

晴朗天气绝缘子泄漏电流响应机理及污秽预测

林 峰, 陈 灵, 陈闽江, 何若玫, 林朝晖, 苏洪辉, 丁雪霜, 陈月卿

(国网福建省电力有限公司超高压分公司, 福建 福州 350000)

摘 要:在武汉绝缘子人工污秽试验场对晴朗天气下XWP2-70和XP-160绝缘子进行大量试验,得到其在不同污秽度下泄漏电流一次谐波与气象因素之间的动态关系,建立不同灰密时绝缘子表面盐密与泄漏电流、环境相对湿度关系的数学模型,利用非线性回归分析方法预测出不同盐密下泄漏电流一次谐波幅值与相对湿度的关系式,获得盐密与关系式系数之间的定量关系。结果表明:绝缘子表面泄漏电流总是在夜间2~6点达到最大值,在白天13~17点下降到最小值,整体呈现马鞍形曲线,泄漏电流一次谐波与湿度呈正相关,与温度呈负相关;在相同湿度、不同温度下,泄漏电流一次谐波几乎相同,但在相同温度、不同湿度下,泄漏电流一次谐波变化较大;泄漏电流主要取决于环境相对湿度,当相对湿度较高时,泄漏电流随着相对湿度的增加而增大得更快,因此建立污秽预测模型应重点考虑湿度的影响。

关键词:绝缘子;泄漏电流;回归分析;等值附盐密度;晴朗天气

中图分类号:TM216 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.05.013

Response mechanism and pollution prediction of insulator leakage current in sunny weather

LIN Feng, CHEN Ling, CHEN Minjiang, HE Ruomei,

LIN Zhaohui, SU Honghui, DING Xueshuang, CHEN Yueqing

(EVH Branch Company of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: A large number of tests were carried out on XWP2-70 and XP-160 insulators under sunny weather in Wuhan insulator artificial pollution test field, and the dynamic relationship between the first harmonic of leakage current and meteorological factors under different pollution degrees was obtained. The mathematical model of the relationships among the surface salt density of insulators, leakage current, and environment relative temperature under different gray density were established. The relation expression between the first harmonic amplitude of leakage current and the relative humidity under different salt density was predicted by nonlinear regression analysis method, and the quantitative relationship between salt density and the relation expression coefficient was obtained. The results show that the leakage current on insulator surface always reaches the maximum value at 2–6 PM at night, and decreases to the minimum value at 13–17 PM in the day. The overall leakage current curve presents a saddle-shaped curve. The first harmonic of leakage current is positively correlated with humidity and negatively correlated with temperature. Under the same humidity and different temperature, the first harmonics of leakage current are almost the same, but under the same temperature and different humidity, the first harmonics of leakage current change greatly. The leakage current mainly depends on the environment relative humidity, when the relative humidity is higher, the leakage current increases faster with the increase of the relative humidity. Therefore, the influence of humidity should be mainly considered when establishing a pollution prediction model.

Key words: insulator; leakage current; regression analysis; ESDD; sunny weather

0 引言

等值盐密(equivalent salt deposit density, ESDD)和灰密(no soluble deposit density, NSDD)是输变电设备确定外绝缘维护措施的主要依据之一,其准确测量对于确定绝缘子的污秽程度至关重要^[1-3],

但长期以来,污秽程度难以准确在线获取。泄漏电流是绝缘子最有效的动态在线监测参数之一,能综合反映绝缘子表面的污秽程度、受潮程度、承受电压和性能等参数^[5-7],从实时反映绝缘子性能的角度来看,迫切需要开发监测户外绝缘子污秽程度的方法^[2-4,8-9]。

国内外研究者在绝缘子污秽程度的预测方面做了大量工作,文献[8-11]对线路绝缘子和变电站

基金项目:国网福建省电力有限公司科技项目(52130A20000F)

的支柱绝缘子泄漏电流进行实时监测,但泄漏电流具有很大的随机性,仅通过泄漏电流大小来判断污秽程度是不准确的。文献[12-15]提出物理模型预测方法,即分析粒子在绝缘子表面的附着过程,进而提出染污微粒碰撞粘附的物理预测模型,但是绝缘子染污过程较为复杂,物理模型很难进行完全解释。文献[16]提出采用探索性因子分析和最小二乘支持向量机组合模型预测绝缘子表面的污染程度,但该方法对特征量要求较高,且支持向量机模型的抗噪音能力较弱。文献[8,17-18]采用神经网络对泄漏电流特征量进行训练,以此评估绝缘子表面的污秽程度,但神经网络存在结构参数选择困难及训练时间长等问题。文献[19]用去趋势波动方法提取泄漏电流畸变特征,通过聚类算法识别绝缘子的污秽程度,但没有考虑湿度对泄漏电流波形的影响,且未给出具体的泄漏电流畸变程度与绝缘子表面积污程度的对应关系。基于传统统计学的方法也广泛应用于绝缘子污秽程度的预测,主要是利用大量的历史数据作为支撑,通过统计回归预测污秽程度^[20-21]。综上所述,目前所研究的预测方法均存在一定的局限性。

