

# 基于模糊逻辑算法的电力线路 绝缘故障预警方法

李群山<sup>1</sup>, 刘志成<sup>1</sup>, 李鑫<sup>1</sup>, 徐正清<sup>2,3</sup>,  
李玉凯<sup>2,3</sup>, 韩佳兵<sup>2,3</sup>, 邓丰<sup>4</sup>

(1. 国家电网有限公司华中分部, 湖北 武汉 430077; 2. 南瑞集团有限公司, 江苏 南京 210003; 3. 北京科东  
电力控制系统有限责任公司, 北京 100192; 4. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 绝缘故障大多采取被动检修, 难以实时监控并提前预警。对此, 该文利用模糊逻辑算法提出一种电力线路绝缘故障预警方法。通过分析绝缘子的污秽放电过程以及行波产生机理, 发现绝缘故障行波具有周期性, 绝缘性能下降越严重, 产生的行波幅值越大, 周期越短。利用以上特性, 将检测到的故障行波幅值与时间间隔作为输入量, 以故障预警程度作为输出量, 利用模糊逻辑算法构建两者的模糊关系, 并建立模糊规则库, 实现可靠绝缘预警。实验结果表明, 所提方法能灵敏辨识绝缘子的绝缘性能, 提供实时预警信息。

**关键词:** 绝缘故障; 模糊理论; 预警; 现场试验

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.022 中图分类号: TM75 文章编号: 1673-9140(2022)06-0190-08

## Early warning method of power line insulation fault based on fuzzy logic algorithm

LI Qunshan<sup>1</sup>, LIU Zhicheng<sup>1</sup>, LI Xing<sup>1</sup>, XU Zhengqing<sup>2,3</sup>,  
LI Yukai<sup>2,3</sup>, HAN Jiabing<sup>2,3</sup>, DENG Feng<sup>4</sup>

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China; 2. NARI Group Corporation, Nanjing 210003, China; 3. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China; 4. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In view of the insulation fault of transmission lines, passive maintenance and prevention are mostly adopted, which can not realize real-time monitoring and early warning. In this paper, the mechanism of pollution discharge and traveling wave generation is analyzed. The analysis results indicate that the insulation fault generates periodical traveling wave. The more serious insulation performance decreases, the greater amplitude and the shorter period of the traveling wave generated. According to the characteristic mentioned above, fuzzy theory is used to realize the early warning. The amplitude and time interval of the fault traveling wave are taken as the input, and the degree of fault warning is taken as the output. Moreover, the fuzzy relation is determined to establish the fuzzy rule base, so as to realize fuzzy early warning. The field test results show that the electric power line insulation fault early warning system has high identification sensitivity, which can predict the insulation performance of the line insulator accurately.

**Key words:** insulation fault; fuzzy theory; early warning; field testing

收稿日期: 2021-04-17; 修回日期: 2022-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(52077008)

通信作者: 邓丰(1983—), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统微机保护、故障定位等研究; E-mail: df\_csust@126.com

随着电压等级不断提高,大气污染日益严重,常在户外运行的绝缘子容易受天气以及环境因素的影响,导致其绝缘性能降低,严重时甚至发生污闪事故。据相关数据统计,因污闪引起的绝缘闪络事故位居电网总事故的第 2 位<sup>[1]</sup>,仅次于雷击事故,但绝缘闪络事故发生面积大,造成的经济损失远大于雷击事故<sup>[2]</sup>。因此,一旦发生污闪事故,将严重影响电力系统安全运行的经济性和稳定性<sup>[3-4]</sup>。

高压线路绝缘子发生污秽放电后,绝缘性能下降,运行特性发生变化。基于此,学者们提出了紫外线成像<sup>[5-6]</sup>和超声波检测<sup>[7]</sup>等非电量检测方法。文献<sup>[5-6]</sup>采用紫外线成像法,其原理利用一种特殊紫外成像仪,将收到紫外线信号转化为可见光,从而检测出绝缘子的绝缘性能,但绝缘子附近的均压环或者导线产生电晕放电,反射到紫外成像仪上会出现多个亮点,容易造成绝缘子串故障辨识困难;文献<sup>[7]</sup>将放电产生的超声波信号转换成电信号进行处理,实现了对绝缘子污秽放电的监测,但需引入额外的超声波传感器。针对绝缘子电气特性,学者们提出了以泄漏电流法<sup>[8-10]</sup>为代表的电量检测法。文献<sup>[8-9]</sup>采集各杆塔绝缘子的泄漏电流,通过 GPRS 网络传输到控制中心进行分析处理,能全面可靠地分析整个线路的绝缘状况,但需在每个杆塔都安装泄漏电流采集器;文献<sup>[10]</sup>采用泄漏电流和运行电压的相位差、泄漏电流的有效值反应绝缘子污闪过程的变化,并将其作为神经网络模型的输入量,实现绝缘子绝缘状况预测,但该方法需要采集大量实验测试样本,投资成本高。

