

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104559

多参量融合的路灯触电事故检测方法研究^{*}

赵怀军¹ 杨文强¹ 杜松峰² 张 娜³

(1. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048; 2. 西安市政设计研究院有限公司 西安 710068;
3. 西安华瑞网电科技股份有限公司 西安 710075)

摘 要:针对路灯触电事故发生时触电电流幅值相对较小、且叠加于线缆及灯具的固有剩余电流之中,从而导致其难以准确检测的问题,提出一种多参量融合的路灯触电事故检测方法。该法通过采集路灯系统集总剩余电流、灯具电流和相电压信号的瞬时值,分别计算其中疑似人身触电事故剩余电流分量、随机容性剩余电流分量和负载电流有效值变化率的归一化特征量,进一步利用模糊逻辑器将这些特征量进行融合处理得到人身触电事故综合特征识别系数后,与经验阈值比较从而判别是否有人身触电事故发生。实验和工程应用结果表明,该方法可有效提高路灯照明系统中人身触电事故的识别准确性。

关键词: 路灯系统;人身触电事故;特征归一化;多参量模糊融合检测

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on detection method of street lamp electric shock accident based on multi parameter fusion

Zhao Huaijun¹ Yang Wenqiang¹ Du Songfeng² Zhang Na³

(1. Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Xi'an Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710068, China;
3. Xi'an Hi-rate Electrical Power Technology Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Aiming at the problem that the amplitude of electric shock current is relatively small and superimposed on the inherent residual current of cables and lamps, which makes it difficult to detect accurately, a multi parameter fusion detection method for street lamp electric shock accident is proposed. By collecting the instantaneous values of the total residual current, lamp current and phase voltage signals of the street lamp system, the normalized characteristic quantities of the residual current component of the suspected personal electric shock accident, the random capacitive residual current component and the change rate of the effective value of the load current are calculated respectively, then the fuzzy logic device is used to fuse these characteristic quantities to obtain the comprehensive characteristics of the personal electric shock accident. The recognition coefficient is compared with the experience threshold to judge whether there is an electric shock accident. The results of experiment and engineering application show that the method can effectively improve the recognition accuracy of electric shock accidents in street lighting system.

Keywords: street lighting system; detection of personal electric shock accident; feature normalization; multi parameter fuzzy fusion

0 引 言

在有效接地的路灯系统中,灯杆中供电线缆及灯具老化、绝缘性能降低会导致其用电回路产生接地电流泄露故障和剩余电流^[1],使灯杆本体带电引发生命体尤其是人身潜在触电风险,严重时甚至危及性命安全。因此,

精准检测判断人身触电事故,并进一步控制装设在路灯供电入口处的继电器或开关及时分断路灯供电电源,自动终止触电事故对人身持续危害,对保障人民生命安全具有巨大现实意义和社会意义。

目前国内外路灯触电事故检测方法主要有3类。第1类是漏电保护器法^[2],该法通过检测路灯供电回路的集总剩余电流^[3],以集总剩余电流替代人身触电事故剩

余电流来判断触电事故是否发生,存在误判和漏判缺陷。第2类是触电电流分离法^[4],即利用人身触电剩余电流的前期时变特征从路灯照明系统集总剩余电流中分离人身触电剩余电流的方法,此类方法包括小波包变换和混沌理论相结合法^[5]、基于椭圆与分割的触电电流混沌检测方法^[6]、基于小波包变换和量子神经网络的触电故障类型识别法^[7]、基于SVM-神经网络融合反馈的触电电流检测方法^[8]、触电信号暂态特征提取及故障类型识别方法^[9]等,但受计算量较大和分离算法精度不高等因素影响,此类方法目前还需进一步优化研究,在实际系统中应用十分有限。第3类是触电故障类型识别法,该法致力于分析触电故障类型,触电故障类型分为人体触电和接地泄露故障,利用人体生理特征和非生物特征的显著差异来区分人身触电和绝缘破损、负载变化引起的接地泄露故障^[10],此方法包括生物阻抗频散理论特性检测法^[11]、触电事故特征改进近似熵检测法^[12]、基于滑动去趋势波动分析法的触电特征检测方法^[13]、基于AdaBoost算法的剩余电流分类方法^[14]、基于剩余电流固有模态能量特征的生物触电故障诊断模型方法^[15]、时频域分析法和奇异谱分析相结合法^[16]等方法,此类方法在触电理论上有一定的突破,但其算法难度大,工程应用发展比较缓慢。

本文以参照IEC标准^[17]搭建的路灯照明系统人身触电事故实验装置为平台,进行了大量实验研究和分析,提出一种多参量融合的路灯触电事故在线检测方法。其通过利用模糊控制器^[18-19],对路灯供电回路中连续两个周期的疑似人身触电事故剩余电流分量有效值变化率归一化特征量、随机容性剩余电流分量有效值变化率归一化特征量及灯具电流有效值变化率归一化特征量进行融合处理^[20],得到人身触电事故综合特征识别系数,进一步与经验阈值比较,从而精准检测判断路灯照明回路中是否有人身触电事故发生,若有事故发生时,控制路灯供电回路中的继电器或开关及时分断供电电源,实现对路灯触电事故的有效保护。

1 多参量融合的路灯触电事故检测方法

我国路灯系统多数采用TN-S、TNC-S供电方式。现仅以TN-S有效接地路灯系统为例,如图1所示,分析其人身触电事故的检测机理,TNC-S供电方式的路灯系统人身触电事故分析方法与此类同。

