

State Prediction of External Insulation of the Insulator String Based on Fuzzy Neural Network

Yao Gang¹, Wen Xi-Shan¹, Lan Lei¹, Dai Kai-Chun², Gong Yu-Qing¹, Shu Nai-Qiu¹, Li Hong-Ling¹

¹School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

²HuBei Dongguang Electronics limited company, Jingmen 448000, China

Email: yaogang109@gmail.com

Abstract: In order to putting forward a new method of predicting the equivalent salt deposit density of insulator, different types of typical insulator string was choosed to conduct the flashover test, and the acoustic emission signals emitted by insulators string vary in different pollution grade on operating voltage was comparative studied by self-made acoustic signal monitor. The results show that: ae signals was affected by the type of insulator, and there is a complex nonlinear relationship among the pollution grade of insulator surface、environmental factors and ae signals. Neural network model was choosed to combine with fuzzy algorithm to extract typical ae signal; a intelligent prediction model was established, in the model, there are five parameter variables: the average amplitude of acoustic signal pulse、the largest half-cycle power frequency area、the number of acoustic signal whose half-cycle power frequency area exceed the given threshold in fixed time、ambient humidity and temperature, and the equivalent salt deposit density was regarded as output parameter. The accuracy and reliability of the intelligent prediction model was proofed by laboratory data.

Key words: Insulator; pollution flashover; acoustic emission; fuzzy neural network; ESDD forecasting

基于模糊神经网络的绝缘子串外绝缘状态预测

姚刚¹, 文习山¹, 蓝磊¹, 戴开春², 龚宇清¹, 舒乃秋¹, 李红玲¹

¹武汉大学电气工程学院, 武汉 430072

²湖北东光电子股份有限公司, 荆门 448000

Email: yaogang109@gmail.com

摘要: 为了提出一种新的预测绝缘子等值盐密的方法, 选取不同型式的典型绝缘子串在人工雾室内进行污闪试验, 采用自制的声信号监测器对运行电压下的不同污秽度的绝缘子串声发射信号进行了对比研究。结果表明: 声发射信号受绝缘子型号影响, 绝缘子表面的污秽程度、环境因素与声信号之间存在着复杂的非线性关系。采用神经网络模型结合模糊算法对典型声发射信号进行提取, 建立了以声信号脉冲平均幅值、最大工频半周期面积、固定时间长度内工频半周期面积超过给定阈值的声信号个数、环境湿度、温度五个变量作为输入参数变量, 等值盐密作为输出参数的智能预测模型, 基于实验室数据证明了预测模型的准确性及可靠性。

关键词: 绝缘子; 污闪放电; 声发射; 特征量; 模糊神经网络; 等值盐密预测

引言

输电线路绝缘子在长期运行中的表面会附着大量的污秽, 污层一旦受潮会导致绝缘子的绝缘性能严重下降, 可能导致的污闪跳闸会影响电力系统的安全性和可靠性。因此, 如何能够及早获得污闪的预警信息, 提出一种结合污秽度与环境温、湿度的动态量, 以全面反映绝缘子的污秽状态是目前须研究的重要课题。绝缘子局部污秽放电过程中伴随着光、电、声和热现象, 放电3个阶段伴随着的释放能量存在差异, 研究表明影响绝缘子污秽放电声发射信号(简称声信号)的量主要有: 运行

电压、污秽度和运行环境(如气压、温度和湿度)^[1-3]。

本文从检测 2 种典型绝缘子串恒定运行电压下污秽放电声信号入手, 分析了绝缘子串污秽放电过程中声信号的典型波形变化, 提取出反映绝缘子污秽度声信号的 3 个特征量: 声信号脉冲平均幅值、最大工频半周期面积、固定时间内工频半周期面积超过给定阈值的周期个数。以实验的角度通过大量数据的回归分析, 拟合表征了污秽放电声信号部分特征量与污秽度和环境因素的定量关系, 并分析了绝缘子形状系数、环境因素和污秽度等因素对声信号特征量的影响。对通过声发射信号

的电气特征量和环境参数的综合检测结果,利用模糊神经网络分析处理方法对预测绝缘子的等值附盐密度进行了探讨。

1. 声学监测法基本原理

声场中足够小的体积元由于声扰动获得的动能为:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}(\rho_0 V_0) v^2 \quad (1)$$

由于声扰动,该体积元压强从 P_0 升高为 $P_0 + p$, 该体积元具有的位能为

$$\Delta E_p = -\int_0^p p dV \quad (2)$$

体积元里总的声能量为动能与位能之和, 即

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p = \frac{V_0}{2} \rho_0 (v^2 + \frac{1}{\rho_0^2 c_0^2} p^2) \quad (3)$$