当绝缘子发生污秽放电时将产生行波信号,通过采集该行波并分析其特征,能获得绝缘子污闪状况信息。对此,本文以故障行波幅值和时间信息衡量绝缘子故障程度,并利用模糊逻辑算法可靠划分绝缘子的绝缘性能,再通过预警系统发出告警,提前防止跳闸发生,对于消除萌芽状态中的绝缘故障具有重要意义。

## 1 绝缘故障行波特性分析

### 1.1 绝缘子污闪过程分析

绝缘子裸露运行在自然环境中,受到雨露霜雪、

粉尘、废气、鸟粪等污秽物的污染,导致绝缘子表面积污,形成积污层。若绝缘子表面干燥、不导电,则对绝缘性能无影响;若受到天气影响,绝缘子表面湿润、电导增大、电流密度增大,积污层发热导致积污层被烘干,形成干区,导致干区电阻大大升高。工作电压几乎加在该区域,电场强度增加,当达到干区附近,因空气的碰撞游离产生局部电弧。随着电弧燃烧大量发热,导致弧足被进一步烘干,干区增大,电弧被拉长。在交流电压周期性变化时,电弧将出现“燃弧—熄灭”的交替变化。因此,局部电弧是间歇性的、不稳定的放电过程<sup>[11]</sup>。

此外,绝缘子串爬电距离较小或积污严重状况下受到雾、小雨等天气影响,湿润部分电导率大大增加,形成较大的沿面放电电流,温度激增,可能达到热游离状态,此时电弧不再需要较高电场强度也可维持放电,进而自动延伸贯穿绝缘子的两级,最后造成贯穿性闪络。

### 1.2 行波产生机理及特性分析

当绝缘子发生污秽放电时,绝缘子两端电压发生突变,进而在线路上产生行波沿线路传播,如图 1 所示。

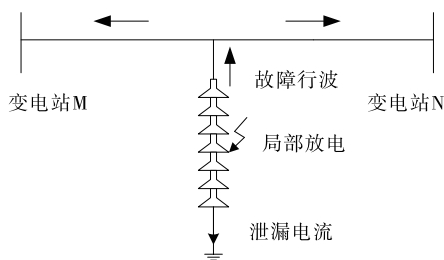


图 1 绝缘子局部放电等效示意

Figure 1 Equivalent diagram of insulator pollution discharge

随着绝缘子污秽程度加重,绝缘子串上的电晕效应加剧,产生重复性脉冲电流,由此在线路上产生的故障行波的幅值增大,时间间隔减小;而断路器开断、短路故障以及雷击干扰等情况下产生的行波幅值是随机的,间隔时间无法确定且一般较长。因此,行波幅值与产生间隔时间的信息可以衡量绝缘子的绝缘性能下降程度。

本文通过控制绝缘子串两端所加电压来控制不同绝缘子的泄漏电流,等效模拟绝缘子串的绝缘性

能下降程度。采集不同电压下绝缘子串产生的行波波形,并分析脉冲行波电流的产生时间间隔与幅值情况,如图 2 所示,当绝缘子串承受电压升高时泄漏电流增大,在相同时间内脉冲电流个数增多,产生间隔时间减小,且幅值增大。因此,随着绝缘子绝缘性能下降程度加重,可通过行波产生的时间间隔区别绝缘故障与其他短路、雷击故障,并通过幅值大小判断绝缘劣化程度的强弱。

