故障电弧模拟测试系统及不确定因素的研究

金 闪,许志红

(福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350108)

摘要:针对低压系统故障电弧问题设计了一套故障电弧模拟测试系统,该系统含有上位机模块、下位机控制 模块等,可以实现切割电缆、碳化路径及点接触3种类型故障电弧输出。同时,采用 Logistic 识别算法作为故 障电弧保护电器检测的辅助判据。通过对系统中存在的不确定因素进行分析,选取切割电缆模块中的切割 速度、电缆线径与电流幅值,以及点接触模块中的拉弧速度与接触面积作为主要影响因素进行研究。研究表 明,在特定条件下电流零休时间会呈现趋势性变化,改变单一条件可使其变化1 ms 左右。依据研究结果选 取最合适的起弧条件,以提高故障电弧保护电器检测结果的准确性。

关键词:故障电弧;模拟测试系统;Logistic 识别算法;零休时间 中图分类号:TM 501⁺.2 文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.030

0 引言

在低压系统中,由于导线老化、接触不良或者断 裂等原因会产生间歇性起弧的情况,这种现象称为 故障电弧^[1-3]。故障电弧持续性燃烧会产生极高的 温度,并散发大量热量,从而引起电气火灾,造成不 必要的损失^[4-6]。由于故障电弧的特性,传统的过流保 护装置、剩余电流保护器无法对其进行有效的检测^[7-8]。

目前针对故障电弧的研究集中在 2 个方面。一 是电流波形识别,如文献[9]基于故障电流相平面 信息维数与电流零休时间 2 个特征,利用支持向量 机方法建立电弧识别模型;文献[10]对故障电流数 据进行 Chirp-Z 变换得到低频谱信号,求取低频谱中 平均值、噪声水平的平均值、偶次谐波值等作为判断 故障电弧的特征值。二是研制故障电弧的模拟装 置,如文献[11]和文献[12]分别设计了基于 LabVIEW 的故障电弧发生装置和电弧故障断路器 测试平台;文献[13-14]对碳化路径装置进行了研究 与制作;文献[15]研制了一套用于串并联故障电弧 实验的电弧发生装置,能够模拟故障电弧的输出并 对电气参数进行采集和分析。

已有研究基本都是依照国家标准来研制故障电 弧发生装置,但标准中对于许多起弧条件并未进行 明确的规定,而这些不确定的起弧条件对于起弧过 程产生的影响尚未明确,也没有相关资料能够进行 借鉴。因此本文依照国家标准自行研制了故障电弧 模拟测试系统,在所设计的模拟系统能够满足燃弧

收稿日期:2017-12-06;修回日期:2018-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277031);福建省 科技厅产学合作项目(2016H6008)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277031) and the Production Science Cooperation Program of Fujian Provincial Department of Science & Technology (2016H6008) 要求的前提下,对切割电缆与点接触起弧过程中存 在的不稳定因素进行分析,重点探讨不同燃弧条件 下零休时间的改变情况及其变化趋势,依据试验结 果提出进一步提高故障电弧模拟测试系统的控制稳 定性的思路。

1 故障电弧模拟测试系统

本文参照 GB/T 31143—2014《电弧故障保护电器(AFDD)的一般要求》自主设计并制作切割电缆、碳化路径和点接触 3 类电弧发生装置,并与上位机联合协作,构成一套故障电弧模拟测试系统,结合不同家用电器负载模拟各种实际情况下的故障电弧波形。将 Logistic 故障电弧识别算法融入系统中,作为故障电弧保护电器检测结果的辅助判据。

1.1 故障电弧发生装置

切割电缆故障电弧发生方式如图 1 所示,将被 试电缆串联在回路中,利用刀片以一定角度进行切 割来产生电弧。实际电缆切割装置如附录中的图 A1 所示,其依靠步进电机带动机械部分实现切割过程。