将球面波的声压和声速方程取实部代入声能量方程并简化可得:

$$\Delta E \approx V_0 \frac{p_1^2}{r^2} \frac{1}{\rho_0 c_0^2} \cos^2(\omega t - kr) \quad (4)$$

式(1) V_0 为足够小体积元的体积, P_0 为压强, ρ_0 为空气密度。式(3)和(4) c_0 为声速; $k = \frac{\omega}{c_0}$ 称为波数, ω 为声波角频率, r 为这一点距声源的距离。

在不考虑空气密度 ρ_0 和声速 c_0 的变化时, 声能量 ΔE 与声压 P_1 的平方成正比, 根据放电释放的能量与声能之间的关系, 用声发射信号声压的变化代表污秽放电所释放能量的变化, 通过测量声发射信号的声压即可以推测出放电的强弱^[4-6]。

2. 人工污秽实验

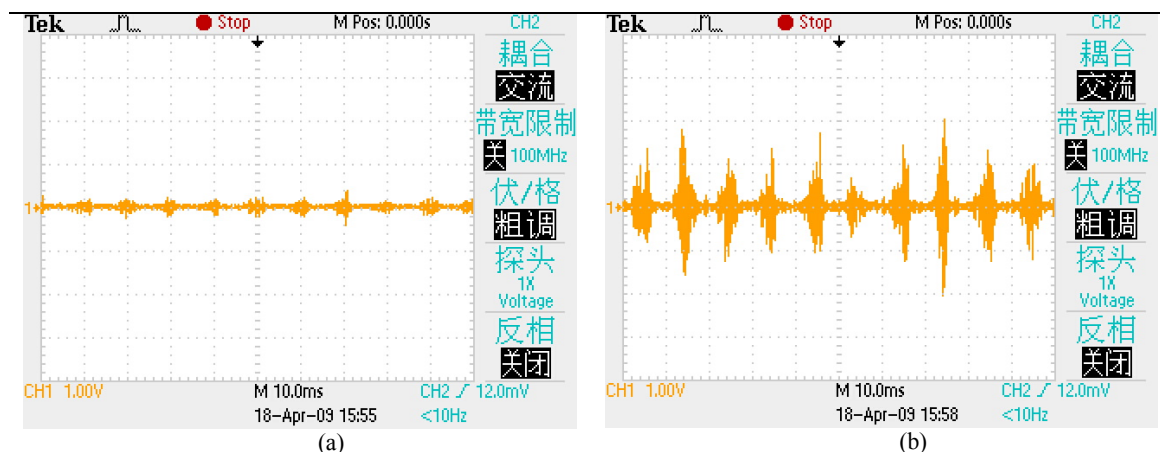
实验雾室尺寸为 5.0m×4.7m×3.9m。交流污秽

试验电源满足国际电工委员会(IEC)对交流污秽试验电源的要求。通过环境温度、相对湿度测量仪对环境参数进行测量。声发射传感器是本课题组为监测声信号而特别设计的, 是一个弯曲振动式压电传感器和一个聚焦抛物面(使声能集中在焦点, 以产生较大应力达到放大声信号目的)的组合。选择的声波传感器的主频为 40kHz, 灵敏度为 -67dB, 前置放大电路采用放大器 AD524, 电路增益为 40dB。滤波器中心频率为 40kHz, 通频带为 35-45kHz。监测装置用屏蔽信号线进行连接并保证测量装置良好接地, 以减小环境、电路噪声和空间电磁等干扰造成的误差。根据 IEC60507 和 IEC60518 标准, 以 NaCl 和硅藻土混合物配备了 5 种等值盐密 ρ_{ESDD} (0.025、0.05、0.1、0.2 和 0.4mg/cm²), 灰密均保持为 1.0 mg/cm² 以研究不同盐密对声发射信号的影响。选择两种绝缘子#1(XP-160)、2#(XP-160)涂覆 RTV。绝缘子串施加作用电压为 $35 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 28.58$ kV。

3. 试验结果分析与讨论

3.1 声发射信号特征量提取

图 1(a)为盐密 0.025mg/cm², 灰密 1.0 mg/cm² 下相对湿度为 70%时#1 典型声信号。图 1(b)声信号每个峰值之间约间隔 1/2 格即半个工频周期, 对应的工频电压正负峰值存在放电声信号峰值, 过零点声信号时峰值明显下降原因为此时绝缘子表面存在熄弧现象。图 1(c)、(d)可以看出随污秽加重, 放电较强导致电弧积存能量较大, 试验也可发现电弧不易熄灭且电弧持续存在, 声信号幅值增强且高幅值