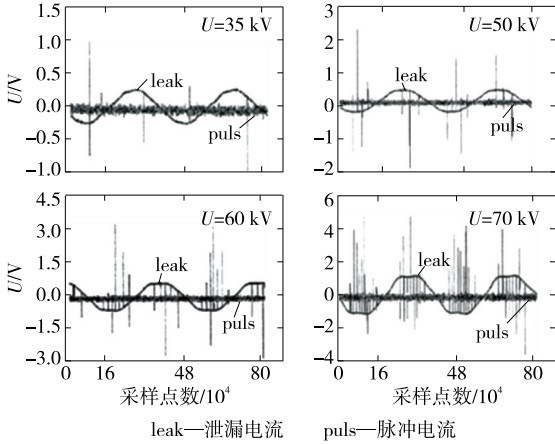


图 2 不同电压下绝缘子脉冲电流变化

Figure 2 Variation of insulator pulse current under different voltages

此外,相较于各种线路短路故障或接地故障,绝缘子沿面放电产生的故障行波信号较微弱,需要配置灵敏的检测装置。该文采用专门研制的穿芯式行波传感器,可捕捉到绝缘故障产生的行波信号。在绝缘子介质表层形成严重污秽之前,找出污秽放电绝缘子,判定是否允许继续运行,或进行污秽处理,继而实现绝缘故障预警的目的。

## 2 模糊逻辑算法原理

### 2.1 模糊集合

经典的集合理论中,对集合中每个元素隶属关系都是明确描述的。若有元素  $k$  属于集合  $K$ ,记作  $k \in K$ ,用函数值“1”表示;若元素  $k$  不属于集合  $K$ ,记作  $k \notin K$ ,用函数值“0”表示。而在模糊集合中,元素  $k$  存在隶属关系不明确的情况,即元素  $k$  可以部分属于集合  $K$ ,用隶属度函数  $u(k)$  来表示,其中  $u(k) \in [0,1]$ ,元素  $k$  与集合  $K$  存在一种映射关

系,每一个  $k$  值均对应唯一一个隶属度  $u(k)$ 。

### 2.2 模糊关系运算

模糊关系描述集合元素间某种映射关系的程度,属于模糊集合的一种。若有限论域内集合  $A$ 、 $B$  分别具有  $m$ 、 $n$  个元素,则可用矩阵表示  $A$ 、 $B$  的模糊关系:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

若已知集合  $A$  和模糊关系  $R$ ,经过运算求得另一个集合  $B$ ,称为模糊变换,也即把输入量通过模糊变换求得输出量的过程。

设集合  $A$  为  $n$  维列向量,模糊矩阵  $R$  为  $m \times n$  阶矩阵,可得  $B=RA$ ,则  $B$  为  $m$  维列向量:

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可知,模糊变换过程属于线性变换,可将向量  $A$  线性变换为向量  $B$ 。

隶属度函数定量描述 2 个集合元素是否符合某种关系的程度,取值范围  $[0,1]$ 。可将列向量  $U = [u_1, u_2, \dots, u_m]$ 、 $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$  看作不同论域的模糊集合,则有  $U$ 、 $V$  的模糊关系  $R$  的隶属关系函数  $R(u, v)$ ,可用  $m \times n$  阶模糊矩阵表示,即

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} \mu_R(u_1, v_1) & \mu_R(u_1, v_2) & \cdots & \mu_R(u_1, v_n) \\ \mu_R(u_2, v_1) & \mu_R(u_2, v_2) & \cdots & \mu_R(u_2, v_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_R(u_m, v_1) & \mu_R(u_m, v_2) & \cdots & \mu_R(u_m, v_n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$(r_{ij})_{m \times n} = \mu_R(u_i, v_j) \in [0,1]$  定量描述元素对  $(u_i, v_j)$  的相关程度,计算方便,物理意义直观明确,因此模糊关系常用模糊矩阵表示。

## 3 基于模糊逻辑的电力线路绝缘预警方法

前已述及,绝缘子发生沿面放电将产生脉冲电

流,在线路上传输形成行波信号,并被监测装置采集。当绝缘子污秽程度越严重,泄漏电流越大,绝缘子串电晕效应越剧烈,则脉冲电流产生时间间隔越短,幅值越大,则线路上产生的行波信号时间间隔越短,幅值越大。由于导致绝缘子污秽程度受环境因素影响,具有较强随机性,故行波信号的幅值和时间间隔具有模糊特性,因此,可用模糊逻辑的方法建立行波信号幅值和时间间隔与绝缘性能下降程度的关系。

