

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.09.034

基于泄漏电流特征信息及概率神经网络的 绝缘子污秽度预测模型

汪万平¹, 陈伟根², 刘 凡¹, 苏明虹¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610072;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了提取泄漏电流安全区内体现绝缘子污秽度的特征信息,在反复试验的基础上,测取了 4 种污秽度下 XP-70 型绝缘子串的泄漏电流,采用了自适应阈值法对原始信号进行消噪,提取出安全区内的 3 个特征量:有效值均值、有效值最大值和有效值标准差,分析得出这 3 个特征量与绝缘子表面等值附盐密度呈指数拟合关系。选择了 400 组泄漏电流有效值特征量作为训练与识别样本,建立了基于概率神经网络的绝缘子污秽度预测模型。仿真和试验结果对比表明,模型预测准确率达 87.5%。研究结果不仅对线路绝缘子清扫决策有一定的指导作用,而且为输电线路污闪预警系统特征量的优化选择提供了理论依据。

关键词: 绝缘子; 泄漏电流; 污秽度; 预测模型; 概率神经网络

Contamination Level Forecast Model of Insulators Based on Leakage Current Characteristics and Probabilistic Neural Network

WANG Wanping¹, CHEN Weigen², LIU Fan¹, SU Minghong¹

(1. Sichuan Electric Power Research Institute of State Grid Corporation, Chengdu 610072, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To obtain contamination characteristics of insulators in safe zone of leakage current, the leakage current waveforms of XP-70 insulator string under four contamination levels were extracted through a series of experiments in laboratory. The original signal was denoised by the self-adaptive threshold method to achieve three characteristic quantities of leakage current in time domain, namely, the mean value, the maximum value, and the standard deviation of the RMS value. Analysis suggests that these three characteristic quantities show exponential relation with the increase of ESDD, respectively. Moreover, a contamination level forecast model of insulators was established based on probabilistic neural network by choosing 400 groups of leakage current RMS values as training and recognizing samples. Simulation shows that the forecast accuracy of the model is 87.5%. This research may facilitate clearing decision for polluted insulators, and may provide a theoretical basis for optimal selection of characteristic quantities for pre-warning system of transmission line contamination flashover.

Key words: insulator; leakage current; contamination level; forecast model; probabilistic neural network

0 引言

绝缘子在染污、受潮等条件下,外绝缘强度会急剧下降,运行电压作用时可能演变为污闪事故,影响供电的安全性和可靠性,给电力系统带来巨大的损

失^[1]。绝缘子作为广泛使用的输电设备,工作性质决定其表面积污不可避免,这就意味着污闪不可能从根本上杜绝,而只能预测^[2]。

国际大电网会议第 33 次委员会推荐了 5 种测定绝缘子污秽度的方法,即等值附盐密度法、电流脉

收稿日期:2017-04-05; 修回日期:2017-06-06

冲计数法、闪络电压梯度法、积分表面污层电导率法和泄漏电流法。实践表明: 泄漏电流法结合了污秽度、环境温、湿度等因素, 是一个动态量, 能较全面反映绝缘子污秽状态^[9]。

绝缘子泄漏电流的影响因素主要有 3 个: 运行电压、污秽和运行环境(温度、湿度和气压)^[4]。目前对泄漏电流特征量的研究主要集中在时域和频域特性的分析^[5-8]。时域有效值是所有泄漏电流特征量中最易监测和处理的参量, 也是被广泛认同的最有效的特征量之一。文[9]深入研究了污秽放电过程中泄漏电流的发展特性, 根据有效值将污秽放电发展过程划分为安全区(<50 mA)、预报区(50~150 mA)和危险区(>150 mA)3 区段, 同时提出: 预报区和危险区泄漏电流大, 往往很快就发展为污闪, 预警时间裕度小; 而安全区泄漏电流虽然小, 但有足够的时间裕度, 因此应深入研究安全区的泄漏电流有效值特性。文[10]提取出安全区泄漏电流有效值的均值 $\bar{I}$ 、有效值的最大值 $I_{\max}$ 和有效值的标准差 σ 以及 3 次谐波与基波幅值比 k 等 4 个特征量, 并指出 3 个有效值特征量对污秽预测结果的影响程度各不相同; 文[11-14]提出建立基于人工神经网络、最小二乘支持向量机的绝缘子污闪预测模型, 包括泄漏电流、温度、湿度等多输入参量的综合网络来对污秽状态进行预测, 希望把影响污闪的运行电压、污秽度以及环境因素都考虑进来, 但建立复杂的多参数模型本身很困难, 且研究多侧重于污闪发展过程的描述, 而尚未对绝缘子的污秽度水平实现准确的预测。