Fig.1 Schematic diagram of fault arc generated by cutting cable

点接触故障电弧发生装置由压敏传感器、光电 传感器、步进电机和电极构成,实际装置如附录中的 图 A2 所示。其中,点接触故障电弧发生装置主要通 过缓慢分离铜电极与碳-石墨电极产生电弧,步进电 机作为横向调节装置,压敏传感器与光电传感器主 要用于控制整个运动过程。

碳化路径主要模拟电缆老化产生碳化通道的过

程。点接触与碳化路径同属于串联电弧故障试验内容,因此将2种起弧模块设计在同一装置上,装置台面左边为碳化电缆试品接线柱,右边为点接触故障电弧发生模块,实际装置如附录中的图A3所示。

1.2 模拟测试系统整体结构

国标 GB/T 31143—2014 中围绕 3 种故障电弧 发生类型规定了串联电弧故障试验、并联电弧故障 试验、屏蔽试验及误脱扣试验等内容,为简化试验电 路,本文设计了如图 2 所示的故障电弧模拟测试系 统。整个模拟测试系统由上下位机协作调控,通过 控制接触器将所需要的故障电弧类型接入主电路, 再根据标准规定的试验电路,切换相应的接触器达 到预期效果。



图 2 故障电弧模拟测试系统电路图

Fig.2 Circuit diagram of arc fault simulation test system

1.3 Logistic 识别算法

故障电弧模拟测试系统搭建完成后,需要采集 大量的试验负载。这些试验负载种类繁多、波形复 杂,需要借助识别算法进行分析和判断。虽然故障 电弧模拟测试系统以测试为主,但识别算法的融入 可以间接提高电弧故障断路器的性能指标,具有很 重要的作用。

Logistic 回归模型是研究观察结果和影响因素 之间关系的多变量分析方法,可在一系列状态特征 参量下给出事件发生的概率。设因变量 Y 为取值为 0 或 1 的二分类变量, X_1, X_2, \dots, X_n 为 n 个影响 Y 的 自变量,在 n 个自变量的共同作用下 Y 发生的概率 $P = P(Y = 1 | X_1, X_2, \dots, X_n)$,则定义 Logistic 回归模 型为:

$$P = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}$$
(1)

其中, β_0 为常数项; β_1 、 β_2 、…、 β_n 为回归系数。

将概率 P 进行 logit 变换后的回归模型可用线 性形式表示为:

$$\ln \frac{P}{1-P} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \qquad (2)$$

由于 Y 是二分类变量,在 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的 给定条件下服从两点分布,则 $\beta_j(j=0,1,2,\dots,n)$ 一 般取最大似然函数为:

$$L(\boldsymbol{\beta}_{i}) = \prod_{i=1}^{n} P_{i}^{Y_{i}} (1 - P_{i})^{1 - Y_{i}}$$
(3)

其中, P_i 为第i例样本下事件发生概率; Y_i 为第i例 样本下的二分量取值。

对式(3)取对数可得:

$$\ln L(\beta_i) = \sum_{i=1}^{n} \left[Y_i \ln P_i + (1 - Y_i) \ln(1 - P_i) \right] \quad (4)$$

对式(4) 求一阶导数并令其等于 0, 求其最大 值, 再利用牛顿迭代法求解方程组, 解出 β_j 的估计 值。令 Z=logit P, 当 P 取值为 0.5 时, 若 Z>0 则判 定为故障发生, 若 Z<0 则判定为正常状态。

选取小波能量值、平均值、有效值、峰峰值与波 峰系数作为 Logistic 回归模型的自变量,考察调光灯 90°导通角正常与故障时各变量的统计量,结果如图 3 所示。由图 3 可见:由于故障电弧发生时,调光灯 的导通角发生了变化,且大部分都小于原导通角,因 此故障情况下的小波能量明显小于正常情况下的小 波能量,而平均值与有效值都明显大于正常值;由于