在预测污秽程度时,文献[22-23]在人工试验箱内进行绝缘子加压试验,结果表明绝缘子的泄漏电流与污秽、受潮程度有关,而空气相对湿度(RH)是影响绝缘子表面受潮程度最直接的物理量。空气湿度通过直接影响污秽层在绝缘子表面的润湿性,进而影响泄漏电流。然而,在实验室中,温度和湿度是相对固定的,很难找出泄漏电流与温度、湿度之间的动态关系。在户外,气象条件更加复杂,晴朗天气下各气象影响因素对绝缘子泄漏电流的作用规律不清晰,使绝缘子污秽程度的在线监测技术受到了限制,对于如何通过泄漏电流准确地反映盐密的范围,并没有明确的结论,缺少通过监测泄漏电流和气象因素直接预测盐密的方法或经验公式。

本研究以泄漏电流在线监测系统为基础,在武汉建立绝缘子人工污秽户外试验场,定量涂污XWP2-70绝缘子和XP-160绝缘子,施加63.5 kV的额定电压,同步采集泄漏电流、环境温度、相对湿度及降雨量等参数,得到绝缘子在不同盐密和灰密等级下泄漏电流一次谐波与气象因素之间的动态关系。采用非线性回归方法得出盐密(ρ_{ESDD})与回归系数的关系表,通过关系表估算绝缘子表面的 ρ_{ESDD} 。

1 试验

1.1 试验原理

研究中的110 kV输电线路观测点位于湖北省中部、江汉平原东部的武汉市武昌区,该地区属于

北亚热带季风性湿润气候,特点是夏季炎热多雨,其他季节相对干燥。雨量充沛,雨季通常从4月初开始,持续到9月下旬。观测点试验设备原理如图1所示。将绝缘子悬挂于绝缘子户外试验场上,施加高压于瓷绝缘子串的下端。泄漏电流信号通过传感器转换为电压信号后经泄漏电流测量系统接入计算机,泄漏电流最大采样率为250 kS/s。

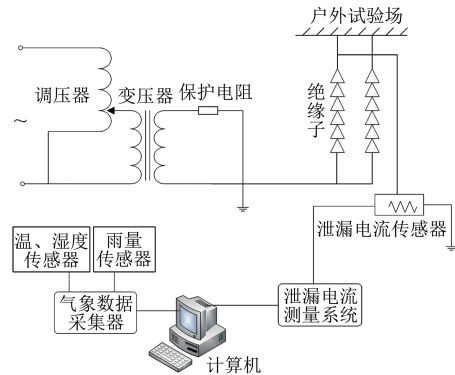


图1 试验原理图

Fig.1 Schematic diagram of the test circuit

图2为在线监测系统的功能图和装置图,其中气象数据采集单元由温度计、湿度计及降雨量传感器构成。温度、相对湿度、降雨量及泄漏电流的测量精度分别为0.1℃、1.0%、0.1 mm、0.01 mA。

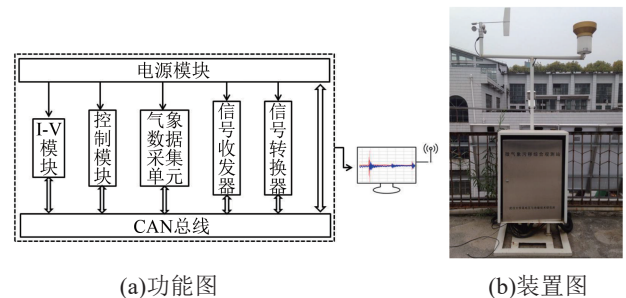


图2 泄漏电流在线监测系统的功能图及装置图

Fig.2 Function diagram and device diagram of leakage current online monitoring system

控制模块用于控制气象数据采集单元进行环境温度、湿度及降雨量等数据的采集,信号转换器负责数据的有效性识别和整合。信号收发器将信号转换器处理的数据传输到主机监视器。所有功能单元都通过CAN总线连接。

在规定的时间内,控制模块向气象数据采集单元发送指令,每5 min获取一次环境温湿度数据;向I-V模块发送指令,将泄漏电流数据发送至信号转换器。随后,信号转换器对数据的有效性进行识别,并对数据进行封装,通过CAN总线将打包后的数据发送到信号收发器。当信号收发器接收到这些信号后,会向主机监视器发送数据。电源模块的

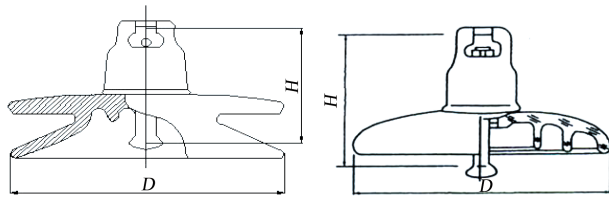
电源输出端与各个模块连接供电,通过CAN总线获取各个模块的运行状态。一旦任何功能单元运行异常,电源模块将重启包括其自身在内的所有功能单元。

1.2 试品

本次绝缘子串试品的布设如图3(a)所示,试品为7片XWP2-70绝缘子和7片XP-160绝缘子,试品外形分别如图3(b)和图3(c)所示。XWP2-70绝缘子的结构高度 H 为146 mm,爬距为400 mm,直径 D 为255 mm;XP-160绝缘子的结构高度 H 为155 mm,爬距为305 mm,直径 D 为255 mm。