1.1 人身触电事故电流特征提取

以单相路灯照明系统两个连续工频周期的相电压、集总剩余电流、灯具电流波形为研究对象,连续采集相电压信号瞬时值 u 、集总剩余电流信号瞬时值 i_j 、灯具电流信号瞬时值 i_L 波形,以提取解析疑似人身触电事故剩余

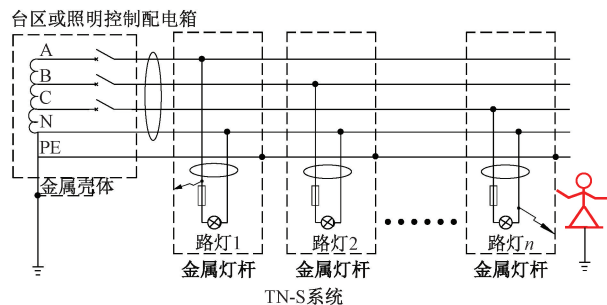


图1 有效接地路灯系统人身触电事故示意图

Fig.1 Schematic diagram of electric shock accident of effectively grounded street lamp system

电流分量、随机容性剩余电流分量及灯具电流的有效值变化率归一化特征量。

1) 疑似人身触电事故剩余电流特征量求取

分别计算路灯照明系统中的相电压有效值 U 、集总剩余电流有效值 I_j , I_j 与 U 的内积 P_j ,计算公式如式(1)、(2)、(3)所示。

$$U = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{n=1}^k |u_n|^2} \quad (1)$$

$$I_j = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{n=1}^k |i_{jn}|^2} \quad (2)$$

$$P_j = (U \cdot I_j) \quad (3)$$

式中: u_n 为路灯照明系统的相电压波形的第 n 个采样点值; i_{jn} 为路灯照明系统的集总剩余电流波形的第 n 个采样点值; k 为一个工频周期波形的总采样点数, $n=1,2,3,\dots$ 。

计算疑似人身触电事故剩余电流分量有效值 I_r ,计算公式如式(4)所示。

$$I_r = \frac{P_j}{U} \quad (4)$$

再计算疑似人身触电事故剩余电流分量有效值变化率 $\frac{dI_r}{dt}$,并对其进行归一化处理得到疑似人身触电事故剩余电流特征量 $S1$,计算公式如式(5)所示。

$$S1 = \frac{dI_{r'n}/dt}{dI_{r'n+1}/dt} \quad (5)$$

式中: $\frac{dI_{r'n}}{dt}$ 为第 n 个周波疑似人身触电事故剩余电流分量有效值变化率, $n=1,2,3,\dots$ 。

2) 随机容性剩余电流特征量求取

计算路灯照明系统中集总剩余电流有效值 I_j 与相电压有效值 U 的外积 Q_j ,计算公式如式(6)所示。

$$Q_j = U \times I_j \quad (6)$$

进一步计算随机容性剩余电流分量有效值 I_c ,计算公式如式(7)所示。

$$I_c = \frac{Q_J}{U} \quad (7)$$

计算随机容性剩余电流分量有效值变化率 $\frac{dI_c}{dt}$, 并对其进行归一化处理得到随机容性剩余电流特征变量 S2, 计算公式如式(8)所示。

$$S2 = \frac{dI_{cn}/dt}{dI_{cn+1}/dt} \quad (8)$$

式中: $\frac{dI_{cn}}{dt}$ 为第 n 个周波随机容性剩余电流分量有效值变化率, $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

3) 灯具电流特征量求取

计算路灯照明系统中的灯具电流有效值, 计算公式如式(9)所示。

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{n=1}^k |i_{Ln}|^2} \quad (9)$$

式中: i_{Ln} 为路灯照明系统的灯具电流波形的第 n 个采样值; $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

计算灯具电流有效值变化率 $\frac{dI_L}{dt}$, 并对其进行归一化处理得到灯具电流特征变量 S3, 计算公式如式(10)所示。

$$S3 = \frac{dI_{Ln}/dt}{dI_{Ln+1}/dt} \quad (10)$$

式中: $\frac{dI_{Ln}}{dt}$ 为第 n 个周波灯具电流有效值变化率, $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

1.2 人身触电事故电流特征提取

为了提高路灯人身触电事故检测的准确性, 采用模糊逻辑处理器对 1.1 节得到的 S1、S2、S3 进行模糊融合以获得人身触电事故综合特征识别系数 S0, 具体步骤如下所述。

1) 对 S1、S2、S3 等输入参量及人身触电事故综合特征识别系数 S0 进行模糊化, 其模糊集及论域定义如下:

S1 的模糊集为 {AT(触电)、MT(可能发生触电)、NT(不触电)};

S2 的模糊集为 {AC(触电)、MC(可能发生触电)、NC(不触电)};

S3 的模糊集为 {AG(触电)、MG(可能发生触电)、NG(不触电)};

S0 的模糊集为 {AA(触电)、MM(可能发生触电)、NN(不触电)};