图 3 调光灯波形统计量比较

Fig.3 Comparison of statistics of dimming lamp waveforms

电弧本身起阻抗的作用,使得电流峰值降低,而波峰 系数为峰峰值与有效值的比值,因此波峰系数也随 之降低。

利用 SPSS 统计分析软件构造 Logistic 回归模型,经过多元共线性检验与拟合优度检验,确保模型的合理性,得到的回归模型为:

$$Y = -2.867 + 52.274K_1 - 10.524K_2 +$$

$$0.193K_3 - 210.303K_4 + 224.365K_5 \tag{5}$$

其中,K₁、K₂、K₃、K₄、K₅分别为小波能量值、平均值、 有效值、峰峰值与波峰系数。

分别取热水壶、电钻、吸尘器、日光灯、卤素灯负载故障波形各 5 例样本,作为回归模型检测样本,检测结果如表 1 所示。由表 1 可见,在 25 例负载波形样本的检测中,共发生 2 例误判,正确率为 92%,说明 Logistic 回归模型具有较高的准确性。

表1 不同负载样本预测结果

Table 1 Predicting results of different load samples

负载类型	样本数	误判数	正确率/%
热水壶	5	0	
电钻	5	1	
吸尘器	5	1	92
日光灯	5	0	
卤素灯	5	0	

2 模拟测试系统不确定因素分析

经过设计的故障电弧模拟测试系统能够满足 3 类故障电弧输出并完成各种试验过程,但是电弧本 身具有不稳定性,系统中存在的不稳定因素更是会 影响整个燃弧过程,从而影响故障电弧保护电器的 检测结果。因此需要研究影响燃弧过程的主要影响 因素并加以限定。

2.1 切割电缆过程

切割电缆过程中可能对燃弧过程产生影响的因 素有很多,综合考虑后选取切割速度、电缆线径与电 流幅值这3个最直接的影响因素进行考察。由于切 割电缆产生的电弧极其剧烈,因此利用高速摄像机 拍摄其燃弧过程并进行分析。

在 220 V/50 Hz、7 A 纯阻性电路、电缆线径为 4.46 mm、切割速度为 0.105 mm/s(步进电机转速) 的条件下进行试验,结果如图 4 所示,其中,图 4(a) 为慢速拍摄情况下所得电弧形态,图 4(b)—(f)均 为高速摄像机拍摄的电弧形态,图片正下方为起弧 位置。图 4(a)中的电弧呈现为强光、熔融颗粒喷 溅,电弧持续时间可达 1~2 s;图 4(b)为刀片与电缆 铜芯接触最初 3~4个周期内的电弧形态,电弧由起 弧点向上方喷出,白色点状物实质为钢制刀片因高 温熔融后喷出的金属颗粒物;图 4(c)为 3~4 个起弧 周期后的电弧形态,此时已无金属颗粒物喷出,燃弧 相对稳定,喷弧长度最大可达 6 cm 左右;图 4(d)、 (e)为1个周期内的熄弧与燃弧情况,通过高速摄像 机相关参数可以计算出熄弧与燃弧之间的时间间隔 为几毫秒,在此期间的电流值都接近于0,即为电弧 特有的零休现象;图4(f)也处于熄弧期间的电弧形 态,但由于持续燃弧后对空气不断进行加温,使得起 弧点温度极高,电弧无法像图4(d)中一样完全熄灭。



(d)电弧形态 3 (e)电弧形态 4 (f)电弧形态 5图 4 切割电缆故障电弧形态

Fig.4 Forms of fault arc generated by cutting cable

从电弧形态可以粗略得知燃弧时间与电弧形状 等信息,而对于不同燃弧条件,故障电流波形最能反 映电弧的变化,特别是电弧零休时间这一特征,能够 直接测量并说明故障电流波形的细微变化。