(a)绝缘子户外试验场



(b)XWP2-70

(c)XP-160

图3 绝缘子布置及外形

Fig.3 Insulator layout and appearance

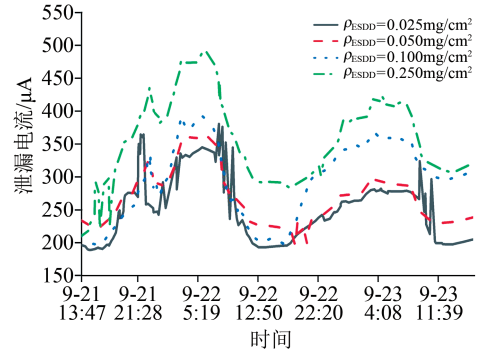
1.3 试验方法

试验前采用洗涤剂对瓷绝缘子进行清洗,除去表面污秽,再使用去离子水进行冲刷。将洗涤后的试品悬挂于试验架上干燥24 h。按照GB/T 4585—2004^[24]推荐的定量涂刷法对绝缘子进行染污。采用高精度电子天平称量NaCl、硅藻土,灰密(ρ_{NSDD})分别取0.5、1.0、1.5、2.0 mg/cm²,盐密(ρ_{ESDD})分别取0.025、0.050、0.100、0.250 mg/cm²,共得到16种污液组合。用适当的去离子水溶解所需的盐和灰,将制得的16种污液均匀地涂刷在XWP2-70绝缘子和XP-160绝缘子表面。在试验前,将试品放在相同的温度和低湿度的试验箱中干燥相同的时间。

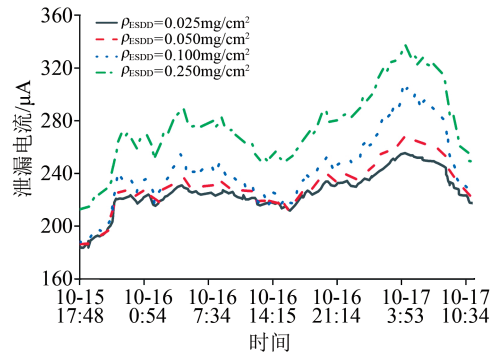
试验时将绝缘子悬挂在试验场内,施加63.5 kV的额定电压,持续加压48 h,每5 min记录一次电流数据和环境参量。

2 泄漏电流变化规律

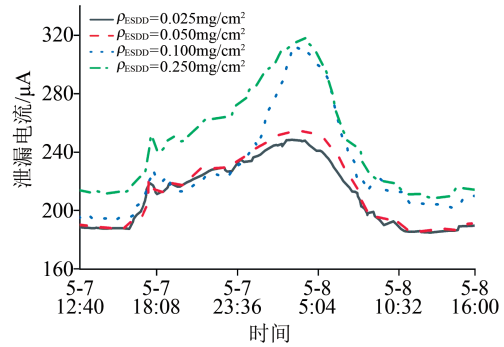
图4和图5分别是两串绝缘子在晴朗天气下泄漏电流的变化规律。从图4~5可以看出,泄漏电流