文中基于绝缘子交流人工污秽试验, 选择了自适应阈值小波消噪方法对泄漏电流原始信号进行前期处理, 分析了绝缘子污秽放电安全区泄漏电流有效值均值 $\bar{I}$ 、有效值最大值 $I_{\max}$ 和有效值标准差 σ 等 3 个时域特征量的随污秽度的变化规律, 并以这 3 个时域有效值特征量为输入, 绝缘子污秽度等级为输出, 建立了基于概率神经网络的绝缘子污秽度预测模型。该模型结构简单、训练简洁, 用线性的学习算法来完成非线性学习算法, 同时保持非线性算法的高精度等特性, 能够满足在线监测系统实时处理的要求。预测结果表明: 该模型能够较好的实现绝缘子污秽度等级的预测, 对线路绝缘子清扫决策有一定的指导作用, 而且为输电线路污闪预警系统特征量的优化选择提供了理论依据。

1 绝缘子交流人工污秽试验

1.1 试验装置和试品

在高压试验大厅人工雾室中进行, 雾室尺寸为

4.0 m×3.7 m×4.0 m, 接线原理见图 1。图 1 中, 试验电源是移圈式调压器 TDJY-1000/10 和试验变压器 YDJ-900/150 组成的交流污秽试验电源。试验变压器的额定电流为 6 A, 其最大短路电流可达 30 A, 满足 IEC 60507—2013 与国标 GB/T 4584—2004 对交流污秽试验电源的要求^[15]。试验电源通过人工雾室一侧装设的穿墙套管引入人工雾室, 试验高压端通过 SGB-200 A 交流电容式分压器连接到电压表, 分压器的分压比为 1:1 000。利用泄漏电流检测系统记录污秽放电过程中的泄漏电流和所施加的电压^[16]。

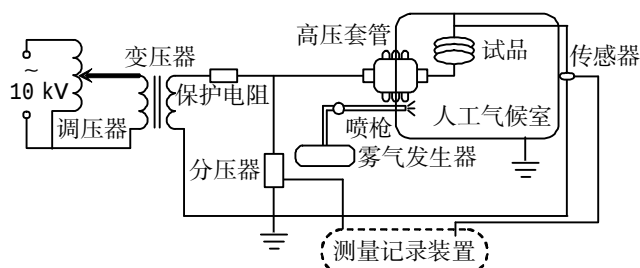


图 1 测量系统接线示意图

Fig. 1 Connection of the measuring system

试品为 XP-70 普通型悬式瓷绝缘子, 试品 3 片一串, 模拟 35 kV 输电线路, 所加相电压为 20.2 kV。试验采用固体污层法预积污, 配制了 4 种污秽度的污物来涂刷绝缘子, 4 种污秽度的配比见表 1, 代表了 4 种污秽水平, 其中 ESDD 为等值盐密, NSDD 为等值灰密。

表 1 试品 XP-70 污秽配比表

Table 1 Contamination sorts of samples XP-70				
污秽度	轻度	中度	重度	严重
ESDD/(mg·cm ⁻²)	0.06	0.12	0.20	0.25
NSDD/(mg·cm ⁻²)	1.00	1.00	2.00	2.00

1.2 试验方法

为了获得环境湿度和污秽度变化时运行电压下的泄漏电流数据, 提取泄漏电流的多重分形特征量, 为污秽度及污闪预测提供指导, 制定以下试验方案:

采用清洁喷雾法持续对雾室放雾, 利用温度湿度仪对雾室空气湿度状况进行测量, 控制试验过程中雾室空气相对湿度约在 60%~80%的中湿度区域。将 4 组涂好并放置 24 h 完全干燥的不同污秽度试品依次放入雾室, 待绝缘子表面受潮湿润后, 加运行电压, 记录从加压开始经传感器检测的连续变化的泄漏电流各个时刻的值, 直到闪络发生的整个放电过程。该试验的目的是在中度环境湿度情况下, 检测不同污秽度下普通型 XP-70 绝缘子串安全区的泄漏电流。