设置电缆线径为4.46 mm、电流幅值为7A,切 割速度分别设置为0.10 mm/s、0.25 mm/s与0.50 mm/s,截取每种速度下的部分故障电流波形图,如 图 5 所示。由图 5 可以粗略看出,随着切割速度的 增加,零休时间随之增长。经过计算,0.10 mm/s、 0.25 mm/s与0.50 mm/s切割速度下连续10个半波 的零休时间平均值分别为1.867 ms、2.164 ms与 2.620 ms,据此可以得到初步的结论为零休时间随 着切割速度的增加而增加。

为探究上述初步结论是否为偶然现象,继续增加试验组,并对电流幅值、切割速度与电缆线径进行 交叉匹配,同样计算每种组合方式下连续10个半波 的零休时间平均值,列于表2。

分析表2可以得出如下结论:

a. 在相同电缆线径与电流幅值下,故障电流零 休时间随着切割速度的增大会有所增加,增加的时 长最大可以达到1 ms 左右;

b.相同电缆线径与切割速度下,零休时间随电流幅值增加没有发生趋势性变化;

c.相同切割速度与电流幅值下,零休时间与电缆线径没有明显相关性但存在差异性,即不同线径之间的零休时间存在差别,最大达到1ms左右。



208

Fig.5 Waveforms fault current when cable diameter is 4.46 mm and current amplitude is 7 A

表 2 不同电缆线径、切割速度和电流下的零休时间

Table 2 Arc intervals under different cable diameters, cutting speeds and current amplitudes

切割速度/ (mm·s ⁻¹)	电缆线径/ - mm	零休时间/ms					
		电流幅值 为 5.0 A	电流幅值 为 7.0 A	电流幅值 为 8.5 A			
	2.84	2.886	2.463	2.377			
0.10	3.82	2.380	2.436	2.973			
	4.46	1.786	1.867	2.153			
	2.84	3.236	2.821	2.891			
0.25	3.82	2.894	2.857	3.125			
	4.46	2.736	2.164	3.033			
	2.84	3.974	3.204	3.209			
0.50	3.82	3.390	3.234	3.426			
	4.46	2.820	2.620	3.211			

对零休时间随着切割速度的增大而变长这一现 象继续分析发现,其主要原因在于燃弧的剧烈程度。 不同切割速度下,高速摄像机拍摄的燃弧剧烈程度 如图 6 所示。由图 6 可见:在 0.1 mm/s 的切割速度 下,电弧燃烧最剧烈,喷弧距离很长;而 0.50 mm/s







(a)切割速度为
 (b)切割速度为
 (c)切割速度为
 0.10 mm/s
 0.25 mm/s
 0.50 mm/s
 图 6 不同切割速度下燃弧剧烈程度

Fig.6 Intensity of burning arc in different cutting speeds

切割速度下的喷弧距离短,电弧也最细。电弧燃烧 越剧烈,电流过零后弧隙间的温度就会越高,电弧越 容易重燃,零休时间也就更短。因此,在市电及纯阻 性试验情况下,电流半波持续时间为10 ms,增加 1 ms的零休时间对于波形特征会产生很大的变化, 会引入更多的谐波分量。

在对保护电器进行检测并且选择切割电缆作为 电弧发生类型时,切割速度低于 0.10 mm/s 会使试 验过程过于缓慢,而高于切割速度高于 0.50 mm/s 对于零休时间并不会产生更大变化,因此可以将切 割速度设置在 0.10~0.50 mm/s 之间,选取 3 或 4 种 切割速度进行检测。同时,由于不同电缆线径下零 休时间存在差异,所以检测时需要测试多种不同电 缆线径下故障电弧保护电器脱扣情况,才能满足在 各种实际应用情况。

2.2 点接触过程

点接触是属于电接触理论中一种导体间的接触 方式,虽然点接触电弧发生方式是以2个面接触的 形式产生,但实际是由多个点接触的方式形成。因 此在通电时,由于导电斑点处电流收缩,接触点会产 生局部高温,使得接触电极分离产生电弧的情况下, 大量导电离子逸出,导致多次重燃,形成点接触故障 电弧。

