

基于污层电导率评估绝缘子污秽度模型研究

宋 毅

(江苏省送变电公司, 南京 211102)

摘要: 合理选择表征污秽绝缘子运行状态的特征量,建立科学的数学模型,可有效地评估绝缘子的污秽程度,定量划分污秽水平,为输电线路运行维护提供可靠依据。笔者通过人工污秽试验得到了5种典型结构绝缘子在不同污秽度下的污层电导率值,选用最小二乘法对试验结果进行拟合推导,得到评估绝缘子污秽度的数学模型,并对模型进行了试验验证。研究结果对绝缘子污闪预警评估具有重要的科学价值。

关键词: 绝缘子; 污层电导率; 盐密; 最小二乘法; 评估模型

中图分类号: TM216

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)09-0106-05

Contamination Degree Evaluation Model for Insulator Based on Surface Polluted Layer Conductivity

SONG Yi

(Jiangsu Power Transmission and Transformation Corporation, Nanjing 211102, China)

Abstract: The contamination extent of polluted insulators can be evaluated quantitatively by reasonably selecting the features that can characterize the operation state of polluted insulators and establishing scientific mathematical models, so as to provide a reliable basis for the maintenance of transmission lines. In this paper, by means of artificial pollution test, the pollution layer conductivity values of five typical structures of insulator with different pollution degrees are obtained. The test results are fitted and calculated by using the least squares method to get a mathematical evaluation model of insulator contamination degree, and the model is verified by experiments. This study may be applied to insulator's pollution flashover assessment and warning.

Key words: insulator; surface polluted layer conductivity (SPLC); SDD; least square method; evaluation model

0 引言

绝缘子是电力系统输变电设备中使用数量最大且不可或缺的器件。由于绝缘子串都是并联运行的,因此任何一串绝缘子发生故障都会导致线路跳闸停电^[1]。

清洁的绝缘子耐受电压很高,但由于输电线路绝缘子经长时间运行后,表面积附一层污秽物。特别由于工业污染、生活污染加剧,雾霾天气频发,绝缘子表面积污严重。当空气湿度较高,绝缘子表面的污秽将被湿润,会导致绝缘子电气性能下降,引发闪络事故^[2-3]。

为了减少污闪事故的发生,保障电力系统安全运行,各电网公司和科研单位也都对此投入进行大

量的研究,希望能找到一个合理的参量来表征绝缘子的污秽程度。污层电导率是将绝缘子表面整体看成是具有电导率 γ 的导电膜,其可以综合反映绝缘子表面的积污和受潮过程。污层电导率排除了因污秽种类不同而引起污秽度的测量差异,可以客观地反映绝缘子实际染污程度^[4-7]。

因此,笔者以输电线路常用的绝缘子为研究对象,通过人工试验,测量其不同污秽程度下的污层电导率值,根据试验结果推导建立评估绝缘子污秽度的数学模型并加以验证。

1 绝缘子污秽度的意义

绝缘子污秽度是指绝缘子表面染污的程度。为保证输变电设备运行安全,各电网公司都开展了大量的防污闪工作,其中有一项非常重要的工作就是测量运行中绝缘子的污秽程度,它的主要意义

在于^[8-10]:

1)确定绝缘子表面的污秽度,根据运行经验判断绝缘子是否能够在当地的环境污染条件下不发生污秽闪络,如果测量的污秽度达到或已超临界值,那么有关部门就要考虑采取相应清扫、更换措施,以保证电网安全、稳定运行。

2)对某地区的污秽度进行测量,以此判断和估计该地区的污秽对绝缘子电气强度的影响,并根据运行经验划分污秽等级,以检验现有绝缘配置水平是否满足要求,同时也可以为新建输变电工程的外绝缘设计提供科学依据。

3)测量不同结构、不同材质绝缘子表面污秽度,可以掌握各种绝缘子的积污特性和防污性能,为绝缘子的选择配置提供科学依据。

4)测量曾经发生过污闪事故的绝缘子的污秽度,可以为进一步研究绝缘子的污闪特性和评价输变电设备绝缘水平提供科学依据。

2 污秽试验

2.1 试品

试品选用5种典型绝缘子作为研究对象,绝缘子具体参数见表1。

表1 绝缘子主要结构参数

Tab. 1 Structure parameters of insulators mm

绝缘子型号	几何参数		
	H	D	L
XP-70	146	254	295
LXY-70	145	255	320
XP-160	155	254	305
LXY ₄ -160	155	280	380
XWP ₂ -70	146	254	400