2 试验结果与分析

2.1 小波去噪效果分析

利用 MATLAB 软件,分别用 4 种小波阈值估计方法进行去噪处理,并分析去噪效果。泄漏电流原始波形及 4 种阈值去噪后波形见图 2。

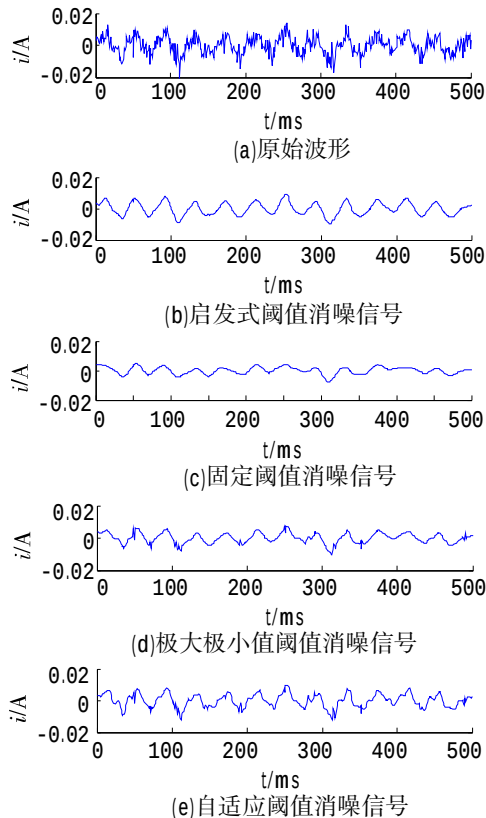


图 2 泄漏电流原始波形及 4 种阈值去噪波形

Fig. 2 Actual waveforms of undenoised and four denoised leakage currents

对比图 2 中去噪后的波形图,可以看出,图 2(b)和(c)在去噪的同时过多地平滑了信号,使波形变得很光滑,尤其在波峰处,但仍可以观察出波形的形状特点;图 2(d)和(e)则较多地保留了波峰处的细节信号,为后续对泄漏电流的分析留下了更多有效信息,其中图 2(e)的自适应阈值法的去噪效果相对较好。因此,文中用自适应阈值法对泄漏电流原始波形去噪,以获得后续分析处理所需的有效信号。

2.2 绝缘子泄漏电流有效值特征量

泄漏电流有效值是最常用的泄漏电流特征量之一,是所有泄漏电流特征量中最容易被监测和处理的参量,也是被广泛认同的具有很高预测性的泄漏电流特征量。不同污秽度下绝缘子泄漏电流的变化特点,仅通过单一的有效值特征量难以清楚地反映,需要深入挖掘有效值的内部特性,以实现对其污秽状态的判断。因此,在实验室人工污秽试验的基础上,

从安全区泄漏电流出发,提取有效值 $I(<50 \text{ mA})$ 的 3 个特征量来做进一步研究,分别是有效值均值 $\bar{I}$ 、有效值最大值 $I_{\max}$ 和有效值标准差 σ ,即:

$$\bar{I} = \left[\sum_{i=1}^N I(i) \right] / N; \quad (1)$$

$$I_{\max} = \max[I(i)]; \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [I(i) - \bar{I}]^2}{N}}. \quad (3)$$

式(1)-(3)中: $I(i)$ 为各采样点的有效值; $\bar{I}$ 为有效值的均值; N 为采样时段内的所有采样点数; $I_{\max}$ 为有效值中的最大值; σ 为有效值与均值的标准偏差。

泄漏电流有效值的均值 $\bar{I}$ 反映了当前泄漏电流的基本大小,泄漏电流的大小直接反映出相同湿润条件下污秽度的不同。最大值 $I_{\max}$ 反映了当前最大的脉冲电流值,随着泄漏电流的持续,污秽表面会产生干带,干带的厚度和宽度反映在泄漏电流上就是脉冲的大小,即有效值的最大值的大小,是一个受污秽度变化影响显著的特征量。而标准差 σ 则反映了脉冲的多少,脉冲数越多则标准差就会越大,且 σ 从另一个角度反映了泄漏电流各个采样值与均值之间的偏差度,也即泄漏电流的分布离散程度。由此可以看出 3 个特征参量互为补充,从不同角度描述了泄漏电流的特点,全面地反映出单一有效值所不能反映的污秽状态特征。