由于标准 GB/T 31143—2014 中对试验负载、试验电压与电极材料都进行了规定,因此对于点接触电弧,选取拉弧速度与电极间接触面积进行分析。 电极间接触面积为碳-石墨电极与铜电极接触时的 圆台面积,如附录中的图 A4(a)所示。电极间接触 面积为 12.56 mm²、78.50 mm² 和 200.96 mm² 的碳-石墨棒如附录中的图 A4(b)所示。

观察在 220 V/50 Hz、6 A 电流纯阻性电路,78.50 mm² 电极间接触面积及 0.05 mm/s 拉弧速度下起弧 情况,如图 7 所示。图 7(a)为慢速情况下点接触故障电弧,弧光比较微弱,起弧区域较小;图 7(b)为高速摄像机拍摄的起弧初期的电弧形态,由图可见燃 弧初期,电弧在多个接触点上形成,电弧形态杂乱无



规律;燃弧稳定后,电弧形态由图 7(b)过渡到图 7 (c),起弧点数减少,形成较为稳定的椭圆球燃弧形态;图 7(d)中靠底部亮光为燃弧过程中从碳-石墨 棒脱落的弧星,实际情况中极有可能因此引起火灾。

利用电极间接触面积与拉弧速度这 2 种变量作为交叉匹配条件进行试验。在上一次试验条件下,观察单次试验起弧初期与完全熄弧前电流零休时间的差异,故障电流波形如图 8 所示。图 8(a)为起弧 初期大约 500 ms 内的电流波形,计算得到 10 个半 波的零休时间均值为 0.726 ms;图 8(b)为电弧完全 熄灭前的电流波形,计算得到其零休时间均值为 1.940 ms。从波形和计算结果可见,不同燃弧时期的 零休时长存在明显的差异。



Fig.8 Fault current waveform in different arcing periods

在 220 V/50 Hz、6 A 电流纯阻性电路及不同接触面积与拉弧速度下,相应零休时间均值如表 3 所示。

表 3 点接触起弧初期零休时间

Table 3 Arc interval of point contact in initial acing period

		零休时间/ms				
拉弧速度/ (mm•s ⁻¹)	燃弧时期	电极间接触 面积为	电极间接触 面积为	电极间接触 面积为		
		$12.56\ \mathrm{mm^2}$	$78.50\ \mathrm{mm^2}$	$200.96\ \mathrm{mm^2}$		
0.050	起弧初期	0.885	0.726	0.663		
0.050	熄弧前	1.854	1.940	3.355		
0.125	起弧初期	1.144	1.213	1.168		
0.125	熄弧前	2.694	2.980	1.897		
0.250	起弧初期	0.886	0.907	1.085		
0.230	熄弧前	3.164	3.031	3.326		

分析表中数据可以得到如下结论:

a. 在不同实验条件下,完全熄弧前零休时间均 值远大于起弧初期的零休时间均值,差值基本大于 1 ms 以上,最大可达到 2.7 ms 左右;

b. 在起弧初期,同一拉弧速度不同截面积下的 零休时长均值差异不大,但同一截面积不同拉弧速 度下的零休时长均值在 0.05~0.25 mm/s 拉弧速度 区间有先增大后减小的趋势;

c. 在完全熄弧前期,12.56 mm² 和 78.50 mm² 2 种电极间接触面积下,零休时间随拉弧速度的增加 而变长,但在 200.96 mm² 电极间接触面积下,零休 时间和拉弧速度没有明显相关性,具有一定的随机 性。另外,从点接触起弧结果可以得到,燃弧总时长 随着拉弧速度的增加而减少,0.05 mm/s 拉弧速度 下燃弧时长可以稳定在 1.5 s 左右,而 0.25 mm/s 拉 弧速度下燃弧时长勉强达到 0.5 s,因此过快的拉弧 速度不能保证足够的燃弧时长,应将拉弧速度控制 在 0.25 mm/s 以内。

