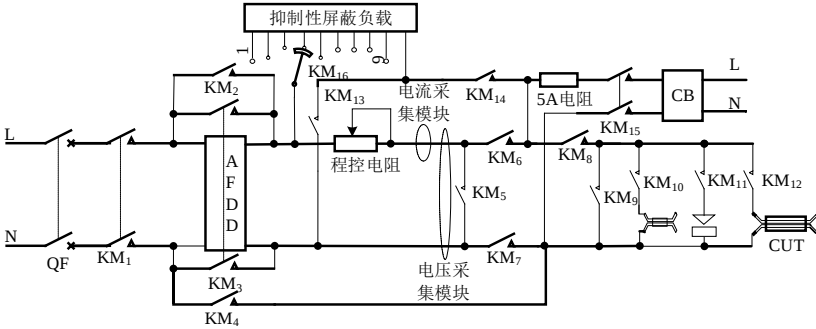


图 A1 综合试验电路功能信息网络结构

Fig.A1 Structure of functional information network of integrated test circuit



QF—进线断路器；KM—接触器；CT—电流传感器；PT—电压传感器；CB—串扰试验用断路器；
TH—电缆碳化装置；LH—拉弧装置；CUT—电缆切割装置

图 A2 综合试验电路

Fig.A2 Integrated test circuit

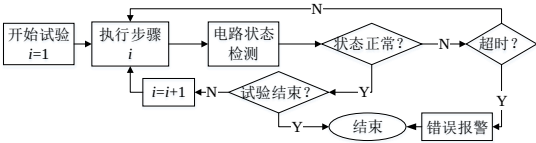
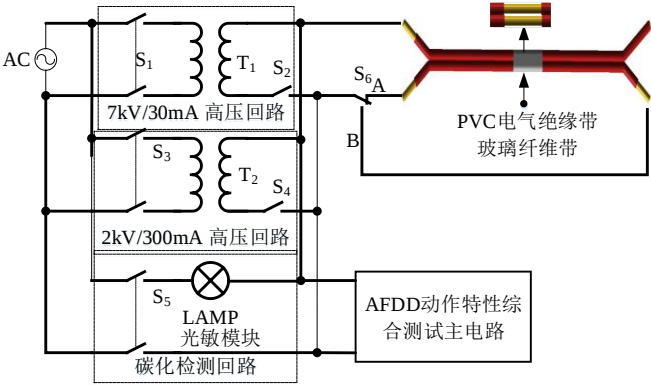
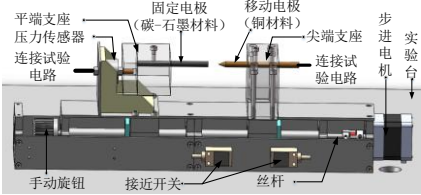


图 A3 综合试验电路控制流程图

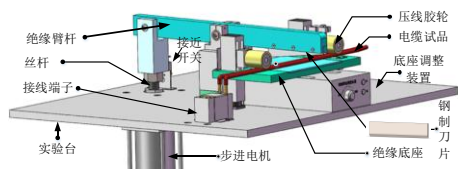
Fig.A3 Control flowchart of integrated test circuit