2.3 泄漏电流有效值特征量与污秽度的关系

为进一步对比分析泄漏电流有效值的 3 个特征参量与污秽度的关系,根据试验得出前述 4 种污秽度下 XP-70 绝缘子的 3 个特征量随污秽度的变化情况,分别见图 3-5。

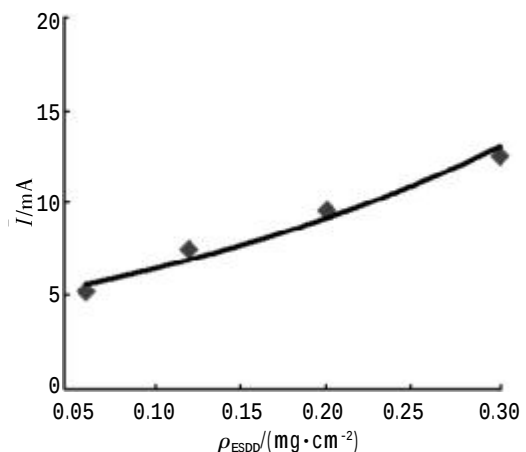


图 3 有效值的均值 $\bar{I}$ 与污秽度的关系

Fig. 3 Relation between typical value of leakage current and ESDD

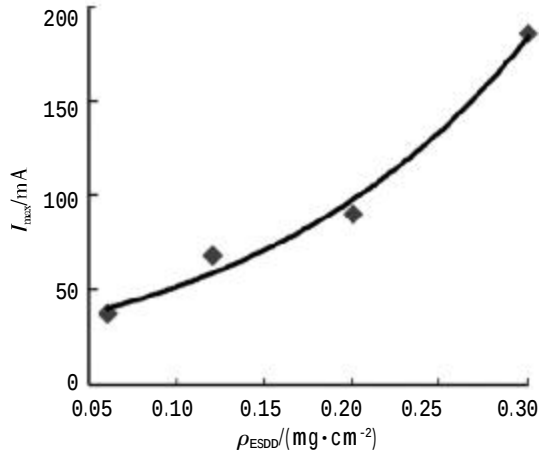
图4 有效值的最大值 $I_{\max}$ 与污秽度的关系

Fig. 4 Relation between maximal value of leakage current and ESDD

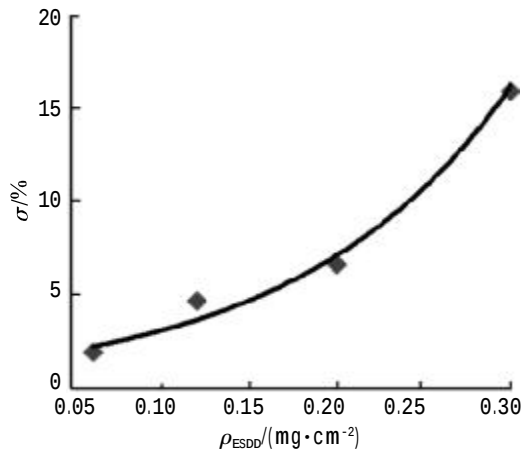
图5 有效值的标准差 σ 与污秽度的关系

Fig. 5 Relation between standard deviation of leakage current and ESDD

由图3可以看出,对于普通型XP-70瓷绝缘子,不同污秽度的泄漏电流有效值的均值是不相同的,均值 $\bar{I}$ 随污秽度的增大而增大,呈近似指数上升趋势,其与 ρ_{ESDD} 的拟合回归方程为

$$\bar{I} = 4.6057e^{3.4757\rho_{\text{ESDD}}} \quad (4)$$

式(4)的拟合度大于0.96。

由图4可知,相同湿润情况下,不同污秽度的泄漏电流有效值的最大值也是不同的, $I_{\max}$ 随污秽度的增加呈近似指数规律增加,其与 ρ_{ESDD} 拟合回归方程如下

$$I_{\max} = 13.956e^{8.1874\rho_{\text{ESDD}}} \quad (5)$$

式(5)的拟合度大于0.96。

如图5所示,随着污秽度的增长,也逐步增大,其与等值盐密 ρ_{ESDD} 关系的拟合回归方程为

$$\sigma = 2.7947e^{6.2826\rho_{\text{ESDD}}} \quad (6)$$

式(5)对应的拟合度大于0.97。

由以上可以得出:中度环境湿度情况下,绝缘子

安全区泄漏电流有效值的3个特征量都随着污秽度的增大而增大,推导出的3个特征量与 ρ_{ESDD} 表示的污秽度之间的3个指数拟合回归方程的拟合度均在0.96以上,这说明3个特征量与污秽度之间的关系显著,可以用于预测污秽水平。