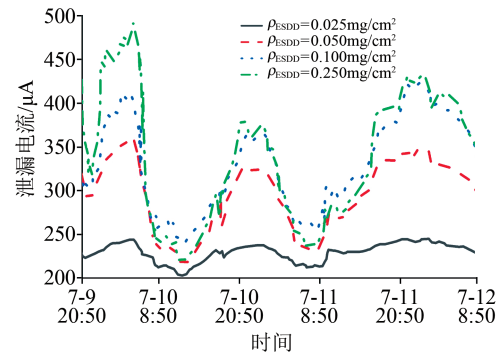
(a) $\rho_{NSDD}=0.5 \text{ mg/cm}^2$



(b) $\rho_{NSDD}=1.0 \text{ mg/cm}^2$



(c) $\rho_{NSDD}=1.5 \text{ mg/cm}^2$



(d) $\rho_{NSDD}=2.0 \text{ mg/cm}^2$

图4 XWP2-70绝缘子泄漏电流随时间的变化曲线

Fig.4 The leakage current of XWP2-70 insulator changing with time

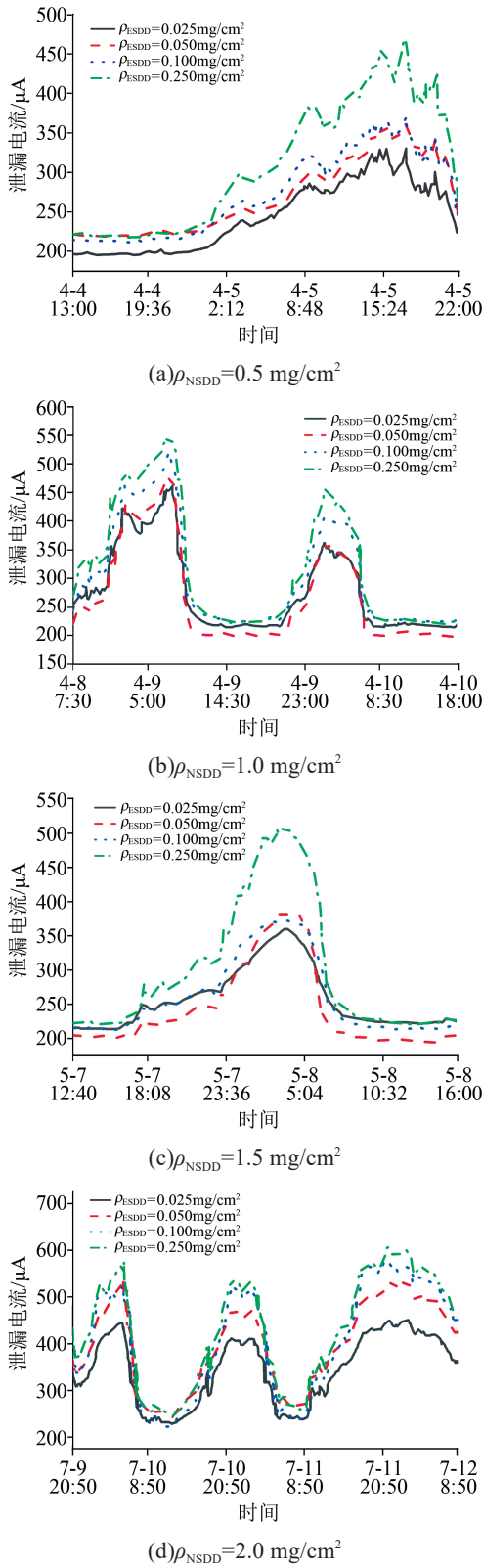


图5 XP-160绝缘子泄漏电流随时间的变化曲线
Fig.5 The leakage current of XP-160 insulator changing with time

幅值随时间均呈现出较为显著的规律性变化,即夜间大,白天小,具体表现为:

(1)泄漏电流总是在夜间2~6点达到最大值,在白天13~17点下降到最小值。泄漏电流在9~20

点变化速率较慢,从晚上20点到凌晨5点以较快的速率持续增大到最大值,从凌晨5点到早上9点以较快的速率持续减小,整体呈现为马鞍形曲线。

(2)在同一时刻,当灰密一定时,绝缘子泄漏电流幅值随盐密的增大而增大。具体数据如下:

1)当XWP2-70绝缘子 $\rho_{NSDD}=0.5\text{ mg/cm}^2$, $\rho_{ESDD}=0.025、0.050、0.100、0.250\text{ mg/cm}^2$ 时,泄漏电流的最大值分别为380.6、363.7、392.9、492.3 μA ,最小值分别为188.9、190.1、197.5、204.2 μA 。

2)当XWP2-70绝缘子 $\rho_{NSDD}=1.0\text{ mg/cm}^2$, $\rho_{ESDD}=0.025、0.050、0.100、0.250\text{ mg/cm}^2$ 时,泄漏电流的最大值分别为255.5、268.5、300.9、337.4 μA ,最小值分别为183.6、186.5、188.0、212.6 μA 。

3)当XWP2-70绝缘子 $\rho_{NSDD}=1.5\text{ mg/cm}^2$, $\rho_{ESDD}=0.025、0.050、0.100、0.250\text{ mg/cm}^2$ 时,泄漏电流的最大值分别为248.5、254.5、312.8、320.1 μA ,最小值分别为188.6、189.3、193.6、208.8 μA 。

4)当XWP2-70绝缘子 $\rho_{NSDD}=2.0\text{ mg/cm}^2$, $\rho_{ESDD}=0.025、0.050、0.100、0.250\text{ mg/cm}^2$ 时,泄漏电流的最大值分别为244.7、363.3、420.8、491.7 μA ,最小值分别为202.7、214.7、239.4、214.3 μA 。

5)当XP-160绝缘子 $\rho_{NSDD}=0.5\text{ mg/cm}^2$, $\rho_{ESDD}=0.025、0.050、0.100、0.250\text{ mg/cm}^2$ 时,泄漏电流的最大值分别为331.1、360.0、362.6、451.6 μA ,最小值分别为195.4、218.8、211.8、216.8 μA 。

6)当XP-160绝缘子 $\rho_{NSDD}=1.0\text{ mg/cm}^2$, $\rho_{ESDD}=0.025、0.050、0.100、0.250\text{ mg/cm}^2$ 时,泄漏电流的最大值分别为464.6、471.4、520.9、552.6 μA ,最小值分别为218.8、203.8、227.5、225.3 μA 。

7)当XP-160绝缘子 $\rho_{NSDD}=1.5\text{ mg/cm}^2$, $\rho_{ESDD}=0.025、0.050、0.100、0.250\text{ mg/cm}^2$ 时,泄漏电流的最大值分别为361.6、389.4、376.1、509.6 μA ,最小值分别为221.1、198.2、213.4、220.2 μA 。

8)当XP-160绝缘子 $\rho_{NSDD}=2.0\text{ mg/cm}^2$, $\rho_{ESDD}=0.025、0.050、0.100、0.250\text{ mg/cm}^2$ 时,泄漏电流的最大值分别为453.7、538.0、566.3、602.3 μA ,最小值分别为227.1、241.4、219.5、239.4 μA 。

根据以上分析可以看出,不同的 ρ_{NSDD} 下,泄漏电流最大值之间的差距及最小值之间的差距都比较大,表明 ρ_{NSDD} 对泄漏电流具有较大的影响。

3 泄漏电流影响因素分析

3.1 无雨天气泄漏电流

考虑到绝缘子泄漏电流的谐波成分总是由电晕放电等不确定因素产生,采用一次谐波分量来研究绝缘子串泄漏电流与环境温度和湿度的关系。为了解环境变量对无雨日泄漏电流的影响,选取5