S1、S2、S3、S0 论域均为 [0, 1]。

2) 对模糊变量赋值, 确定论域内元素对模糊变量的隶属度, 通过大量实验及经验定义的隶属度函数如图 2 所示。

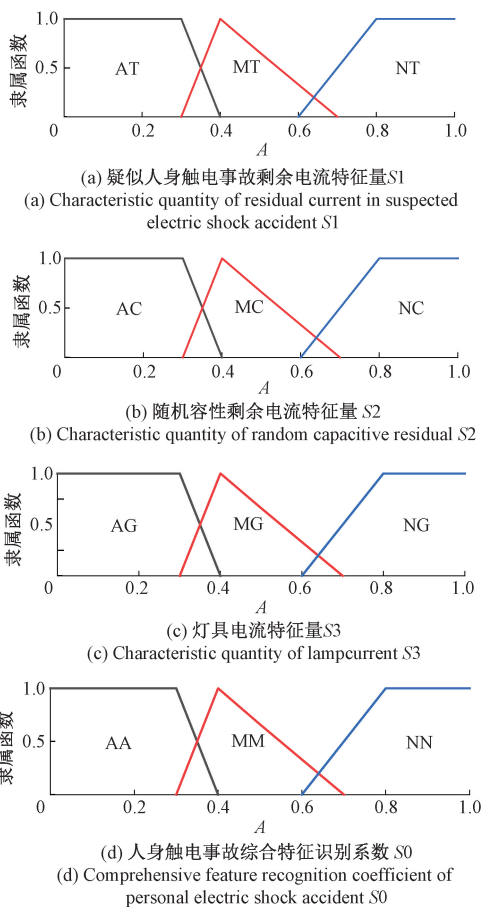


图 2 模糊集隶属函数

Fig. 2 Membership function of fuzzy set

3) 通过大量实验及经验得出的 27 条人身触电事故模糊识别规则和制定的规则图如图 3 所示。

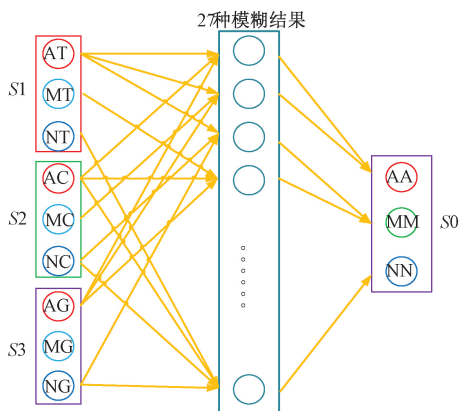


图 3 模糊识别规则

Fig. 3 Fuzzy recognition rule diagram

4) 将 S1、S2 及 S3 按照 Mamdani 算法进行模糊推理, 计算公式如式(11)所示。

$$u_{S0'}(w) = \{V_{m \in V} u_{S1'}(m) \wedge (u_{S1}(m) \wedge (u_{S0}(w)))\} \wedge \{V_{q \in V} u_{S2'}(q) \wedge (u_{S2}(q) \wedge (u_{S0}(w)))\} \wedge$$

$$\{V_{z \in I} u_{S3'}(z) \wedge (u_{S3}(z) \wedge (u_{S0}(w)))\} \quad (11)$$

式中: m 为 $S1$ 论域中的元素、 q 为 $S2$ 论域中的元素、 z 为 $S3$ 论域中的元素、 w 为 $S0$ 论域中的元素、 $u_{S1}(m)$ 为 m 元素根据模糊规则隶属于 $S1$ 的隶属度、 $u_{S1'}(m)$ 为输入的新元素根据模糊规则隶属于 $S1$ 的隶属度、 $u_{S2}(q)$ 为 q 元素根据模糊规则隶属于 $S2$ 的隶属度、 $u_{S2'}(q)$ 为输入的新元素根据模糊规则隶属于 $S2$ 的隶属度、 $u_{S3}(z)$ 为 z 元素根据模糊规则隶属于 $S3$ 的隶属度、 $u_{S3'}(z)$ 为输入的新元素根据模糊规则隶属于 $S3$ 的隶属度、 $u_{S0}(w)$ 为 w 元素根据模糊规则隶属于 $S0$ 的隶属度、 $u_{S0'}(w)$ 为输入 $u_{S1'}(m)$ 、 $u_{S2'}(q)$ 和 $u_{S3'}(z)$ 下的模糊结果。

5) 通过最大隶属度平均法对输出的模糊集进行反模糊化处理获得人身触电事故综合特征识别系数 $S0$, 最大隶属度平均法计算公式如式 (12)、(13) 所示。

$$w_t = \max_{w \in V} (u_{S0}(w)) \quad (12)$$

$$S0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N w_t \quad (13)$$

式 (12)、(13) 中: w_t 为模糊推理结果中的最大值、 V 为输出论域、 $u_{S0}(w)$ 为模糊推理输出的模糊结果; N 为最大隶属度输出总个数, $t = 1, 2, 3, \dots$ 。

获得人身触电事故综合特征识别系数 $S0$ 后, 进一步与经验阈值 SA (一般取 0.5) 比较, 满足 $S0 > SA$ 时, 则判断结果为有人身触电事故发生, 反之则无。

2 实验装置与数据采集

2.1 实验装置

所搭建的路灯照明系统人身触电事故实验装置平台原理图如图 4 所示, 实物图如图 5 所示。其中 1 为路灯供电电源, 2 为隔离变压器, $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$ 皆为控制开关, 3 为示波器, 4 为电流探头①, 5 为电流探头②, 6 为电压探头, 7 为线路泄露模型, 8 为限流电阻, 9 为触电体-人/活兔, 10 为灯具负载。