3 概率神经网络污秽度预测模型

3.1 概率神经网络结构及算法

概率神经网络(PNN)是一种径向基函数网络发展而来的一种前馈型神经网络,其理论依据是贝叶斯决策理论,PNN作为径向基网络的一种,适合于模式分类^[17-20]。当分布密度SPREAD的值接近于0时,它构成最邻分类器;当SPREAD的值较大时,它构成对几个训练样本的临近分类器。PNN的层次模型,由输入层、模式层、求和层和输出层共4层组成,其网络结构见图6。

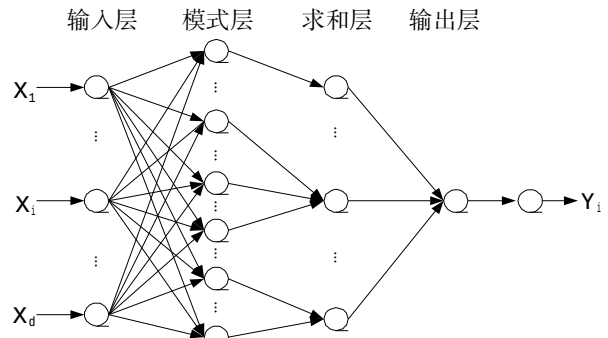


图6 PNN网络结构

Fig. 6 Network structure of PNN

各层的功能如下:

1)输入层接收来自训练样本的值,将特征向量传递给网络,其神经元数目和样本矢量的维数相等。输入样本为

$$\begin{cases} \mathbf{XI} = (X_1, \dots, X_i, \dots, X_d) \\ \mathbf{YI_i} = \mathbf{XI_i} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, $\mathbf{XI_i}$ 和 $\mathbf{YI_i}$ 分别为输入层第 $i(i=1,2,\dots,d)$ 个神经元的输入、输出。

2)模式层计算输入特征向量与训练集中各个模式的匹配关系,模式层神经元的个数等于各个类别训练样本数之和。 $\mathbf{XP_j} = \mathbf{YI_j}, j=1,2,\dots,d$,第 i 类模式的第 j 个模式层神经元所确定的输入输出关系定义为

$$\mathbf{YI_j}(\mathbf{XP_j}) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2}\sigma^d} \exp\left[-\frac{(\mathbf{XP_j} - \mathbf{XP_j})^T(\mathbf{XP_j} - \mathbf{XP_j})}{\sigma^2}\right] \quad (8)$$

式(8)中: d 为输入样本的维数; σ 为平滑因子; $i=$

$1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,G_i; N = \sum_{i=1}^M G_i; M$ 为训练样本集总的类别数; G_i 为第 i 类训练样本数; $\mathbf{XP_j}$ 为第 i 类

训练样本第 j 个数据; $\mathbf{XP}$ 为模式层的输入; $\mathbf{XP}_i(\mathbf{XP})$ 为模式层第 i 类模式的第 j 个神经元输出。

3)求和层是讲某个类别的概率累计得到某个类别的估计概率密度函数。每一类只有一个求和层单元,求和层但与至于属于自己类别的模式层单元相连接。求和层单元的输出与各类基于内核的概率密度的估计成比例。

$$\mathbf{XT}_{ij} = \mathbf{YP}_{ij}(\mathbf{XP}), \mathbf{YT}_i = \frac{1}{G_i} \sum_{j=1}^{G_i} \mathbf{XT}_{ij} \quad (9)$$

式(9)中, $\mathbf{XT}_{ij}$ 和 $\mathbf{YT}_i$ 为求和层的第 i 类神经元的输入、输出。

4)输出层神经元是一种竞争神经元,每个神经元分别对应一个数据类型。它接收从求和层输出的各类概率密度函数,概率密度函数最大的那个神经元输出为 1,即对应识别的模式类别。其他神经元输出为 0。 $\mathbf{XE}_i = \mathbf{YT}_i$, 由基于最小误分率的贝叶斯决策规则可知