(a) 电缆碳化装置结构



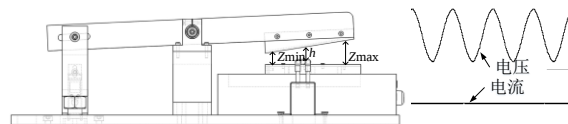
(b) 拉弧装置结构



(c) 电缆切割装置结构

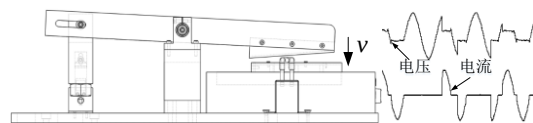
图 A4 电弧故障模拟装置结构

Fig.A4 Structure of arc fault simulation device

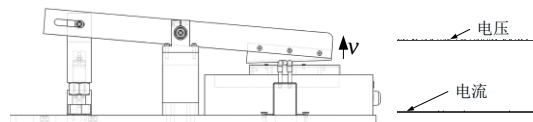


$Z_{\min}$: 刀片允许移动的最小高度, $Z_{\max}$: 刀片允许移动的最大高度

(a) 刀片从初始位置向下移动



(b) 刀片切割电缆时



(c) 刀片复位时

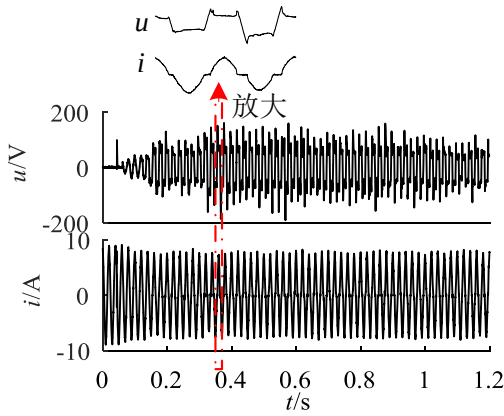
图 A5 电缆切割装置工作示意图

Fig.A5 Working diagram of cable cutting device

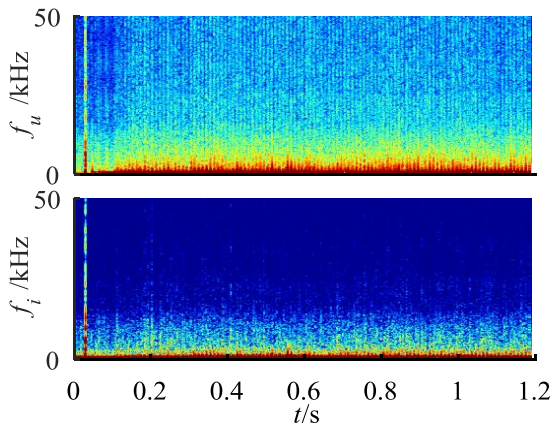
附录 B



(a) 试验现象



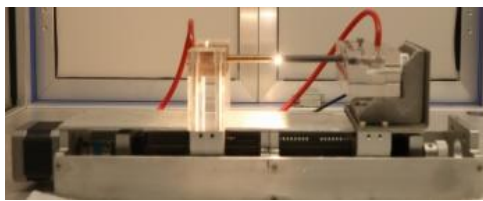
(b) 电压、电流波形



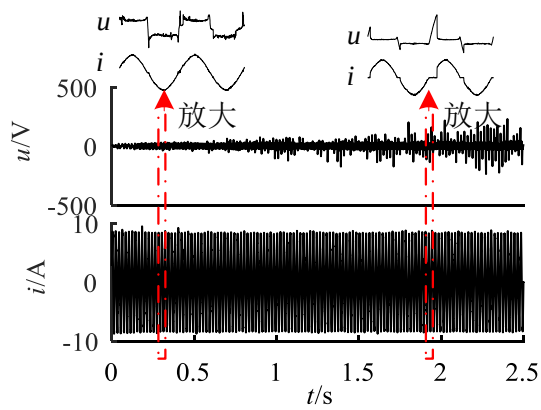
(c) 电压、电流时频波形

图 B1 电缆碳化装置试验现象及波形

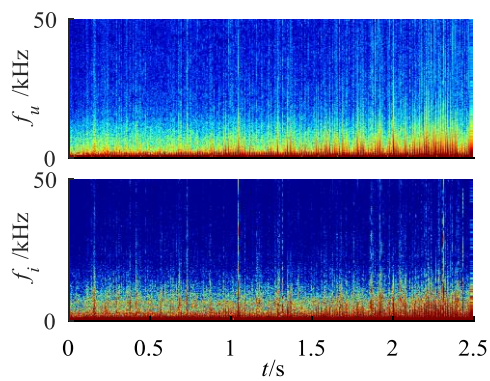
Fig.B1 Experimental phenomenon and waveforms of cable carbonization device



(a) 试验现象



(b) 电压、电流波形



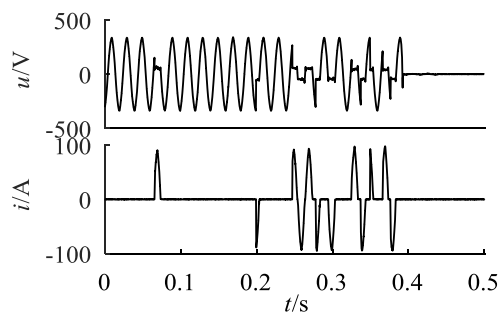
(c) 电压、电流时频分析

图 B2 拉弧装置试验现象及波形

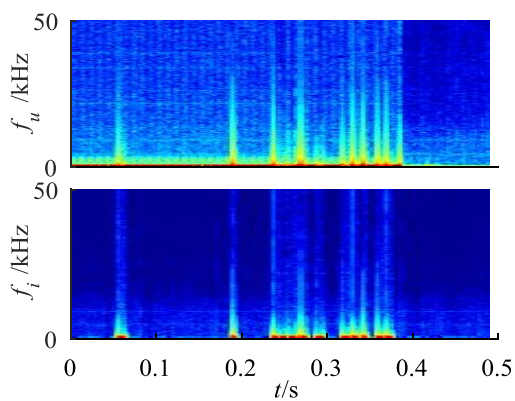
Fig.B2 Experimental phenomenon and waveforms of arc generator device