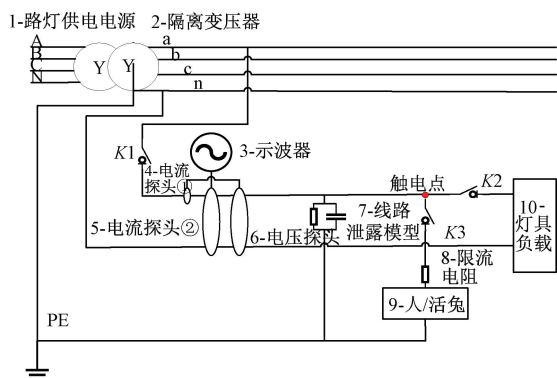


图4 路灯照明系统人身触电事故实验装置原理

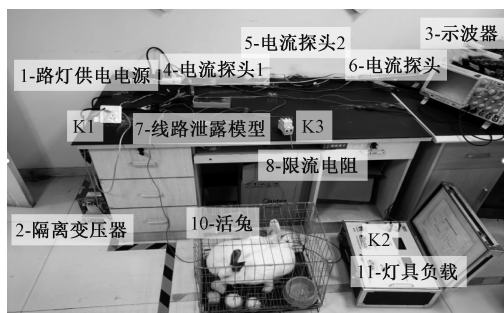


图5 路灯照明系统人身触电事故实验装置实物图

Fig. 5 The real object of the experimental platform for the electric shock of the street lamp lighting system

实验中以活兔代替人体进行触电实验(活兔与人体的生理特征阻容性基本相符^[21]), 在触电支路中配置限流电阻, 用以保证在实验过程中活兔的安全性。

实验开始时合 $K1$ 及 $K2$, 灯具带电工作, 线路泄露剩余电流控制为 10 mA, 此时路灯照明系统中尚无触电事故发生。合上触电控制开关 $K3$, 将活兔接入触电支路, 持续时间不超过 1 s, 此时系统发生触电事故, 由示波器记录系统中电流探头①和②、电压探头 6 采集的信号波形。

2.2 典型灯具负载实验

分别在线性灯具负载和非线性灯具负载实验条件下, 对有触电事故和无触电事故发生两种情况下分别进行多组实验, 用示波器记录其回路电压采样值、集总剩余电流采样值及灯具电流采样值, 采样频率为 f 为 1 MHz, 记录长度为 10 个工频周期。其中第 1 组实验前 5 个工频周期相关的电流电压波形如下图 6 及 7 所示, 其余实验电流电压波形在此不再赘述, 但均参与文中后续数据处理过程。

1) 线性灯具负载

2) 非线性灯具负载

图 6(a)~(c) 为线性灯具负载条件下的回路电压、集总剩余电流、灯具电流波形图, 图 7(a)~(c) 为非线性灯具负载条件下的回路电压、集总剩余电流、灯具电流波形图。显然看出, 对于灯具负载, 触电事故发生前后, 照明回路电压及灯具电流不受影响, 而电流探头②探测的由线路泄露阻容和灯具产生的集总剩余电流在触电后幅值明显增加, 且在 2~3 个工频周期后保持稳定。文中以这些实验获得的集总剩余电流变化特征为依据, 按上 1 节所述有关理论对实验数据进行分析研究。

3 特征量提取与数据分析

在典型灯具负载(型号 HR-ST120PWA)条件下进行实验, 分别提取电压信号瞬时值 u 、集总剩余电流信号瞬

Fig. 4 Principle of platform device for electric shock accident of street lamp lighting system

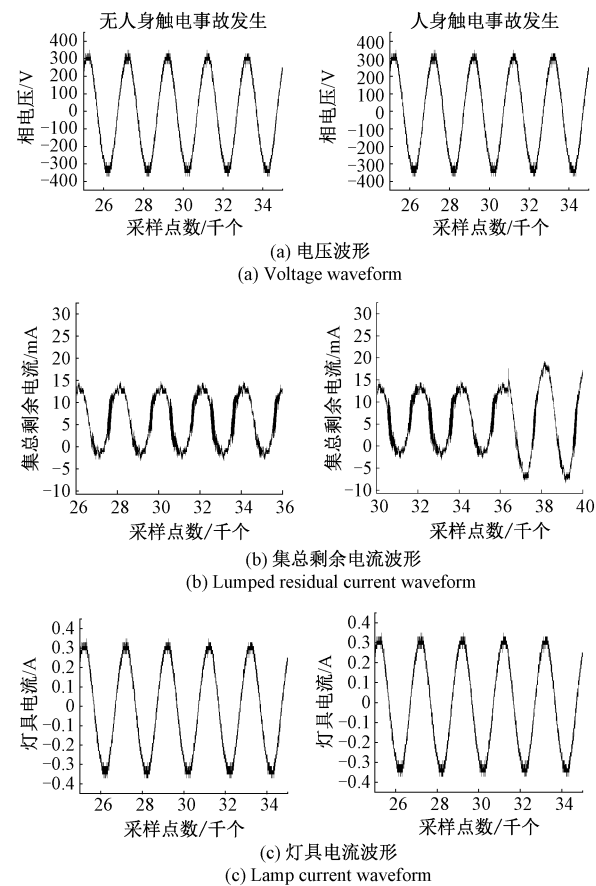


图 6 线性灯具负载条件下回路电压、集总剩余电流、灯具电流波形图

Fig. 6 Waveforms of loop voltage, lumped residual current and lamp current under linear lamp load