同样,对不同时期零休时间的变化情况也进行 分析,图9(a)、(b)分别为燃弧初期与熄弧前的电弧 形态,可以看到初期电弧体积更大,燃烧程度也更为 剧烈,因此电流过零后的温度也相应更高,电弧更易 重燃,零休时间也更短。

鉴于上述试验结果,对于点接触电弧发生方式, 电极间接触面积对于燃弧过程的影响较小,其拉弧 速度对于整个起弧过程的影响最大。经后续试验可 知,拉弧速度在 0.05 mm/s 与 0.25 mm/s 之间能够 最大化燃弧时长与燃弧稳定性,将拉弧速度稳定在 0.05~0.25 mm/s,对起弧过程的影响就会大幅减少。



(a) 燃弧程度1 (b) 燃弧程度2图9 不同时期燃弧剧烈程度

Fig.9 Intensity of the burning arc in different period

3 结论

本文设计了一套故障电弧模拟测试系统,并融入了 Logistic 识别算法,作为故障电弧保护电器检测的辅助手段。在满足电弧输出的基础上,对系统内存在的不稳定因素进行了研究并重点分析故障电流零休时间的变化,得到如下结论。

a. 只改变单一条件时,对于 0.10 mm/s、0.125 mm/s、0.50 mm/s 这 3 种切割速度,故障电流的零休时间会随着切割速度的增大而延长,最大差值可达 1 ms 左右;不同电缆线径下,零休时间之间的最大差值也在 1 ms 左右。

b. 点接触燃弧过程中,燃弧时间随着拉弧速度 增大而减少,因此为保证足够燃弧时长,应将拉弧速 度限定在 0.05~0.25 mm/s 范围内;完全熄弧前期的 零休时间比燃弧前期的零休时间最少长 1 ms,最大 可达到 2.7 ms。

115.

本文对起弧过程中的不稳定因素进行分析,可 提高故障电弧保护电器检测结果的准确性与一致 性,具有理论和实际意义。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 孙鹏,郑志成,闫荣妮,等.采用小波熵的串联型故障电弧检测 方法[J].中国电机工程学报,2010,30(增刊):232-236.
 SUN Peng,ZHENG Zhicheng,YAN Rongni, et al. Detection method of arc fault in series with wavelet entropy[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(Supplement):232-236.
- [2] CHAI S P, CHOO K L, JIAN L Y. A study of arc fault current in low voltage switchboard [C] // Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2013:52-56.
- [3] 王尧,韦强强,葛磊蛟,等. 基于电弧电流高频分量的串联交流 电弧故障检测方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7): 191-197.

WANG Yao, WEI Qiangqiang, GE Leijiao, et al. Series AC arc fault detection based on high-frequency components of arc current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7):191-197.

- [4] 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.
 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.
- [5] ARTALE G, CATALIOTTI A, COSENTINO V, et al. Arc fault detection equipment and method using low frequency harmonic current analysis: US 9,025,287[P]. 2015-05-05.
- [6]刘晓明,赵洋,曹云东,等. 基于多特征融合的交流系统串联电 弧故障诊断[J]. 电网技术,2014,38(3):795-801.
 LIU Xiaoming,ZHAO Yang,CAO Yundong, et al. Multi-feature fusion based diagnosis of series arc faults in AC system[J]. Power System Technology,2014,38(3):795-801.
- [7]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.

- [8]张冠英,张晓亮,刘华,等.低压系统串联故障电弧在线检测方法[J].电工技术学报,2016,31(8):109-115.
 ZHANG Guanying,ZHANG Xiaoliang,LIU Hua, et al. Online detection method for series arcing fault in low voltage system[J].
 Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,31(8):109-
- [9] 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.