进行模糊推理的关键在于对输入量和输出量进行模糊化,并建立输入与输出之间的模糊关系矩阵。本文将行波幅值(travelling wave amplitude, TA)与行波产生时间间隔(time interval, TI)作为输入量,将预警程度作为输出量,对其进行模糊化处理,并建立二者的模糊关系,步骤如下。

### 1) 确定论域。

输入量的基本论域应取 TA 和 TI 在轻微、严重绝缘故障产生的行波幅值与时间间隔作为上下限,其值可查找线路历史运行数据确定<sup>[12]</sup>。假设行波幅值历史数据  $H_{TA} \in (a, b)$ , 时间间隔历史数据  $H_{TI} \in (c, d)$ , 使用量化因子  $k$  分别将其转换至模糊集上的论域(0, 8), 即

$$\begin{cases} k_{TA} = \frac{8}{b-a} \\ k_{TI} = \frac{8}{d-c} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} F_{TA} = k_{TA} H_{TA} \\ F_{TI} = k_{TI} H_{TI} \end{cases} \quad (5)$$

式(4)、(5)中  $k_{TA}$ 、 $k_{TI}$  分别为 TA 和 TI 的量化因子;  $F_{TA}$ 、 $F_{TI}$  分别为 TA、TI 模糊集上的量化等级。

实验结果表明,可赋予 TA、TI 5 种程度的语言变量,即 TA/TI: LL(大), L(较大), M(中), S(较小), SS(小); 将输出预警程度 OP 标准化论域设置为(0, 2), 赋予预警 3 种程度的语言变量为 NW(不预警), GW(一般预警), SW(严重预警)。

### 2) 确定隶属函数。

对于输入量 TI, 文献[13]分析了绝缘子污秽程度与表征局放脉冲电流个数的参数  $\alpha$  的关系, 得出  $\alpha$  与污秽程度基本满足线性关系, 并给出了重度污秽的参考取值。因此本文通过分析实验结

果, 确定了不同污秽程度对应的脉冲电流时间间隔参考值, 各污秽程度的时间间隔参考值的隶属度为 1, 并选择三角形隶属函数。对于输入量 TA, 实验结果表明: 随着绝缘子污秽程度加深(实验中使用 NaCl 溶液模拟绝缘子污秽), TA 也随之增加, TA 与绝缘子污秽程度也近似呈线性关系, 同理可建立 TA 的隶属函数。TA 和 TI 的隶属函数如图 3 所示, 由输入隶属函数得到输入的语言变量赋值, 如表 1 所示。

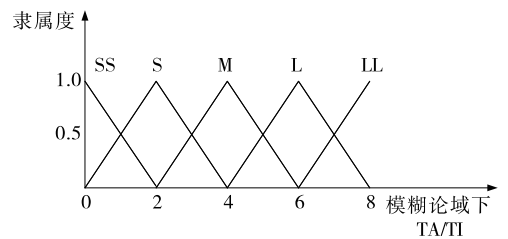


图 3 TA/TI 隶属函数

Figure 3 Traveling wave amplitude/time interval membership function graph

表 1 TA/TI 的语言变量幅值

Table 1 Amplitude table of linguistic variables for traveling wave amplitude/time interval

语言值	不同量化等级下的隶属度								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
LL	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1
L	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
M	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
S	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
SS	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0

### 3) 确定模糊预警规则库。

进一步地, 建立 TA/TI 输入量与预警输出 OP 的模糊预警规则库。大量实验表明, 绝缘性能下降时 TA 和 TI 往往同步变化, 当行波幅值较大且时间间隔较小时, 表明此时绝缘性能下降程度较高。因此, 设置 TI 模糊度为 L 或 LL 以及 TA 模糊度为 SS 时输出量为 NW; 当 TA 模糊度为 M、L 或 LL 且 TI 模糊度为 SS、S 或 M 时, 可认为此时绝缘性能下降程度高, 应发出 SW 预警信号; 对于 (TI, TA) = (SS, M) 或 (M, LL), 该情况表明绝缘故障正在迅速发展, 应发出 SW 预警, 防止绝缘性能进一步下降;