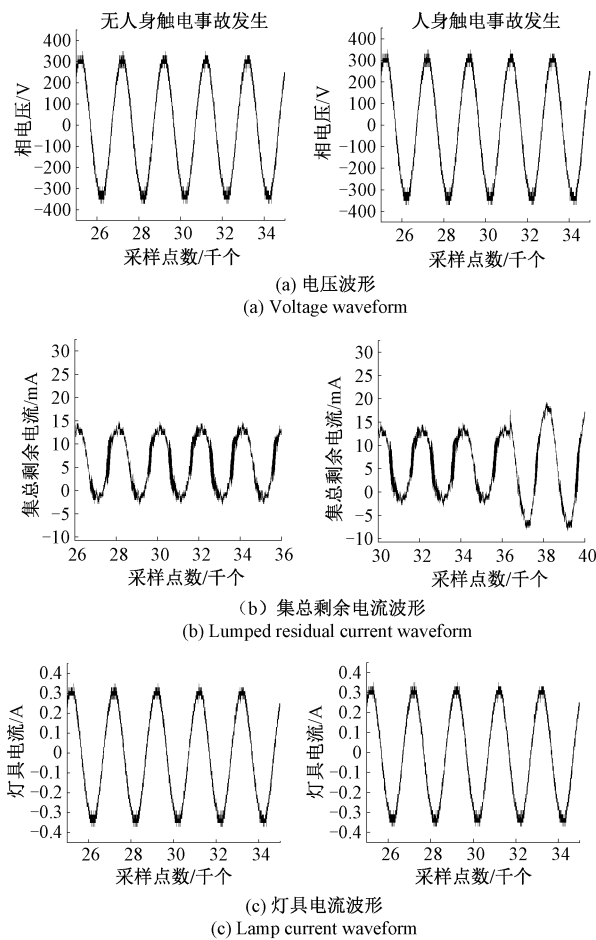


图 7 非线性灯具负载条件下电压、集总剩余电流、灯具电流波形图

Fig. 7 Waveforms of loop voltage, lumped residual current and lamp current under nonlinear lamp load

时值 i_j 、灯具电流信号瞬时值 i_L 波形并进行计算分析。

3.1 疑似人身触电事故剩余电流特征量提取

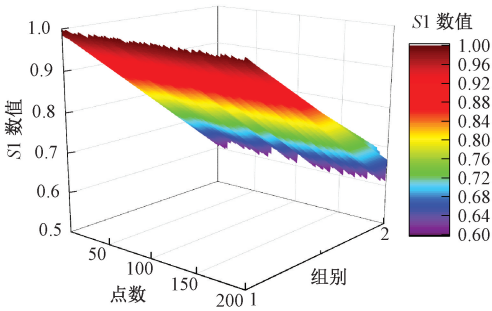
根据式(1)~(5)分别计算其路灯照明回路中的相电压有效值 U 、集总剩余电流有效值 I_j 、 I_j 与 U 的内积 P_j 以及疑似人身触电事故剩余电流分量有效值 I_r ，再计算疑似人身触电事故剩余电流分量有效值变化率 $\frac{dI_r}{dt}$ ，并对其进行归一化处理得到疑似人身触电事故剩余电流特征量 $S1$ 。表 1 所示数据分别为无路灯触电事故发生、有路灯触电事故发生及线路突发阻容泄露时计算出来的疑似人身触电事故剩余电流特征量 $S1$ 。

由表 1 及图 8 可以分析得出：对于正常路灯照明回路中无触电事故发生时，疑似人身触电事故剩余电流特征量 $S1$ 基本为 1；有触电事故发生时，疑似人身触电事故剩余电流特征量 $S1$ 明显减小（如图 8(a) 中组别 1、2），但线路突发阻容泄露时计算得出的疑似人身触电事故剩余电流特征量 $S1$ 也明显减小（如图 8(b) 中组别 2），且二者有重叠重复区域。故难以用 $S1$ 来检测判断是否有路

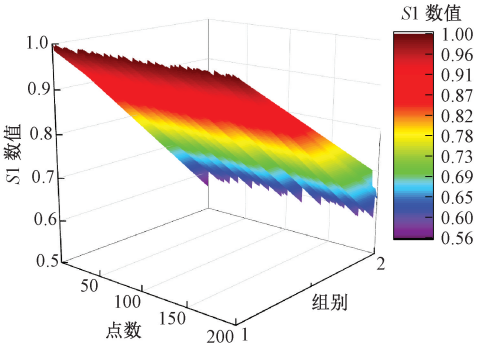
灯触电事故发生，其会受到路灯线路中突发阻容泄露的影响和限制，存在误判漏判现象。

表 1 疑似人身触电事故剩余电流特征量 $S1$

Table 1 Characteristic quantity $S1$ of residual current in suspected electric shock accident			
无路灯触电事故发生	有路灯触电事故发生	无路灯触电事故发生	线路突发阻容泄露
0.998	0.665	0.998	0.625
0.996	0.672	0.996	0.635
0.997	0.668	0.997	0.597
0.998	0.633	0.998	0.628
0.999	0.658	0.999	0.640
0.996	0.596	0.996	0.596
0.996	0.635	0.996	0.645
0.995	0.679	0.995	0.629
0.996	0.671	0.996	0.615
0.975	0.657	0.975	0.598
0.987	0.649	0.987	0.589
0.995	0.652	0.995	0.605



(a) 有触电事故发生时的S1图
(a) S1 diagram with electrocution accident



(b) 线路突发阻容泄露时的S1图
(b) S1 diagram of line burst resistance and capacitance leakage

图8 疑似人身触电事故剩余电流特征量 S1 图
Fig. 8 S1 diagram of residual current characteristic quantity of suspected electric shock accident

3.2 随机容性剩余电流特征量提取

为克服路灯照明系统中线路发生阻容泄露的影响,根据式(1)、(2)、(6)、(7)、(8)分别计算其路灯照明回路中的相电压有效值 U 、集总剩余电流有效值 I_j 、 I_j 与 U 的外积 Q_j 及随机容性剩余电流分量有效值 I_c ,进一步计算随机容性剩余电流分量有效值变化率 $\frac{dI_c}{dt}$,并对其进行归一化处理得到随机容性剩余电流特征变量 S_2 。表2所示数据分别为突发阻容泄露、无路灯触电事故发生、有路灯触电事故发生及加入灯具阻容泄露时计算出来的随机容性剩余电流特征变量 S_2 及疑似人身触电事故剩余电流特征量 S_1 。