- [10] ARTALE G, CATALIOTTI A, NUCCIO V C S, et al. A set of indicators for arc faults detection based on low frequency harmonic analysis[C] // Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Taiwan, China; IEEE, 2016; 1-6.
- [11] 宁庆,张峰,张士文. 基于 LabVIEW 的电弧故障发生装置研制
 [J]. 实验室研究与探索,2013,32(7):34-37,70.
 NING Qing,ZHANG Feng,ZHANG Shiwen. Development of an arc fault generator based on LabVIEW[J]. Research and Exploration in Laboratory,2013,32(7):34-37,70.
 [12] 李志,吴为麟. 电弧故障断路器测试平台的设计与研究[J]. 能
- [12] 字志,天为麻,电弧政障例函益预试于旨的设计与研究[J]. 能源工程,2013(1):31-34,39.
 LI Zhi, WU Weilin. Research of AFCI test platform [J]. Energy Engineering,2013(1):31-34,39.
- [13] 吴永亮. 电弧故障式碳化径迹试验装置: CN201320034996.9 [P]. 2013-08-07.
- [14] 杨书伟, 竺红卫, 曹文华, 等. 一种新型电弧故障检测串联电弧 试验装置: CN201420210984.1 [P]. 2014-10-08.
- [15] 齐梓博,高伟,孟庆山,等. 交流故障电弧模拟实验装置: CN204101656U[P]. 2015-01-14.

作者简介:



金 闪(1992—),男,福建福州人,硕 士研究生,主要研究方向为智能电器及其 在线监测(E-mail:1725551969@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,研究 方向为智能电器及其在线监测(E-mail: 641936593@qq.com)。

Research on fault arc simulation test system and its uncertain factors

JIN Shan, XU Zhihong

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the problem of fault arc in low voltage system, a fault arc simulation test system is designed. The designed system consists of host computer module, slave computer control module and so on. Three kinds of fault arc, i.e. cable cutting arc, carbide path arc and point contact arc can be output by the system. Meanwhile, Logistic recognition algorithm is adopted as the auxiliary criterion for the detection of fault arc protection device. Through the analysis of uncertain factors existing in the system, cutting speed, cable diameter and current amplitude in cable cutting module are selected as the main influence factors to be studied as well as arcing speed and contact area in point contact module. The study shows that under certain conditions the zero current time presents a trend change, and the change of one single condition will make it vary about 1 ms. According to the study results, the most suitable arcing conditions can be selected to improve the accuracy of detection result of arc fault protection devices. **Key words**; fault arc; simulation test system; Logistic recognition algorithm; zero current time















表 B1 训练样本编号及分类标签

TableB1 Number of training samples and classification labels

	触头 超程 状态	训练样 本编号	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	IMF ₅	IMF ₆	IMF ₇	IMF ₈	分类 标签
-			0.134	0.079	0.041	0.044	0.126	0.020	0.006	0.002	
	偏大	1-10	0.135	0.084	0.043	0.028	0.083	0.020	0.004	0.008	1
_							:				
			0.245	0.164	0.072	0.057	0.157	0.042	0.009	0.014	
	正常	11-20	0.239	0.126	0.081	0.060	0.195	0.051	0.006	0.013	2
_							:				
			0.280	0.122	0.087	0.092	0.439	0.041	0.017	0.017	
	偏小	21-30	0.264	0.131	0.091	0.091	0.232	0.034	0.008	0.0	3
_											

表 B2 测试样本编号及期望分类标签

TableB2 Number of test samples and classification labels

触头超和 状态	呈 测试样本编号	HF1 IMF2 IMF3 IMF4 IMF5 IMF6 IMF7 IMF8	分类 标签
偏大	1—5	0.1280.0730.0430.0370.0890.0310.0050.007 :	1
正常	6—10	0.2240.1450.0700.0450.2090.0420.0100.011 :	2
偏小	11—15	0.2930.1240.1090.1200.2380.0910.0120.030	3