月上旬的数据进行研究,降水量、相对湿度及环境温度

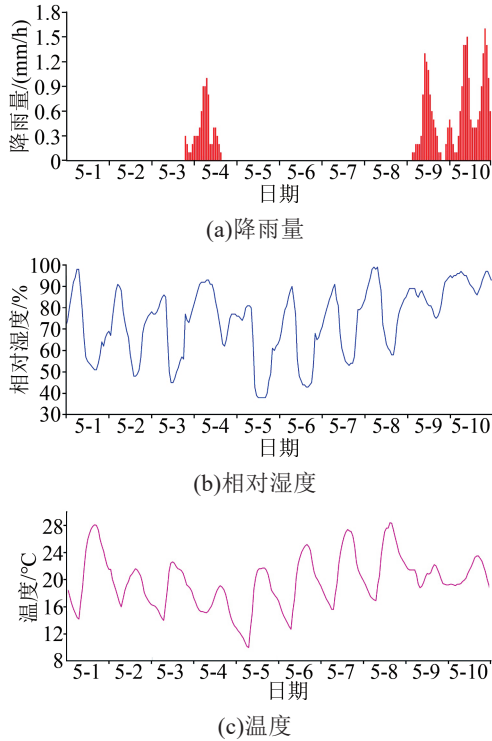


图6 泄漏电流在线监测系统记录的数据

Fig.6 Data recorded by leakage current online monitoring system

度和湿度的波动有较强的规律性,当温度达到峰值时,相对湿度达到低值。

提取5月上旬无雨日,考虑到篇幅限制,仅对 $\rho_{\text{NSDD}}=0.5 \text{ mg/cm}^2$, $\rho_{\text{ESDD}}=0.025、0.250 \text{ mg/cm}^2$ 的 XWP2-70 绝缘子进行分析计算,绝缘子泄漏电流一次谐波分量的变化范围如表1~2所示,表中的高频值是指在变化幅度内出现频率最高的值。为了减少降雨量对统计数据的影响,虽然5月5日和5月8日整天都没有下雨,但是它们前一天或后一天的12 h内都在下雨,因此将其排除在外。在此仅选取5月1日、2日、6日、7日等4天进行分析。

由于相对湿度是每间隔5%进行取值的,表格中大部分泄漏电流的变化幅度均小于0.05 mA。此外,当 $\rho_{\text{ESDD}}=0.025 \text{ mg/cm}^2$ 时,相对湿度低于80%的情况下,表1中每行泄漏电流的变化幅度范围为0.01~0.05 mA,而当相对湿度超过80%时,变化幅度范围为0.03~0.08 mA。当 $\rho_{\text{ESDD}}=0.25 \text{ mg/cm}^2$,相对湿度小于80%时,表2中每行泄漏电流的变化幅度范围为0.01~0.07 mA,而当相对湿度超过80%时,变化幅度范围为0.05~0.13 mA,即相对湿度较高时,泄漏电流的变化范围较大。对比每行泄漏电流的高频值可以发现,当绝缘子表面污秽不变时,在相同的相对湿度下,泄漏电流几乎相同。

表1 $\rho_{\text{ESDD}}=0.025 \text{ mg/cm}^2$ 时 XWP2-70 绝缘子泄漏电流的一次谐波变化范围

Tab.1 Primary harmonic variation range of insulator leakage current when $\rho_{\text{ESDD}}=0.025 \text{ mg/cm}^2$

相对湿度/%	5月1日		5月2日		5月6日		5月7日	
	变化幅度/mA	高频值/mA	变化幅度/mA	高频值/mA	变化幅度/mA	高频值/mA	变化幅度/mA	高频值/mA
55~59	0.20~0.21	0.20	0.19~0.20	0.20	0.19~0.20	0.19	0.21~0.22	0.21
60~64	0.21~0.23	0.21	0.20~0.21	0.21	0.20~0.21	0.20	0.21~0.23	0.21
65~69	0.22~0.24	0.23	0.21~0.23	0.22	0.20~0.22	0.20	0.22~0.24	0.23
70~74	0.23~0.25	0.24	0.22~0.25	0.24	0.21~0.23	0.22	0.23~0.26	0.24
75~79	0.24~0.28	0.26	0.24~0.27	0.25	0.22~0.25	0.24	0.25~0.30	0.27
80~84	0.25~0.29	0.28	0.26~0.29	0.27	0.24~0.28	0.26	0.27~0.33	0.31
85~89	0.26~0.31	0.29	0.27~0.32	0.30	0.25~0.31	0.30	0.32~0.40	0.37
90~95	0.27~0.33	0.32	—	—	—	—	—	—

从表1~2还可以看出,在相对湿度每升高5%的情况下,大部分泄漏电流高频值的增加量不超过0.06 mA,例外情况是在5月7日,当 $\rho_{\text{ESDD}}=0.250 \text{ mg/cm}^2$ 时,相对湿度从80%~84%升高到85%~89%的情况下,泄漏电流高频值增大了0.08 mA。当相对湿度低于80%时,除5月7日外,每列中泄漏电流的高频值增加量均在0.03 mA以内,可以发现相对湿度较高时,泄漏电流增大得更快。