其余的 TA/TI 模糊组合可认为是轻微、严重故障的过渡状态,应发出 GW 预警信号。模糊预警规则库如表 2 所示。

表 2 模糊预警规则库

Table 2 Fuzzy early warning rule base

TI	不同 TA 下的输出量				
	SS	S	M	L	LL
SS	NW	GW	SW	SW	SW
S	NW	GW	GW	SW	SW
M	NW	GW	GW	GW	SW
L	NW	NW	NW	NW	NW
LL	NW	NW	NW	NW	NW

任意给出一组输入量(TA, TI),利用模糊预警规则库可得到输出值。通过构建行波幅值、产生时间间隔和绝缘故障严重程度的模糊逻辑,可实现绝缘子绝缘性能下降程度的实时监控,并为运维人员提供绝缘故障预警信息。

完成绝缘预警后可利用双端行波法定位故障绝缘子所在位置。以图 1 所示线路为例,故障行波从故障绝缘子产生,并向线路两侧传输,变电站 M、N 通过穿芯式行波传感器检测到故障行波,通过标定故障行波到达变电站时刻并结合波速度可计算出故障绝缘子所在位置,定位公式为

$$d_i = \frac{(t_M - t_N)v + l}{2} \quad (6)$$

式中  $d_i$  为故障绝缘子距变电站 M 的距离;  $t_M$ 、 $t_N$  分别为故障行波到达 M、N 时刻;  $v$  为波速度,取经验值 298.73 km/ms;  $l$  为变电站 M、N 之间的线路长度。

## 4 电力线路绝缘故障预警实验

### 4.1 专用行波传感器

如图 4 所示,采用本文前期研制的专用行波传感器检测污秽放电产生的微弱行波信号<sup>[14-15]</sup>。电容式电压互感器(CVT)接地线入地电流正比于母线电压的导数:

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (7)$$

其中,  $C$  为 CVT 电容,  $u$  为母线处对地电压。因此,CVT 接地线上的电流可以反映母线电压的行波

信号,并且该电流突变量比母线电压行波突变更大,有利于微弱行波信号的检测。为检测 CVT 接地线上的电流,将 Rogowski 线圈套接在 CVT 接地线上,当故障行波到达母线时,检测线圈二次侧产生的感应电流,实现行波信号提取。该装置已实际挂网运行,现场故障绝缘子定位实验证明,该装置能够捕捉污秽放电产生的微弱行波信号<sup>[11]</sup>。



图 4 专用行波传感器

Figure 4 Special traveling wave sensor

### 4.2 实验接线原理图

为模拟绝缘子污秽放电现象,在工频电压作用下对绝缘子串加压处理,绝缘子串空气间隙较小处更容易发生污秽放电。依次模拟实际运行情况绝缘子放电过程,测试系统灵敏性实验接线原理如图 5 所示,将绝缘子下端接地,而绝缘子上端与工频高压电源相连,这与绝缘子实际情况相符。为模拟实际现场接线,在绝缘子上端并联电容值 400 pF 的电容器以等效变电站电容式电压互感器。在电容器接地线上套接专用行波传感器,并将传感器输出端与线路绝缘故障预警装置相连。行波信号经过传感器传变后被送入绝缘故障预警装置进行分析处理。

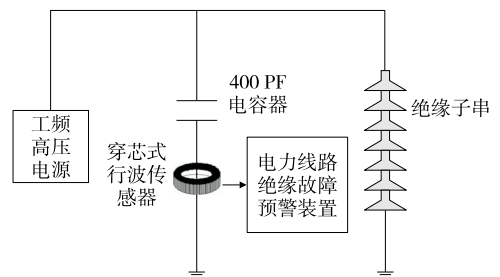


图 5 实验接线原理示意

Figure 5 Schematic diagram of experimental wiring

### 4.3 实验步骤

模拟绝缘子串局部火花放电试验,记录不同电压等级、不同污秽程度下的绝缘预警结果,具体步骤如下:

1)按图 5 进行试验设备接线;

- 2)对绝缘子串表层喷洒不同浓度 NaCl 溶液,进行加污加湿处理;
- 3)调节工频高压电压源,逐渐升压,制造人为地绝缘子串污秽放电;
- 4)记录绝缘预警主机上实验数据;
- 5)缓慢调节工频高压电压源至 0;
- 6)重复第 3~5 步。