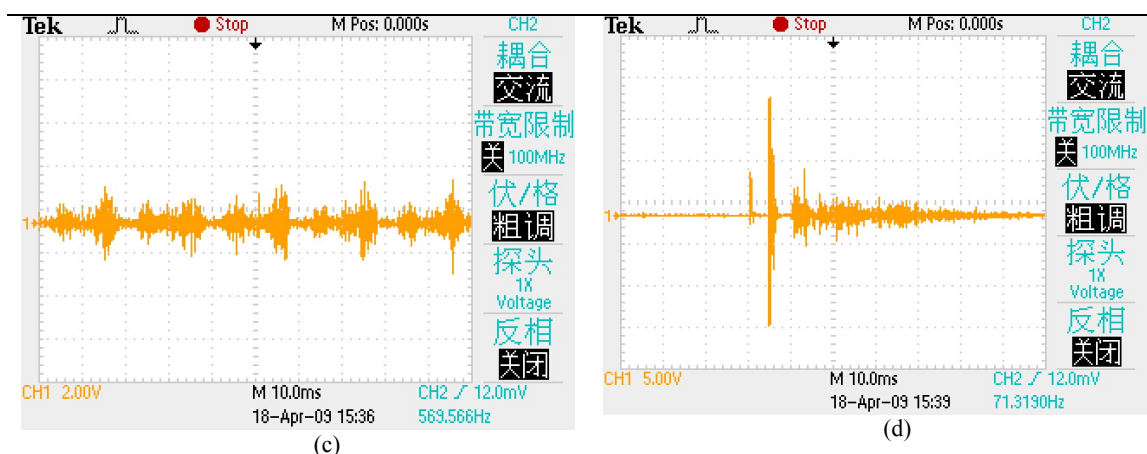


Figure 1. Contaminant flashover of insulators acoustic signal in different ESDD
图 1. 不同盐密绝缘子污秽放电典型声信号图

声脉冲较密集。对大量声信号样本数据进行分析表明：同一时间段长度内随着污秽度和环境变化，声信号脉冲幅值、频度、信号包络线面积和大面积包络线出现时间均发生变化。

3 个特征量为：声信号脉冲平均幅值 U 、最大工频半周期面积 S 、固定时间内工频半周期面积超

过给定阈值的周期个数 N 。3 个特征量从不同角度描述了声发射信号特点。

3.2 声信号特征量与污秽度的关系

结合试验数据，对采样时间 5min 内的声信号特征量进行拟合，相关公式及拟合系数如图 2 所示。

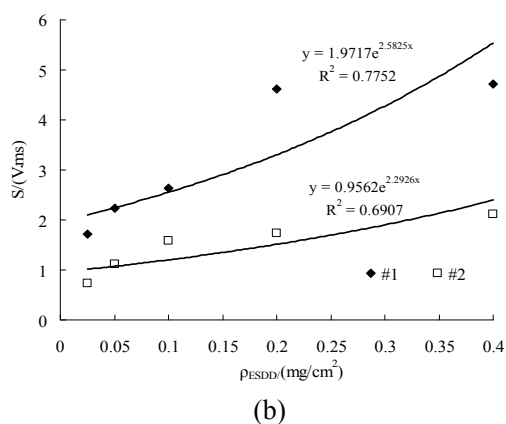
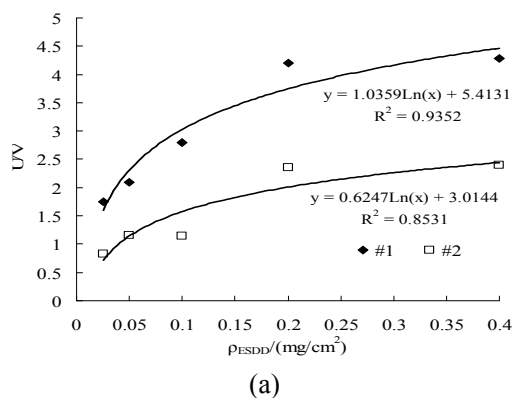


Fig2. regression fitting of acoustic signal Characteristic Quantity and ESDD.
图 2. 声信号特征量与等值附盐密度的定量回归拟合关系。