$$\mathbf{YE} = \arg\max \{\mathbf{XE}_i\} \quad (10)$$

式(9)中, $\mathbf{XE}_i$ 和 $\mathbf{YE}$ 分别为输出层神经元的输入、输出, $\mathbf{YE}$ 即为样本的类别。

3.2 预测模型的建立

以 $\mathbf{XP}$ -70 普通型绝缘子为对象,建立污秽度预测模型。该网络的输入采用泄漏电流的 3 个时域有效值特征量 $\bar{I}$ 、 $I_{\max}$ 和 σ 。将这 3 个特征量相应地设为向量模式 $[x_1, x_2, x_3]$, 由于这些数据的量值有一定的差别, 如果将这些原始数据直接输入, PNN 将对比较小的数值不敏感, 使一些重要的特征难以被网络获取。因此对 3 个输入参量进行归一化处理。其中, σ 本身就在 $[0, 1]$ 区间内, 只需要对 $\bar{I}$ 、 $I_{\max}$ 进行归一化处理, 其变化区间分别为 $[0, 50]$ 和 $[0, 250]$ 。该网络的输出层只有一个神经元, 即污秽度等级, $[1, 2, 3, 4]$ 分别对应试验中绝缘子的轻度、中度、重度和严重 4 个污秽度等级。模型选用概率神经网络, 采用有监督的学习方式。

该网络采用 360 组不同污秽度下绝缘子泄漏电流的 3 个特征量和相应已确定的污秽度等级为网络的学习样本, 另外 40 组样本数据作为文中后面部分网络预测污秽度之用。网络训练的 360 组样本见表 2。

表 2 PNN 训练样本组成

Table 2 Composition of the PNN training sample

污秽度等级	1	2	3	4
样本数	90	90	90	90

3.3 样本预测结果及分析

采用已经训练完成的 PNN, 对前述样本库中剩

余的 40 组识别样本进行污秽度预测, 40 组数据的预测结果见图 7。

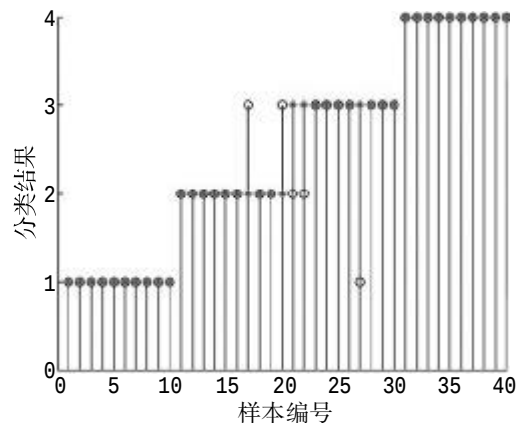


图 7 PNN 预测结果

Fig. 7 Forecast results under PNN

由图 7 可见, 概率神经网络污秽度预测模型的识别率为 87.5%。其中在轻度和严重污秽时, 预测准确率高达 100%, 而在中度和重度污秽时, 出现预测误差。这可能是由于试验设计中, 中度污秽与重度污秽的等值附盐密度相差不大, 因此在这两种等值附盐密度情况下, 绝缘子的泄漏电流差异较小。在将来的工作中应着重研究中度污秽时泄漏电流各特征量的差异性, 进一步提升模型在中度污秽情况下的预测准确率。

综上所述, 此模型可以根据绝缘子泄漏电流的 3 个时域有效值特征量, 预测出在相同气象条件和运行电压下绝缘子的污秽度等级, 为线路绝缘子清扫提供前期的决策帮助, 从而能有效地避免污闪的发生。

4 结论

文中主要研究了 4 种污秽度下绝缘子安全区泄漏电流时域特征, 并建立了基于概率神经网络的绝缘子污秽度预测模型, 得出的结论有:

1)安全区内泄漏电流有效值均值 $\bar{I}$ 有效值最大值 $I_{\max}$ 和有效值标准差 σ 这 3 个特征量都随绝缘子污秽度的增加而增大, 近似呈指数拟合关系, 且拟合度均大于 0.96。