3.2 泄漏电流与湿度的关系

为进一步探究泄漏电流和环境湿度之间的关

系,选择5月6日0点~5月8日0点时间段,绘制 XWP2-70 绝缘子 $\rho_{\text{NSDD}}=1.5 \text{ mg/cm}^2$, $\rho_{\text{ESDD}}=0.025、0.05、0.1、0.25 \text{ mg/cm}^2$ 时,泄漏电流一次谐波与环境湿度的散点图如图7所示。从图7可以看出, XWP2-70 绝缘子泄漏电流随相对湿度的升高而增大,当相对湿度小于65%时,泄漏电流幅值增加较小;当相对湿度大于65%时,盐密越大,泄漏电流越大,泄漏电流的增幅越大。进一步采用式(1)所示非线性模型拟合泄漏电流一次谐波与相对湿度的关系。拟合后,当 $\rho_{\text{ESDD}}=0.025、0.050、0.100、0.250$

表2 $\rho_{ESDD}=0.250 \text{ mg/cm}^2$ 时XWP2-70绝缘子泄漏电流的一次谐波变化范围

Tab.2 Primary harmonic variation range of XWP2-70 insulator leakage current when $\rho_{ESDD}=0.250 \text{ mg/cm}^2$

相对湿度/%	5月1日		5月2日		5月6日		5月7日	
	变化幅度/mA	高频值/mA	变化幅度/mA	高频值/mA	变化幅度/mA	高频值/mA	变化幅度/mA	高频值/mA
55~59	0.24~0.25	0.24	0.23~0.24	0.23	0.23~0.24	0.23	0.24~0.26	0.25
60~64	0.24~0.26	0.25	0.24~0.26	0.24	0.24~0.26	0.24	0.24~0.27	0.26
65~69	0.26~0.30	0.27	0.26~0.28	0.27	0.25~0.27	0.26	0.27~0.29	0.28
70~74	0.26~0.31	0.29	0.27~0.29	0.28	0.26~0.28	0.27	0.28~0.34	0.29
75~79	0.29~0.33	0.32	0.28~0.32	0.30	0.27~0.33	0.29	0.31~0.38	0.33
80~84	0.31~0.36	0.35	0.31~0.36	0.34	0.32~0.37	0.35	0.35~0.42	0.37
85~89	0.35~0.41	0.38	0.34~0.42	0.39	0.35~0.42	0.40	0.39~0.52	0.45
90~95	0.38~0.47	0.44	—	—	—	—	—	—

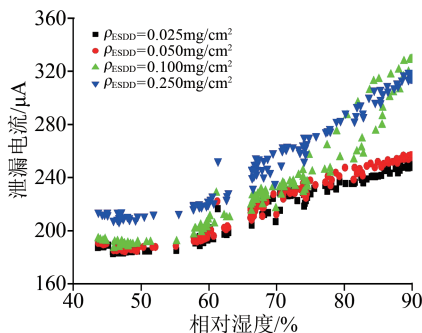


图7 XWP2-70绝缘子泄漏电流一次谐波与相对湿度的散点图

Fig.7 Scatter diagram of leakage current primary harmonics and relative humidity of XWP2-70 insulator

mg/cm^2 时, a 值分别为 153.662、135.124、133.802、95.869, b 值分别为 0.005、0.007、0.009、0.013。

$$I_a = a \times e^{(b \times R_H)} \quad (1)$$

为了验证此回归模型的有效性,采用变差占总变差的比重 R^2 对回归模型的拟合效果进行检验,得到 R^2 分别为 0.928、0.934、0.938、0.964,说明泄漏电流与相对湿度的关系能很好地满足指数函数规律,因此绝缘子串的泄漏电流受环境相对湿度的影响显著。

3.3 泄漏电流与温度的关系

为了找出泄漏电流一次谐波和环境温度之间的关系,同样选择5月6日0点~5月8日0点时间段,绘制XWP2-70绝缘子 $\rho_{NSDD}=1.5 \text{ mg/cm}^2$, $\rho_{ESDD}=0.025、0.05、0.1、0.25 \text{ mg/cm}^2$ 时,泄漏电流一次谐波和环境温度的散点图如图8所示。然后采用式(2)所示非线性模型拟合泄漏电流一次谐波与环境温度的关系。

$$I_a = a \times e^{(-b \times T)} \quad (2)$$

从图8可以看出,温度与泄漏电流一次谐波呈显著负相关。当 $\rho_{ESDD}=0.025、0.05、0.1、0.25 \text{ mg/cm}^2$ 时, R^2 分别为 0.63、0.54、0.32、0.45,说明泄漏电流随

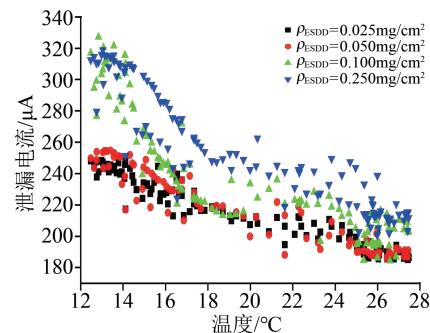


图8 XWP2-70绝缘子泄漏电流一次谐波与温度的散点图

Fig.8 Scatter diagram of leakage current primary harmonics and temperature of XWP2-70 insulator