亲水性表面的局部放电更易得到发展甚至会出现大电弧，声信号脉冲平均峰值也逐渐增强。涂覆 RTV 后 XP-160 表面呈憎水性，水膜在其表面呈独立水滴分布导致其表面电阻得到较大提高，因此 #2 放电较弱，故污秽放电声信号相对较小。

4. 模糊神经网络预测模型的建立

4.1 模糊神经网络系统

输入量为声信号平均幅值 U 、最大工频半周期面

积 S 、固定时间长度内工频半周期面积超过给定阈值的声信号个数 N 、环境相对湿度 H_{um} 、环境温度 T_{em} ，基于 Mamdani 最小运算规则模糊推理算法，模糊输出为等值附盐密度 ESDD。建立基于声信号的模糊系统模型如图 3。

4.2 预测结果分析与讨论

将声发射仪监测到的声信号特征量输入模糊神经网络训练模型，将计算得到的结果和采用电导率法实

测的#1、#2 等值盐密进行典型对比，结果如表 1

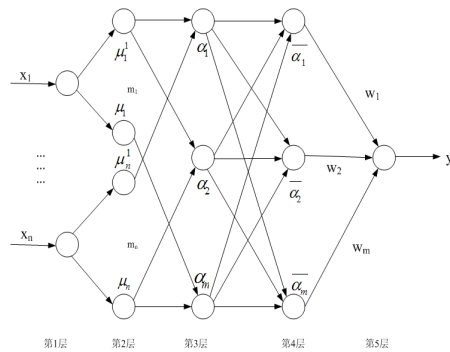


Figure 3. Structure chart of fuzzy neural network.
图 3. 模糊神经网络结构图.

Tab1. Comparison between ESDD forecasting and measured value by fuzzy neural network system.

表 1 模糊神经网络训练的等值附盐密度预测值与实测值

相对湿度 (%)	温度 (°C)	U(V)	S (V·ms)	N	预测值 (mg·cm ²)	实测值 (mg·cm ²)
83.6	34.1	2.61	2.27	3	0.11	0.099
89.5	28.5	3.38	3.91	2	0.29	0.286
95	30	3.31	3.45	1	0.14	0.147
93.1	27	3.68	3.20	2	0.21	0.207

试验结果与本文所建立的污秽度预测网络计算出的结果平均误差均小于 4.5%，此模型可以根据声信号的 3 个特征参量和气象条件，有效对 XP-160 绝缘子的等值附盐密度实现非接触时预测，对工程实际应用具有一定帮助。

References (参考文献)

- [1] LUNDGAARD L E, XIV P D. Acoustic partial discharge detection-practical application[J]. IEEE Electrical Insulation maga zine, 1992, 8(5): 34-43.
- [2] WANG Cheng-jiang, JIA Zhi-bin, GU Yu-kai. Experimental research on acoustics emission from discharge of Insulators[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 51- 53. 王成江, 贾智斌, 顾玉凯, 等. 绝缘子放电声发射识别的试验研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 51- 53.
- [3] YANG Zhen-dong, SHU Nai-qiu, WANG Wen-zhi, et al. Acoustic emission detection method monitoring insulator pollution flashover [J]. Electric Power Automation Equipme -nt, 2005, 25(7): 35-37. 杨振东, 舒乃秋, 王文志, 等. 绝缘子污秽放电声发射监测方法研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(7): 35-37.
- [4] LI Ming, SHU Nai-qiu, PENG Xu-dong, et al. Insulator contaminant flashover monitoring based on acoustic emission technique[J]. Electric Power Automation Equip- ment, 2004, 24(6): 98-100. 李明, 舒乃秋, 彭旭东, 等. 基于声发射技术的绝缘子污秽放电监测[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 98-100.
- [5] LIANG Xi-dong, DAI Jian-jun, ZHOU Yuan- xiang, et al. Ultrasonic Detection on crack of firprod in brittle fracture of composite insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 110-114. 梁曦东, 戴建军, 周远翔, 等. 超声法检测绝缘子用玻璃钢芯棒脆断裂纹的研究 [J]. 中国电机工程学报. 2005, 25(3): 110-114.
- [6] LI Hong-lin, WEN Xi-shan, SHU NAI-qiu. Application of least squares support vector machine in acoustic emission monitor of polluted insulator discharge[J]. Electric Power Construction. Electric Power Construction, 2009, 30(9): 25-28. 李红玲, 文习山, 舒乃秋. 最小二乘支持向量机在绝缘子污秽放电声发射监测中的应用[J]. 电力建设, 2009, 30(9): 25-28.