#### 4.4 实验数据

在实验过程中,随着电压升高,绝缘子周围产生电晕并发出声响,绝缘预警装置不动作。随着增高电压,绝缘子出现火花放电。此时,绝缘故障预警装置对检测到的行波信号处理,输出预警结果。绝缘子串局部火花放电现象如图 6 所示,黑色圆圈内发出亮光处为放电部位。预警装置记录的火花放电时电压初始行波波形如图 7 所示。

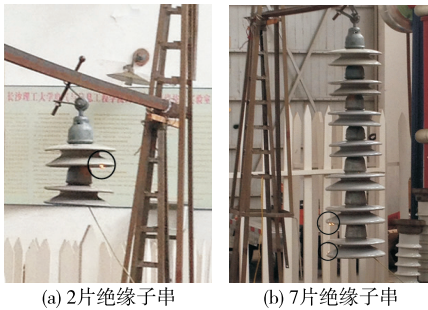


图 6 不同数量绝缘子串火花放电示意

Figure 6 Partial spark discharge diagram of different number insulator strings

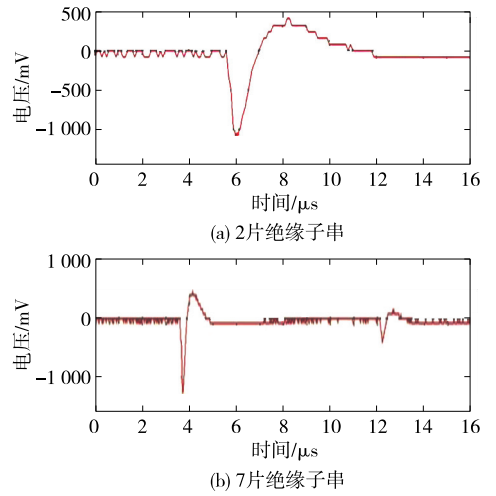


图 7 绝缘故障初始电压行波波形

Figure 7 Initial voltage traveling wave waveform of insulation fault

#### 4.5 实验结果分析

该实验测试 2、7 片绝缘子污秽放电现象,即模拟在 35、110 kV 电压等级下的绝缘子运行情况,记录实验数据及绝缘故障预警装置动作情况如表 3 所示,以 35 kV 电压等级下实验序号 2 为例,通过分析绝缘预警装置记录的行波波形幅值及产生的时间间隔,并结合绝缘子状态数据库确定行波幅值与时间间隔的上下限(通过模拟不同工况并进行多次实验建立),由式(4)、(5)得到模糊控制逻辑的输入量(TA, TI)=(6, 3)。通过查询表 1,确定有 2 条模糊规则被激活。

规则 1 TA 为 L 时的隶属度为 1, TI 为 S 时的隶属度为 0.5。

表 3 绝缘故障预警装置记录情况

Table 3 Record of insulation fault warning device

序号	电压/kV	不同浓度 NaCl 溶液/ (mg/cm <sup>2</sup> )	出现电弧放电时 电压幅值/kV	记录预警装置 初始行波到达时刻	预警结果
1		无	—	—	不预警
2		低浓度<0.01	19.53	09:27:53 873.161.060	一般预警
3	35	低浓度<0.01	18.24	09:51:32 273.173.560	一般预警
4		高浓度>0.01	16.25	10:03:16 933.378.720	严重预警
5		高浓度>0.01	16.53	10:18:51 616.228.340	严重预警
6		无	—	—	不预警
7		低浓度<0.01	88.21	11:18:51 245.821.000	一般预警
8	110	低浓度<0.01	90.03	11:32:21 937.681.620	一般预警
9		高浓度>0.01	78.13	11:46:23 638.019.270	严重预警
10		高浓度>0.01	76.23	11:58:36 731.303.320	严重预警

规则 2 TA 为 L 时的隶属度为 1, TI 为 M 时的隶属度为 0.5。

根据各输入量的最小隶属度确定本规则对输出量的隶属度,可得规则 1 对应严重预警的隶属度为 0.5,规则 2 对应一般预警的隶属度为 0.5。由于此时严重预警与一般预警的隶属度相同,应通过加权平均法进一步确定预警程度:令严重预警 SW 的权重为 2,一般预警 GW 权重为 0,不预警权重为 -2,则该算例的输出量为  $(0.5 \times 2 + 0.5 \times 0) / (0.5 + 0.5) = 1$ ,最后根据输出量规定进行去模糊化。由于输出量为 1 时对应一般预警,则绝缘预警装置发出一般预警信号。