2)选择 400 组泄漏电流有效值特征量样本, 建立了基于概率神经网络的绝缘子污秽度预测模型, 其预测准确率达 87.5%。

3)该模型为线路绝缘子的清扫提供了前期的决策帮助, 为工程实际中输电线路污闪预警系统特征量的优化选择提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 宿志一.防止大面积污闪的根本出路是提高电网的基本外绝缘水平;对我国电网大面积污闪事故的反思[J]. 中国电力,2003,36(12):57-61.
SU Zhiyi.To intensify basic external insulation level of power system:Fundamental way for prevention of large-scale pollution flashover[J]. Electric Power,2003,36(12):57-61.
- [2] A de La O, GORUR R S.Flashover of contaminated non-ceramic out-door insulators in a wet atmosphere[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998,5(6):814-823.
- [3] 顾乐观,孙才新.电力系统的污秽绝缘[M]. 重庆:重庆大学出版社,1988:25-46.
GU Leguan,SUN Caixin.Contamination insulation of electrical power system[M]. Chongqing:Chongqing University Press,1988:25-46.
- [4] 蒋兴良,舒立春,孙才新.电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京:中国电力出版社,2009:22-29.
JIANG Xingliang,SHU Lichun,SUN Caixin.Contamination and icing insulation of electrical power system[M]. Chongqing:Chongqing University Press,2009:22-29.
- [5] 石岩,蒋兴良,黄欢.污秽瓷绝缘子泄漏电流的估算方法[J]. 高电压技术,2009,35(6):1350-1355.
SHI Yan,JIANG Xingliang,HUANG Huan. Method of evaluating leakage current of contaminated porcelain insulators [J]. High Voltage Engineering,2009,35(6):1350-1355.
- [6] 蒋兴良,石岩,黄欢,等.污秽绝缘子泄漏电流频率和相位特征的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(7):118-124.
JIANG Xingliang,SHI Yan,HUANG Huan,et al.Experimental research on the frequency and phase characteristics of leakage current of artificially polluted insulators[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(7):118-124.
- [7] SUDA T.Frequency characteristics of leakage current waveforms of an artificially polluted suspension insulator [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2001,8(4):705-710.
- [8] SUDA T, MEMBER S.Frequency characteristics of leakage current waveforms of a string of suspension insulators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):481-488.
- [9] 李璟延,姚陈果,胡建林,等.染污绝缘子放电发展区段与污闪预警的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(13):8-14.
LI Jingyan,YAO Chenguo,HU Jianlin,et al.Experimental research on discharge development zones of contamination insulators and contamination flashover pre-warning[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(13):8-14.
- [10] 陈伟根,夏青,李璟延,等.绝缘子污秽预测新特征量的泄漏电流时频特性分析[J]. 高电压技术,2010,36(5):1107-1112.
CHEN Weigen,XIA Qing,LI Jingyan,et al.Time-frequency characteristic analysis of leakage current for new characteristics of insulators contamination prediction[J]. High Voltage Engineering,2010,36(5):1107-1112.
- [11] 李璟延,司马文霞,孙才新,等.绝缘子污秽度预测特征量提取与神经网络模型[J]. 电力系统自动化,2008,32(15):84-88.
LI Jingyan, SIMA Wenxia,SUN Caixin,et al.Characteristics extraction for contamination forecast of insulators and the neural network model[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(15):84-88.
- [12] 焦尚彬,刘丁,郑岗,等.基于最小二乘支持向量机的绝缘子等值附盐密度预测[J]. 中国电机工程学报,2006,26(6):149-153.
JIAO Shangbin,LIU Ding,ZHENG Gang,et al.Forecasting the ESDD of insulator based on least squares support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(6):149-153.
- [13] 杨庆,司马文霞,蒋兴良,等.复杂环境条件下绝缘子闪络电压预测神经网络模型的建立及应用[J]. 中国电机工程学报,2005,25(13):155-159.
YANG Qing,SIMA Wenxia,JIANG Xingliang,et al.The building and application of a neural network model for forecasting the flashover voltage of the insulator in complex ambient conditions[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(13):155-159.
- [14] 舒立春,白困利,胡琴,等.基于支持向量机的复杂环境条件下绝缘子闪络电压的预测[J]. 中国电机工程学报,2006,26(17):126-131.
SHU Lichun,BAI Kunli,HU Qin,et al. Insulator flashover voltage forecasting under complex circumstance based on support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(17):126-131.
- [15] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 4585—2004/IEC 60507 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S]. 北京:中国标准出版社,1991.
Standardization Administration of China. GB/T 4585—2004/IEC 60507 Artificial pollution tests on high-voltage to be used on AC systems[S]. Beijing:Standards Press of China,1991.
- [16] CHEN Weigen,YAO Chenguo,SUN Caixin,et al.A new broadband micro-current transducer for insulator leakage current monitoring system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(1):355-361.
- [17] SPECHT D F.Probabilistic neural network[J]. Neural Networks,1990,3(1):109-118.