温度的关系不能很好地满足指数函数的规律。尤其是当 $\rho_{ESDD}=0.100 \text{ mg/cm}^2$ 时, R^2 远小于 1。尽管泄漏电流的幅值整体与温度呈负相关,但在不同温度下,泄漏电流可能在很大范围内变化,即泄漏电流与温度之间并不存在明显的对应关系。

4 盐密与回归系数间的关系

根据大量泄漏电流一次谐波和环境相对湿度的实测数据,采用非线性回归方法进行拟合,计算出回归系数 $a、b$ 值,得到通过监测泄漏电流和气象因素直接预测出 ρ_{ESDD} 值的经验公式。

表3和表4是不同污秽条件下XWP2-70绝缘子和XP-160绝缘子泄漏电流一次谐波与湿度拟合获得的系数表。其中,系数 a 与绝缘子型号、绝缘子材质、电压等级、 ρ_{ESDD} 和 ρ_{NSDD} 等有关,回归系数 b 表示泄漏电流一次谐波受相对湿度影响的程度, b 值越大,湿度对泄漏电流的贡献越大。

从表3~4可知,整体而言,盐密越大, a 值越小, b 值越大,则在同一 ρ_{NSDD} 下,可较好地利用 a 和 b 值的大小区分不同的 ρ_{ESDD} 。但由于 ρ_{NSDD} 对泄漏电流和 $a、b$ 值有较大影响,应同时结合 ρ_{NSDD} 和 ρ_{ESDD} 来划分 a 和 b 值区间。当相对湿度升高时,泄漏电流也

表3 XWP2-70不同灰密和盐密下的回归系数和相关系数
Tab.3 Regression coefficient and correlation coefficient of XWP2-70 under different gray and salt densities

$\rho_{\text{NSDD}}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$	$\rho_{\text{ESDD}}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$	a	b	R^2
0.5	0.025	128.788	0.011	0.650
	0.050	124.545	0.012	0.939
	0.100	180.882	0.009	0.828
	0.250	170.556	0.012	0.880
1.0	0.025	139.849	0.007	0.888
	0.050	133.843	0.008	0.918
	0.100	115.154	0.011	0.952
	0.250	113.085	0.012	0.959
1.5	0.025	153.662	0.005	0.928
	0.050	135.124	0.007	0.934
	0.100	133.802	0.009	0.938
	0.250	95.869	0.013	0.964
2.0	0.025	278.257	0.006	0.942
	0.050	250.766	0.008	0.928
	0.100	245.252	0.009	0.900
	0.250	219.414	0.011	0.920

表4 XP-160不同灰密和盐密下的回归系数和相关系数
Tab.4 Regression coefficient and correlation coefficient of XP-160 under different gray and salt densities

$\rho_{\text{NSDD}}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$	$\rho_{\text{ESDD}}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$	a	b	R^2
0.5	0.025	135.214	0.007	0.875
	0.050	138.239	0.009	0.822
	0.100	123.691	0.012	0.896
	0.250	102.641	0.015	0.853
1.0	0.025	75.368	0.017	0.861
	0.050	46.358	0.022	0.868
	0.100	36.214	0.027	0.892
	0.250	26.647	0.035	0.902
1.5	0.025	96.214	0.014	0.963
	0.050	60.289	0.018	0.942
	0.100	50.167	0.022	0.939
	0.250	48.312	0.025	0.937
2.0	0.025	84.216	0.017	0.939
	0.050	82.136	0.019	0.942
	0.100	74.365	0.021	0.963
	0.250	64.366	0.024	0.942

会增大,且盐密越大,泄漏电流增大速度越快,在此处, b 值的意义可理解为电流随湿度变化的趋势。由于在相对湿度较低时,不同盐密下泄漏电流一次谐波的幅值相近,而拟合式也需要满足低湿度时的相互关系,因此 b 值越大时, a 值越小,即 a 值是受 b 值的影响才呈现出变小的趋势。

当XWP2-70绝缘子 $\rho_{\text{NSDD}}=0.5 \text{ mg}/\text{cm}^2$, $\rho_{\text{ESDD}}=$

$0.025 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 时,相关系数 R^2 较低,其余污秽条件下相关系数 R^2 均在0.80以上;不同污秽条件下XP-160绝缘子的相关系数 R^2 均在0.82以上。

5 结论

通过大量的户外污秽试验,探究了天气晴朗时,瓷绝缘子表面泄漏电流变化趋势及泄漏电流一次谐波与环境温湿度的动态关系,建立绝缘子盐密预测模型,实现通过泄漏电流一次谐波和相对湿度实时获得回归系数进而科学准确地预测 ρ_{ESDD} 的目的,主要得到以下结论:

(1)瓷绝缘子表面泄漏电流随时间的变化整体呈现马鞍形曲线,其一次谐波与湿度呈正相关,与温度呈负相关。

(2)若短时间没有降雨,湿度保持不变时,不同温度下瓷绝缘子表面泄漏电流一次谐波变化不大;温度保持不变时,不同相对湿度下瓷绝缘子表面一次谐波变化幅度较大,即泄漏电流主要取决于当天的相对湿度,且当相对湿度较高时,泄漏电流随着相对湿度的增加而快速增大。