从表2及图9、10可以分析得出:对于正常路灯照明系统中突发阻容泄露时,疑似人身触电事故剩余电流特征量 S_1 显著减小,随机容性剩余电流特征变量 S_2 基本为1;无触电事故发生时,疑似人身触电事故剩余电流特征量 S_1 和随机容性剩余电流特征变量 S_2 基本为1,说明利用 S_1 和 S_2 判断路灯触电事故可规避电路中阻容泄露突变的影响;有触电事故发生时,疑似人身触电事故剩余电流特征量 S_1 和随机容性剩余电流特征变量 S_2 都明显减少,但当路灯照明系统中加入本身具有阻容泄露的灯

具负载时也会出现同样的情况(如图9中组别3、4,图10中组别3、4),且减少幅度大致相同,故难以用 S_1 和 S_2 结合判断来检测是否有路灯触电事故发生,其会受到路灯线路中灯具负载变化的影响和限制,存在误判漏判现象。

表2 疑似人身触电事故剩余电流特征量 S_1 及随机容性剩余电流特征变量 S_2 数据

Table 2 Data of random capacitive residual current characteristic variable S_2 and residual current characteristic variable S_1 of suspected personal electric shock accident			
突发阻容泄露	无路灯触电事故发生	有路灯触电事故发生	加入负载阻容泄露
随机容性剩余电流特征变量 S_2			
0.999	0.998	0.785	0.708
0.987	1.000	0.774	0.736
0.996	0.999	0.782	0.719
0.989	0.999	0.795	0.769
0.992	0.998	0.762	0.746
0.998	0.997	0.775	0.759
0.997	0.999	0.785	0.764
0.994	0.998	0.746	0.708
0.987	0.997	0.765	0.780
0.999	0.999	0.752	0.801
0.999	0.997	0.772	0.787
0.991	0.999	0.781	0.771
0.997	0.999	0.745	0.729
0.999	0.998	0.770	0.746
疑似人身触电事故剩余电流特征量 S_1			
0.558	0.998	0.665	0.704
0.635	0.996	0.672	0.710
0.597	0.997	0.668	0.721
0.596	0.995	0.667	0.724
0.628	0.998	0.633	0.711
0.640	0.999	0.658	0.715
0.568	0.998	0.669	0.681
0.587	0.999	0.678	0.704
0.601	0.999	0.669	0.716
0.596	0.995	0.664	0.696
0.615	0.996	0.650	0.705
0.609	0.995	0.660	0.702
0.609	0.998	0.662	0.688

4 多参量融合的路灯触电事故检测实验结果与数据分析

为克服以上问题,根据疑似人身触电事故剩余电流特征量 S_1 、随机容性剩余电流特征变量 S_2 及灯具电流特征变量 S_3 进行特征融合运算,根据式(11)、(12)得到输出的模糊集及模糊推理结果最大值,再根据式(13)计算人身触电事故综合特征识别系数 S_0 ,其数据如表3所示。

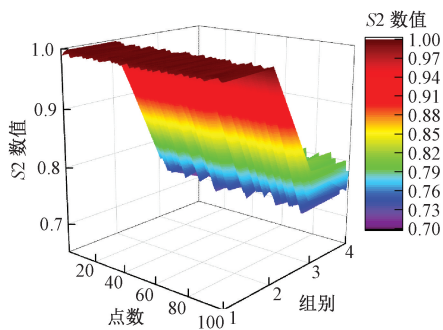


图 9 随机容性剩余电流特征变量 S2 数据
Fig. 9 Random capacitive residual current characteristic variable S2 data

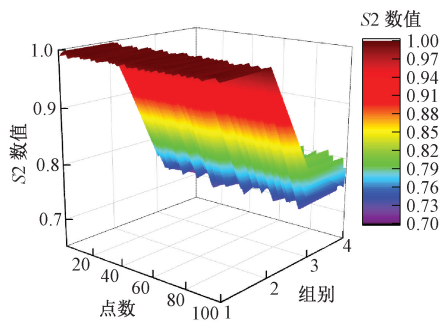


图 10 疑似人身触电事故剩余电流特征量 S1 数据
Fig. 10 Residual current characteristic quantity S1 data of suspected electric shock accident

表 3 人身触电事故综合特征识别系数 S0 数据
Table 3 Data of comprehensive characteristic recognition coefficient S0 of personal electric shock accident

人身触电事故综合特征识别系数 S0	无路灯触电事故发生(a)	有路灯触电事故发生(b)
正常回路	0.389	0.659
	0.406	0.685
	0.396	0.689
	0.402	0.695
	0.382	0.689
线路发生阻容泄露	0.417	0.688
	0.401	0.705
	0.425	0.668
	0.404	0.669
	0.399	0.702
加入灯具阻容泄露	0.375	0.715
	0.398	0.689
	0.389	0.646
	0.376	0.692
	0.402	0.677

从表 3 及图 11、12 分析得出:当路灯照明系统中发生触电事故时 S0 均大于 0.5,如表 3(b)列及图 12 中所

示;无路灯触电事故发生时 S0 均小于 0.5,如表 3(a)列及图 11 中所示。由此可见,利用 S0 可以有效提高路灯触电事故识别准确性,不受线路发生泄露阻容及加入泄露阻容灯具负载因素的影响,无误判漏判现象。