注:H为绝缘子的结构高度;D为盘径;L为绝缘子的爬电距离。

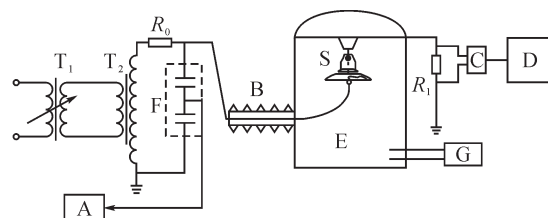
2.2 试验装置

人工污秽试验原理接线见图1。电源由试验变压器提供,其输出电压0~30 kV,容量为15 kV·A,满足IEC标准对染污绝缘子交流闪络试验电源的要求^[11-12],泄漏电流由数据采集卡采样读取。

2.3 试验方法

采用人工定量涂刷法对绝缘子进行预染污。测量不同污秽度下的污层电导率的值,具体实验步骤如下^[13-18]:

1)试品的预处理。用自来水多次清洗绝缘子表面,并用干净的布擦拭绝缘子表面;若绝缘子表面存在油脂,可用干燥的脱脂棉沾取无水酒精进行清



T₁—调压器; T₂—试验变压器; R₀—保护电阻;
F—电容分压器; A—电压表; B—绝缘套管;
E—试验罐; S—试品绝缘子; R₁—采样电阻;
C—数据采集卡; D—台式电脑; G—超声波雾发生器。

图1 试验接线原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tested circuit

洁直至绝缘子表面洁净。随后将绝缘子悬挂放置在绝缘子架上,阴干,待用。

2)试品染污方法。首先根据计算绝缘子染污所需的盐密、灰密值,并精确称量出每个试品所需的质量,将其放在干净的容器中,随后用玻璃滴管吸取适量的纯净水(电导率<10 μS/cm)滴入塑料杯中,用排刷将污物充分搅拌,并均匀地涂在试品表面上。尽量避免污液掉落,然后悬挂阴干。

3)为了测量绝缘子表面污层电导率,应在污层达到饱和湿润的条件下,在绝缘子的钢脚和钢帽之间施加工频交流电压 U ,测量其泄漏电流 I ,可得流过污秽绝缘子的工频电流对作用电压的比率,即为绝缘子的整体表面电导。

$$G=I/U. \quad (1)$$

绝缘子两端所加的电压值按照CIGRE工作组的建议每米结构高度加30 kV,测量时施加电压的时间不应太长,只加5~10个周波,能记录下泄漏电流即可。

将电导 G 乘以绝缘子的形状因数 f ,即得表面污层电导率,即

$$\gamma=f \cdot G=f \times \frac{I}{U}. \quad (2)$$

式(2)中: I 为污层饱和受潮时的最大泄漏电流有效值,mA; U 为施加的电压有效值,kV。

计算污层电导率应换算为标准参考温度20℃时的值,即

$$\gamma_{20}=\frac{1.6\gamma_t}{1+0.03t}. \quad (3)$$

式(3)中: t 为绝缘子表面的温度或测量时的环境温度,℃; γ_t 为对应温度 t 时的电导率。

3 试验结果与分析

选用XP-70、XP-160、LXY-70、LXY₄-160和XWP₂-70 5种典型单片绝缘子为研究对象,采用人工定量涂刷法对试品进行预染污。盐成分为NaCl,

灰为硅藻土。污秽的盐密/灰密比为1:6固定不变,在冷雾环境下,测得多个有效污层电导率值并求取平均值后,并校正至20℃时的值作为该盐密下的污层电导率,试验结果见表2,不同型式绝缘子污层电导率与盐密关系见图2。

表2 不同型式绝缘子污层电导率测量值

Tab. 2 SPLC value of different type insulators

盐密 $ESDD$ $/(mg \cdot cm^{-2})$	污层电导率 $\gamma_{20}/\mu S$				
	XP-70	LXY-70	XP-160	LXY ₄ -160	XWP ₂ -70
0.05	7.21	7.05	7.19	7.24	7.04
0.10	11.65	11.47	11.82	11.72	11.55
0.15	17.63	17.02	17.51	17.35	17.04
0.20	25.34	24.78	25.27	24.63	24.86