(下转第 209 页)

- WANG Zhongfang, ZHANG Qiaogen, CHEN Qingguo, et al. Insulator flashover characters under fast oscillatory and non-oscillatory surge voltage in SF₆[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4):4-6.
- [11] 张乔根, 顾温国, 邱毓昌. 存在固定金属微粒时 SF₆ 中绝缘界面在陡波下的闪络特性[J]. 高压电器, 1996, 32(4): 24-27.
- ZHANG Qiaogen, GU Wenguo, QIU Yuchang. Flashover characters of insulator interface with fixed conducting particle under steep fronted voltage in SF₆[J]. High Voltage Apparatus, 1996, 32(4): 24-27.
- [12] TRINH N G, VINCENT C, MITCHEL G. Influence of an insulating spacer on the V-t characteristics of a coaxial gas-insulated cable. II. tests on EHV buses [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(1): 26-34.
- [13] UETA G, KANEKO S, OKABE S. Evaluation of breakdown characteristics of gas insulated switchgears for non-standard lightning impulse waveforms-breakdown characteristics under non-uniform electric field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5):1430-1438.
- [14] PINNEKAMP F, NIEMEYER L. Qualitative model of breakdown in SF₆ in inhomogeneous gaps[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1983, 16(7):1293.
- [15] 施 围, 邱毓昌, 张乔根. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- SHI Wei, QIU Yuchang, ZHANG Qiaogen. Fundamental of high voltage engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [16] STANKOVIC K, OSMOKROVIC P, DOLICANIN C, et al. Time enlargement law for gas pulse breakdown[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2009, 18(2): 25-37.
- [17] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- QIU Yuchang. GIS device and its insulation technology [M]. Beijing: Water Conservancy and Power Press, 1994.
- [18] 张乔根, 邱毓昌. 快速暂态过电压下 SF₆ 气体的绝缘特性[J]. 高压电器, 1995, 31(3): 38-43.
- ZHANG Qiaogen, QIU Yuchang. Insulation characteristics of SF₆ gap under very fast transient overvoltage[J]. High Voltage Apparatus, 1995, 31(3): 38-43.
- [19] 赵 谔. GIS 支撑绝缘子表面状况对其冲击闪络特性的影响[D]. 西安: 西安交通大学, 2014.
- ZHAO Shuo. Influence of the surface condition of pillar insulator in GIS on its impulse flashover characters [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2014.
- [20] 张乔根, 王 沛. 冲击电压上升率对 SF₆ 放电由流注向先导转变的影响[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(12): 1-4.
- ZHANG Qiaogen, WANG Pei. Influence of impulse rising rate on the streamer to leader transition in SF₆[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(12): 1-4.
- [21] 张乔根. 陡波前冲击电压下 SF₆ 气体间隙及绝缘子沿面放电特性[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.
- ZHANG Qiaogen. Discharge characteristics of SF₆ gap and with insulator under steep-fronted impulses[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996.
- 谭向宇(1981—), 男, 博士, 工程师, 主要从事高电压与绝缘技术研究工作。
- 刘轩东(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事气体绝缘与放电等离子体、高功率脉冲源、气体开关及应用的研究。
- 张伶俐(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事 GIS SF₆ 绝缘特性方面的研究工作。

(上接第 203 页)

- [18] 何洪英, 姚建刚, 蒋正龙, 等. 利用红外图像特征和径向基概率神经网络识别不同湿度条件下绝缘子的污秽等级[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 117-122.
- HE Hongying, YAO Jiangang, JIANG Zhenglong, et al. Contamination grades recognition of insulators under different humidity using infrared image and RBPNN[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 117-122.
- [19] 吴 婷, 颜国政, 杨帮华, 等. 基于有监督学习的概率神经网络的脑电信号分类方法[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(85): 803-806.
- WU Ting, YAN Guozheng, YANG Banghua, et al. Electroencephalography classification based on probabilistic neural network with supervised learning in brain computer interface[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(85): 803-806.
- [20] 张文涛, 王成山. 基于概率神经网络的电压暂态扰动分类[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 34-38.
- ZHANG Wentao, WANG Chengshan. Classification of the voltage transient disturbances based on probabilistic neural networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 34-38.
- 汪万平(1988—), 男, 工程师, 主要从事电气设备在线智能检测及故障诊断技术研究。
- 陈伟根(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 长江学者奖励计划特聘教授, 主要从事电气设备在线智能检测及故障诊断技术研究。