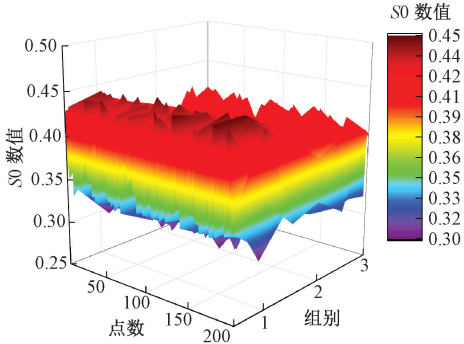


图 11 无路灯触电事故发生时 S0 数据
Fig. 11 S0 data of electric shock accident without street lamp

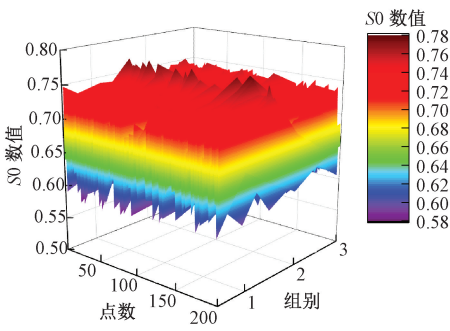


图 12 有路灯触电事故发生时 S0 数据
Fig. 12 S0 data of electric shock accident of street lamp

为了进一步验证该结论,本文继续对典型灯具负载在无触电事故和有触电事故发生时,各自进行 100 组实验。

1) 无路灯触电事故发生时,对正常回路,突发阻容泄露及加入灯具阻容泄露时的几种情况,分别采集其 20 个工频周期相电压、集总剩余电流及灯具电流波形,计算人身触电事故综合特征识别系数 S0,其结果与经验阈值 SA (取 0.5) 比较,若 S0 > SA ,则认为路灯照明系统中发生了触电事故,否则认为无。判断结果为 100 组数据均为无路灯触电事故发生,如表 4(a)列所示。

表 4 阈值判断输出数量
Table 4 Threshold judgment output quantity

试验条件	无路灯触电事故发生(a)		有路灯触电事故发生(b)	
	1(故障)	0(正常)	1(故障)	0(正常)
正常回路	0	100	100	0
突发阻容泄露	0	100	100	0
加入灯具	0	100	100	0
阻容泄露	0	100	100	0

2)有路灯触电事故发生时,同理。判断结果为100组数据均为有路灯触电事故发生,如表4(b)列所示。

表4的判断结果表明,利用模糊逻辑器对疑似人身触电事故剩余电流特征量 S_1 、随机容性剩余电流特征变量 S_2 、灯具电流特征变量 S_3 进行融合处理后获得的人身触电事故综合特征识别系数 S_0 为依据,判断是否有路灯触电事故发生的检测方法准确性好,能防止误判漏判现象发生。

文中所涉及的路灯触电事故检测方法已于2019年12月实际应用于广州江门新会区启超大道路灯智慧管控项目,至今运行状况良好,能对路灯触电事故进行有效检测,无误判漏判现象发生。

5 结 论

本研究为消除路灯系统本身固有剩余电流、灯具阻容泄露电流变化等因素对准确检测人身触电事故的影响,提出了一种模糊融合疑似人身触电事故剩余电流、随机容性剩余电流及灯具电流的路灯触电事故检测方法。首先采集路灯系统集总剩余电流、灯具电流和相电压信号的瞬时值,计算相应的疑似人身触电事故剩余电流分量、随机容性剩余电流分量和负载电流有效值变化率的归一化特征量,然后利用模糊逻辑器将这些特征量进行融合处理得到人身触电事故综合特征识别系数,以此系数幅值大小作为最终判别是否有人身触电事故发生依据。实验和工程应用结果表明,该法能有效抑制突发阻容泄露、加入灯具阻容泄露等因素影响,准确识别路灯照明系统中人身触电事故,无误判漏判现象发生。在今后的研究中,可利用该法的检测结果,直接联动装设在路灯供电入口处的继电器或开关,在人身触电事故发生时,自动快速切断路灯供电电源,终止触电事故继续发生,减少其对人体的危害。

参考文献

- [1] 陈玉龙. 浅谈漏电保护技术的研究与发展[J]. 科学与信息化, 2018, (14): 29, 32.
CHEN Y L. Research and development of leakage protection technology [J]. Science and Informatization, 2018, (14): 29, 32.
- [2] 周刚. 漏电断路器在路灯低压配电系统中的应用[J]. 山东工业技术, 2018(24): 154.
ZHOU G. Application of leakage circuit breaker in low voltage distribution system of street lamp [J]. Shandong Industrial Technology, 2018(24): 154.
- [3] 党喜玲. 剩余电流式电气火灾在线柔性辨识技术的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.
DANG X L. Research on online flexible identification