由表 3 实验结果可知,绝缘预警装置能有效检测 35、110 kV 下绝缘子污秽放电产生的行波信号。随着出现电弧放电时的电压幅值降低,表明绝缘子绝缘性能逐渐下降,根据行波幅值放电所提模糊逻辑算法,正确判断绝缘子故障严重程度,并提供预警信息,正常运行情况下绝缘预警装置无误动。

## 5 结语

针对电力线路绝缘水平监测难的问题,本文深入分析绝缘污闪过程及故障行波产生机理,提出了基于模糊逻辑算法的电力线路绝缘预警方法,并通过实验验证所提方法的可行性。

1)工频电压下绝缘子表面积污导致沿面电弧放电,进而产生行波沿线路传播,绝缘故障行波具有周期性,且随着绝缘子污秽程度加重,行波幅值增大,产生时间间隔减小。通过分析绝缘故障行波幅值及产生时间间隔可以反映绝缘性能下降程度。

2)基于模糊逻辑算法,利用故障行波幅值和时间间隔 2 个特征信息作为输入量,与绝缘预警程度建立模糊关系,构建模糊规则库,可准确反映绝缘子的绝缘性能状况。通过设计绝缘子污秽放电实验,验证了所提方法对监控线路绝缘故障的灵敏性,对 35、110 kV 电压等级绝缘故障提供实时预警,并且可靠无误动。

## 参考文献:

[1] 王思华,王军军,赵磊,等.污秽成分对复合绝缘子表面电场的影响[J].中国电力,2021,54(7):149-157.  
WANG Sihua, WANG Junjun, ZHAO Lei, et al. Influ-

ence of pollution components on surface electric field of composite insulators[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 149-157.

- [2] 王华倩,王胜辉,杨广华,等.复合 I 型绝缘子的直流鸟粪闪络特性研究[J].电测与仪表,2020,57(2):69-73.  
WANG Huaqian, WANG Shenghui, YANG Guanghua, et al. Study on the bird streamer flashover characteristics of I-type composite insulator string[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 69-73.
- [3] 王克胜,赵彦平,原帅,等.基于电场计算及模态分析的 220 kV GIS 盆式绝缘子裂纹缺陷检测方法研究[J].电网与清洁能源,2021,37(8):32-38+47.  
WANG Kesheng, ZHAO Yanping, YUAN Shuai, et al. The crack defect detection method of 220 kV GIS basin-type insulators based on electric field calculation and modal analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 32-38+47.
- [4] 丁登伟,刘卫东,张紫薇,等.基于超宽频电压测量的 1 100 kV GIL 绝缘子闪络电压时频特征试验研究[J].高压电器,2020,56(2):1-6.  
DING Dengwei, LIU Weidong, ZHANG Ziwei, et al. Experimental investigation on time-frequency characteristics of flashover voltage of 1 100 kV GIL insulator based on UWB voltage measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 1-6.
- [5] 文华,周文俊,唐泽洋,等.基于紫外成像技术的 110 kV 输电线路复合绝缘子融冰闪络预警方法及判据[J].高电压技术,2012,38(10):2589-2595.  
WEN Hua, ZHOU Wenjun, TANG Zeyang, et al. Ice-melting flashover pre-warning method and criterion of composite insulators on 110 kV transmission lines based on ultraviolet imaging technology[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2589-2595.
- [6] 马飞越,刘泽华,牛勃,等.基于紫外光/可见光的 GIS 内部机器人异物识别技术[J].高压电器,2020,56(6):93-99.  
MA Feiyue, LIU Zehua, NIU Bo, et al. Foreign matter recognition technology of robot in GIS based on ultraviolet/visible light[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 93-99.
- [7] 杨奕,陈以方,洪玉萍,等.合成绝缘子的超声检测方法[J].无损检测,2003,25(7):337-339.  
YANG Yi, CHEN Yifang, HONG Yuping, et al. Ultrasonic testing method for composite insulator[J]. Nondestructive Testing, 2003, 25(7): 337-339.