(a) 试验现象



(b) 电压、电流波形



(c) 电压、电流时频分析

图 B3 电缆切割装置试验现象及波形

Fig.B3 Experimental phenomenon and waveforms of cable cutting device

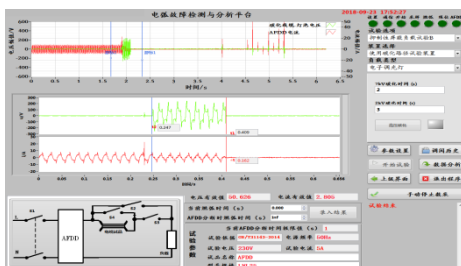


图 B4 上位机平台

Fig.B4 Upper computer platform

附录 C

表 C1 $I_{\text{test}} < 75\text{A}$ 时的试验结果

Table C1 Experimental results when $I_{\text{test}} < 75\text{A}$

试验项目	负载类型	试验电流 /A	极限动作值/s	脱扣时燃弧时间/s	
突发串联 电弧故障	电阻	3	1.000	0.174	
		32	0.250	0.085	
接入串联 电弧故障	电阻	3	1.000	0.206	
		32	0.250	0.106	
闭合串联 电弧故障	电阻	3	1.000	0.374	
		32	0.250	0.119	
接地电弧 故障	电阻	3	1.000	0.026	
不施加抑 制性负载	电阻	3	1.000	0.155	
施加抑 制性负 载屏 蔽试 验	电 路 配 置 A	真空吸尘器	7.5	0.446	0.161
		空压机	7.6	0.443	0.152
		卤素灯	5.6	0.567	0.152
		荧光灯	5.1	0.650	0.157
		开关电源	4.0	0.833	0.293
	电 路 配 置 B	真空吸尘器	10.5	0.339	0.166
		空压机	10.6	0.336	0.336
		卤素灯	8.6	0.407	0.407
		荧光灯	8.1	0.425	0.425
		开关电源	7.0	0.464	0.150
	60° 调光灯	5.4	0.600	0.160	
		90° 调光灯	5.2	0.633	0.169
		120° 调光灯	4.9	0.683	0.161
	电 路 配 置 C	真空吸尘器	10.5	0.339	0.157
		空压机	10.6	0.336	0.156
		卤素灯	8.6	0.407	0.165
		荧光灯	8.1	0.425	0.168
		开关电源	7.0	0.464	0.194
	电 路 配 置 D	真空吸尘器	10.5	0.339	0.157
		空压机	10.6	0.336	0.155
		卤素灯	8.6	0.407	0.155
		荧光灯	8.1	0.425	0.178
		开关电源	7.0	0.464	0.160
		60° 调光灯	5.4	0.600	0.160
90° 调光灯		5.2	0.633	0.154	
120° 调光灯	4.9	0.683	0.164		
EMI 屏蔽 试验	1 号 EMI	3.0	1.000	0.178	
	2 号 EMI	3.0	1.000	0.190	
线路阻抗 屏蔽试验	铠装电缆	3.0	1.000	0.180	

表 C2 $I_{\text{test}} \geq 75\text{A}$ 时的测试结果

Table C2 Experimental results when $I_{\text{test}} \geq 75\text{A}$

试验项目	负载	试验 电流/A	0.5s 内允许的 电流半波数/个	实际半 波数/个	样品 状态
接地电弧 故障	电阻	75	12	2	脱扣
限流并联 电弧故障	电阻	75	12	9	脱扣
		100	10	9	脱扣
		75	12	12	脱扣
		100	10	10	脱扣
切割电缆 并联电弧 故障	电阻	150	8	6	脱扣
		200	8	3	脱扣
		300	8	3	脱扣
		500	8	3	脱扣

表 C3 误脱扣试验结果

Table C3 Results of unwanted tripped test experiment

试验项目	负载类型	AFDD 动作情况
串扰	5A 电阻	燃弧时间 1.8s，试品不脱扣。
	真空吸尘器	
	空压机	在不接入电弧发生装置时进行试
带各种干扰	卤素灯	验。每种负载运行 5s 且反复启动/
负载	荧光灯	停止 5 次，试验过程中，AFDD 样
	开关电源	品不会脱扣。
	调光灯	