- technology of residual current electrical fire [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [4] 李天友, 郭峰. 低压配电的触电保护技术及其发展[J]. 供用电, 2019, 36(12): 1-8.
LI T Y, GUO F. Electric shock protection technology of low voltage distribution and its development [J]. Power Supply and Consumption, 2019, 36(12): 1-8.
- [5] 李春兰, 杜松怀, 苏娟, 等. 一种新的基于小波变换和混沌理论的触电信号检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 47-52, 154.
LI CH L, DU S H, SU J, et al. A new detection method of electric shock signal based on wavelet transform and chaos theory [J]. Protection and Control of Power System, 2011, 39(10): 47-52, 154.
- [6] 李春兰, 夏兰兰, 王成斌, 等. 基于椭圆域分割的触电电流混沌检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 69-76.
LI CH L, XIA L L, WANG CH B, et al. Research on chaotic detection method of electric shock current based on elliptic domain segmentation [J]. Protection and Control of Power System, 2017, 45(15): 69-76.
- [7] 关海鸥, 刘梦, 李春兰, 等. 基于小波包变换和量子神经网络的触电故障类型识别模型[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 183-190.
GUAN H OU, LIU M, LI CH L, et al. Electric shock fault type recognition model based on wavelet packet transform and quantum neural network [J]. Acta Agriculturae Sinica, 2018, 34(5): 183-190.
- [8] 刘永梅, 杜松怀, 盛万兴. 基于SVM-神经网络融合反馈的触电电流检测方法[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1972-1977.
LIU Y M, DU S H, SHENG W X. Detection method of electric shock current based on SVM neural network fusion feedback [J]. Power Grid Technology, 2020, 44(5): 1972-1977.
- [9] 韩晓慧, 杜松怀, 苏娟, 等. 触电信号暂态特征提取及故障类型识别方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3591-3596.
HAN X H, DU S H, SU J, et al. Transient feature extraction and fault type identification method of electric shock signal [J]. Power Grid Technology, 2016, 40(11): 3591-3596.
- [10] 艾精文, 谢智敏, 赵宇明, 等. 剩余电流动作保护器研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2019, (24): 1-5, 21.
AI J W, XIE ZH M, ZH Y M, et al. Review of research on residual current operated protector [J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management

- Technology, 2019, (24): 1-5, 21.
- [11] 李浩,刘继勋,赵恒,等. 基于生物电阻抗频率散射特性的触电特征识别仿真研究[J]. 四川电力技术, 2014(3):10-13,81.
LI H, LIU J X, ZHAO H, et al. Simulation research on electric shock feature recognition based on frequency scattering characteristics of bioelectrical impedance [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2014 (3): 10-13,81.
- [12] 熊晓祎,肖先勇,左金威,等. 触电事故特征改进近似熵检测方法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(13): 27-33.
XIONG X Y, XIAO X Y, ZUO J W, et al. Improved approximate entropy detection method for electric shock characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2017,45 (13): 27-33.
- [13] 郭峰,李天友,叶荣,等. 基于滑动去趋势波动分析的触电特征检测方法[J]. 供用电,2020,37(4):65-70.
GUO F, LI T Y, YE R, et al. Electric shock detection method based on sliding detrended fluctuation analysis [J]. Power Supply and Consumption, 2020,37 (4): 65-70.
- [14] 刘永梅,杜松怀,盛万兴. 基于 AdaBoost 算法的剩余电流分类方法[J]. 电子技术应用,2018,44(12): 147-150.
LIU Y M, DU S H, SHENG W X. Residual current classification method based on AdaBoost algorithm [J]. Application of Electronic Technology, 2018,44 (12): 147-150.
- [15] 王金丽,刘永梅,杜松怀,等. 基于剩余电流固有模态能量特征的生物触电故障诊断模型[J]. 农业工程学报,2016,32(21):202-208.
WANG J L, LIU Y M, DU S H, et al. Fault diagnosis model of biological electric shock based on residual current intrinsic mode energy characteristics [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2016,32 (21): 202-208.
- [16] 王阳,许志红,郭清涵. 基于奇异值差分谱熵复杂度的生物触电信号识别研究[J]. 供用电,2019,36(12):9-16,21.
WANG Y, XU ZH H, GUO Q T. Recognition of biological electric shock signal based on singular value difference spectral entropy complexity [J]. Power Supply and Consumption, 2019,36 (12): 9-16,21.
- [17] International Electrotechnical Commission. Methods of measurements of touch currents and protective conductor current[S]. IEC 60990,2016.
- [18] DOMBI J, HUSSAIN A. A new approach to fuzzy control using the distending function [J]. Journal of Process Control, 2020, 86: 16-29.
- [19] TREMANTE P, YEN K, BREA E. Tuning of the membership functions of a fuzzy control system using pattern search optimization method [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 37(3): 3763-3776.
- [20] 赵怀军,秦海燕,刘凯,等. 基于相关理论及零休特征融合的串联故障电弧检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(4):218-228.
ZHAO H J, QIN H Y, LIU K, et al. Detection method of series fault arc based on correlation theory and zero rest feature fusion [J]. Journal of Instrumentation, 2020, 41(4): 218-228.
- [21] 刘永梅,盛万兴,杜松怀. 一种面向剩余电流保护装置的触电阻抗建模方法[J]. 河北工业大学学报,2017, 46(4):15-23.
LIU Y M, SHENG W X, DU S H. A modeling method of electric shock impedance for residual current protection device [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2017,46 (4): 15-23.

作者简介



赵怀军,1991 年于中国计量大学获得学士学位,1996 年于西安理工大学获得硕士学位,2007 年于西北工业大学获得博士学位,现为西安理工大学副教授,主要研究方向为检测技术及自动化装置。

E-mail:zhj0858@sohu.com

Zhao Huaijun received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 1991, and received his M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 1996, and received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2007. Now he is an associate professor of Xi'an University of Technology. His main research interests include detection technology and automation equipment.



杨文强(通信作者),2018 年于西安理工大学获得学士学位,现为西安理工大学硕士研究生,主要研究方向为检测技术及自动化装置。

E-mail:563297092@qq.com

Yang Wenqiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2018. Now he is a M. Sc. candidate of Xi'an University of Technology. His main research interests include detection technology and automation equipment.