- [8] 刘宗杰,赵锐,刘玉玲,等.配电网有功泄漏电流实时测量方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):28-32.  
LIU Zongjie,ZHAO Rui,LIU Yuling,et al.A method of real time measurement for active leakage current in distribution network[J].Journal of Electrical Power Science and Technology,2019,34(2):28-32.
- [9] 何宁辉,王世杰,刘军福,等.基于深度学习的航拍图像绝缘子缺失检测方法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(12):132-140.  
HE Ninghui,WANG Shijie,LIU Junfu,et al.Research on infrared image missing insulator detection method based on deep learning[J].Power System Protection and Control,2021,49(12):132-140.
- [10] 万收兰,程养春,李成榕.基于人工神经网络的零值绝缘子诊断[J].高电压技术,2002,28(6):6-7+10.  
WAN Shuolan,CHENG Yangchun,LI Chengrong.Diagnosis of faulty porcelain insulators based on artificial neural network[J].High Voltage Engineering,2002,28(6):6-7+10.
- [11] 刘丰,曾祥君,谷应科,等.基于行波技术的电力线路绝缘预警系统及其现场试验[J].南方电网技术,2019,13(6):24-29.  
LIU Feng,ZENG Xiangjun,GU Yingke,et al.Traveling wave based insulation faults early warning system and its field test[J].Southern Power System Technology,2019,13(6):24-29.
- [12] 赵庆喜,蔡夏诗,盛从兵,等.基于行波理论的电力线路绝缘故障预警系统[J].电力科学与技术学报,2014,29(3):66-72.  
ZHAO Qingxi,CAI Xiashi,SHENG Congbing,et al.Traveling wave based insulation faults pre-warning system for transmission line[J].Journal of Electrical Power Science and Technology,2014,29(3):66-72.
- [13] 姚陈果,李璟延,米彦,等.绝缘子安全区泄漏电流频谱特征提取及污秽状态预测[J].中国电机工程学报,2007,27(30):1-8.  
YAO Chenguo,LI Jingyan,MI Yan,et al.Abstracting frequency spectrum characteristics of insulators leakage current in safety zone to forecast the contamination condition[J].Proceedings of the CSEE,2007,27(30):1-8.
- [14] 李泽文,曾祥君,夏翊翔,等.高压交流输电线路故障行波定位技术综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):104-121.  
LI Zewen,ZENG Xiangjun,XIA Yixiang,et al.Review of traveling wave fault location technology for high voltage AC transmission lines[J].Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science),2022,19(3):104-121.
- [15] 曾祥君,尹项根,林福昌,等.基于行波传感器的输电线路故障定位方法研究[J].中国电机工程学报,2002,22(6):43-47.  
ZENG Xiangjun,YIN Xianggen,LIN Fuchang,et al.Study on fault location for transmission lines based on the sensor of traveling-wave[J].Proceedings of the CSEE,2002,22(6):43-47.

(上接第 156 页 Continued from page 156)

- [14] 张东霞,苗新,刘丽平,等.智能电网大数据技术发展研究[J].中国电机工程学报,2015,35(1):2-12.  
ZHANG Dongxia,MIAO Xin,LIU Liping,et al.Research on the development of smart grid big data technology[J].Proceedings of the CSEE,2015,35(1):2-12.
- [15] 薛禹胜,赖业宁.大能源思维与大数据思维的融合(一)大数据与电力大数据[J].电力系统自动化,2016,40(1):1-8.  
XUE Yusheng,LAI Yening.Integration of macro energy thinking and big data thinking part one big data and power big data[J].Automation of Electric Power Systems,2016,40(1):1-8.
- [16] 刘科研,盛万兴,张东霞,等.智能配电网大数据应用需求和场景分析研究[J].中国电机工程学报,2015,35(2):287-293.  
LIU Keyan,SHENG Wanxing,ZHANG Dongxia,et al.Research on big data application requirement and scenario analysis of intelligent distribution networks[J].Proceedings of the CSEE,2015,35(2):287-293.
- [17] 葛磊蛟,王守相,瞿海妮.智能配用电大数据存储架构设计[J].电力自动化设备,2016,36(6):194-202.  
GE Leijiao,WANG Shouxiang,QU Haini.Design of big data storage architecture for intelligent power distribution[J].Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):194-202.
- [18] 郝然,艾芊,肖斐.基于多元大数据平台的用电行为分析构架研究[J].电力自动化设备,2017,37(8):20-27.  
HAO Ran,AI Qian,XIAO Fei.Research on power consumption behavior analysis framework based on multivariate big data platform[J].Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):20-27.