(3)在大量数据基础之上建立了瓷绝缘子表面泄漏电流一次谐波与相对湿度的关系式,通过回归系数变化预测盐密值与泄漏电流幅值基本无关,有效减少了泄漏电流随机变化对试验结果的影响。

(4)在同一 ρ_{NSDD} 下,可较好地利用 a 和 b 值的大小区分不同的 ρ_{ESDD} 。但由于 ρ_{NSDD} 对泄漏电流和 a 、 b 值的影响较大,应同时结合 ρ_{NSDD} 和 ρ_{ESDD} 来划分 a 和 b 值区间。

参考文献:

- [1] 蒋兴良,刘又超,刘要峰,等.可溶物对绝缘子有效污秽度的影响[J].高电压技术,2018,44(5):1483-1489.
- [2] 张益舟,云浩,汪亮,等.可水解抗氧化剂对XLPE电缆修复技术长期性能的影响[J].绝缘材料,2022,55(4):77-82.
- [3] 张志劲,卢炳宏,傅海涛,等.双伞瓷绝缘子表面冶金污秽的积污特性及成分研究[J].电网技术,2021,45(9):3737-3744.
- [4] 黄瑞平,田亮,刘世涛,等.不同环境条件下特高压直流线路绝缘子长期积污特性研究[J].绝缘材料,2021,54(3):60-67.
- [5] MOHAMMADNABI S, RAHMANI K. Influence of humidity and contamination on the leakage current of 230kV composite insulator[J]. Electric Power Systems Research,2021,194(1):107083.
- [6] 刘云鹏,刘嘉硕,裴少通,等.雾室环境下污秽度和湿度对瓷质绝缘子放电特性的影响[J].绝缘材料,2021,54(4):86-90.
- [7] 李岩,滕云,苑舜,等.绝缘子覆雪闪络特性及其改进量子神经网络的预测模型[J].电网技术,2018,42(8):2725-2732.
- [8] 王黎明,李旭,曹彬,等.基于BP神经网络的线路绝缘子表面泄漏电流预测[J].高压电器,2020,56(2):69-76.
- [9] 袁田,向铁元,张锐,等.支柱瓷绝缘子污层泄漏电流及干带产生

- 的边界条件研究[J]. 高电压技术,2016,42(1):214-222.
- [10] THANH P N, CHO M Y, DA T N. Insulator leakage current prediction using surface spark discharge data and particle swarm optimization based neural network[J]. Electric Power Systems Research,2021,191:106888.
- [11] ROMAN M, ZYL R V, PARUS N, et al. In-situ monitoring of leakage current on composite and glass insulators of the cahora bassa HVDC transmission line[J]. SAIEE Africa Research Journal,2019,110(1):4-10.
- [12] 薛兵,牟霖,袁小清,等. 双伞瓷绝缘子表面冶金污秽的积污特性及成分研究[J]. 绝缘材料,2019,52(4):75-80.
- [13] 黄志成,耿江海,王从龙,等. 颗粒与复合绝缘子的碰撞粘附模型[J]. 中国电机工程学报,2021,41(21):7540-7551.
- [14] ZHANG Z, ZHANG D, JIANG X, et al. Study on natural contamination performance of typical types of insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(4):1901-1909.
- [15] 田亮,刘岩,陕华平,等. 不同环境条件下特高压换流站用绝缘子积污特性研究[J]. 绝缘材料,2021,54(4):36-40.
- [16] SUN Jiayang, ZHANG Hongru, LI Qingquan, et al. Contamination degree prediction of insulator surface based on exploratory factor analysis-least square support vector machine combined model[J]. High Voltage,2020,6(2):264-277.
- [17] VIGNESHWARAN B, MAHESWARI R V, KALAIVANI L, et al. Recognition of pollution layer location in 11kV polymer insulators used in smart power grid using dual-input VGG convolutional neural network[J]. Energy Reports,2021,7:7878-7889.
- [18] GOVINDARAJU P, MUNIRAJ C. Monitoring and optimizing the state of pollution of high voltage insulators using wireless sensor network based convolutional neural network[J]. Microprocessors and Microsystems,2020,79(2):103299.
- [19] DEB S, DAS S, PRADHAN A K, et al. Estimation of contamination level of overhead insulators based on surface leakage current employing detrended fluctuation analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2019,67(7):5729-5736.
- [20] JIANG Z, JIANG X, GUO Y, et al. Pollution accumulation characteristics of insulators under natural rainfall[J]. IET Generation Transmission and Distribution,2017,11(6):1479-1485.
- [21] JIANG Z, JIANG X, ZHANG Z, et al. Investigating the effect of rainfall parameters on the self-cleaning of polluted suspension insulators: Insight from southern China[J]. Energies,2017,10(5):1-13.
- [22] 唐铭骏,杨帅,杨翠茹,等. 不溶物吸湿性对绝缘子泄漏电流的影响[J]. 高电压技术,2017,43(12):3964-3972.
- [23] 苏圆圆,何怡刚,邓芳明,等. 绝缘子温湿度在线监测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(7):1098-1106.
- [24] 全国绝缘子标准化技术委员会. 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验:GB/T 4585—2004[S]. 北京:中国标准出版社,2004.

收稿日期:2022-06-14 修回日期:2022-07-25

作者简介:林峰(1974-),男(汉族),福建闽侯人,高级工程师,研究方向为电力系统保护与控制、输电线路防雷措施。