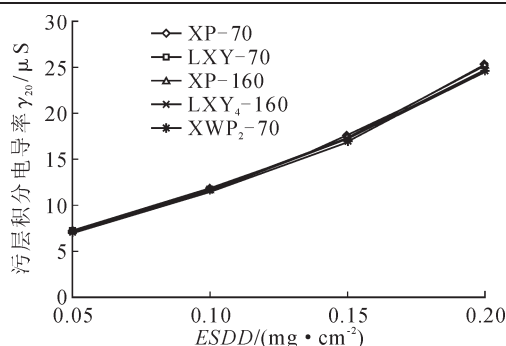


图2 不同型式绝缘子污层电导率与盐密关系

Fig. 2 Relationship between SPLC and ESDD of different type insulators

由试验结果可以看出:同种盐密下,不同型式的绝缘子污层电导率几乎相等,相差很小。如当盐密为0.05 mg/cm²,LXY₄-160绝缘子的污层电导率最大为7.24 μS,其次为XP-70绝缘子的7.21 μS和XP-160的7.19 μS,而LXY-70和XWP₂-70的电导率值几乎相同分别为7.05 μS和7.04 μS,最大值与最小值非常接近仅相差0.20 μS。在其他盐密值情况下也可发现类似的规律,且从图2中可以看出,各条关系曲线也非常靠近,几乎重合在一起,笔者认为绝缘子的形状结构对表面污层电导率没有影响。根据污层电导率的物理意义,它不随绝缘子尺寸参数的变化而变化,只反映绝缘子表面的脏污程度,因此对试验数据分析得到的结果与理论上也是一致。

4 污秽度评估模型的建立

根据前文试验结果,由图2可以看出,盐密对污层电导率值的影响规律为幂指数关系,那么可以认为绝缘子污层电导率随盐密变化的规律可以表示为

$$\gamma_{20} = K \cdot (ESDD)^a = K \cdot S^a. \quad (4)$$

式(4)中: γ_{20} 为绝缘子污层电导率,μS; $ESDD$ 为盐密,mg/cm²;K为系数,与大气环境结构有关,

可以通过人工污秽试验求得; a 为盐密对污层电导率的影响特征指数,可以由试验求得。

由于式(4)的回归方程属于一元非线性,那么首先要将其线性化处理,将式两端去对数后得

$$\ln \gamma_{20} = \ln K + a \ln S. \quad (5)$$

令 $y = \ln \gamma_{20}$, $\beta_0 = \ln K$, $\beta_1 = a$, $x = \ln S$, 式(5)即转化成标准形式

$$y = \beta_0 + \beta_1 x. \quad (6)$$

假设由试验已经获得了 n 组有效数据,那么由最小二乘法可得

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ \beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \end{cases}. \quad (7)$$

式(7)中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$; 并记:

$$l_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}; \quad (8)$$

$$l_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2; \quad (9)$$

$$l_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2. \quad (10)$$

由式(8)-(10)可以将 β_0 , β_1 化简记为

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{l_{xy}}{l_{xx}} \\ \beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \end{cases}. \quad (11)$$

根据以上应用最小二乘法计算回归系数的方法,取20组数据代入计算得:

$$l_{xy} = 4.811; l_{xx} = 5.441; l_{yy} = 4.279; \beta_1 = 0.884; \beta_0 = 4.569.$$

再由式(6)和式(7)的对应关系得到, $a = 0.884$, $K = 96.438$; 故污层电导率与盐密间的关系式为

$$\gamma_{20} = 96.438 \cdot ESDD^{0.884}. \quad (12)$$

为了检验式(12)的显著性,选用 t 检验法对其进行验证。 t 分布理论是对正态分布或近似服从正态分布的总体,当方差未知时关于平均数的检验方法。根据现象回归性质可得

$$T = \frac{\sqrt{(n-2)} l_{xx}}{S_E} \sim t(n-2). \quad (13)$$

当 H_0 成立时,通过令

$$P(|\beta_1| > c | H_0 \text{成立}) = \alpha. \quad (14)$$

$$\text{可求得临界值 } c = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{l_{xx}}} t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-2). \quad (15)$$

取显著检验水平 $\alpha = 0.05$,查 T 分布表得 $T_{0.975}(1, 18) \approx 2.101$,从而根据式(15)求得临界值 $c = 0.107$,

$|\beta_1|=0.884 > c$, 故拒绝 H_0 , 即盐密对污层电导率的影响在 $\alpha=0.05$ 时是显著的。

通过以上的检验分析, 可以认为式(12)的回归显著性很高, 盐密对污层电导率的影响明显。同时笔者也采用软件方法对试验数据进行分析并曲线拟合, 得到污层电导率与盐密间的关系为

$$\gamma_{20}=97.715 \cdot ESDD^{0.8763} \quad (16)$$

比较由最小二乘法 and 软件拟合得到的式(12)和式(16), 发现两种拟合方法得到的方程式非常接近, 系数上略有差异, 取 K 的平均值并保留两位小数, a 的平均值并保留两位小数作为污层电导率与盐密间的关系式

$$\gamma_{20}=97.08 \cdot ESDD^{0.881} \quad (17)$$

5 污秽度评估模型验证

为了验证式(17)的准确性, 笔者采用人工定量涂刷法对绝缘子进行预染污, 盐成分为NaCl, 灰成分为硅藻土。污秽的盐密/灰密比为1:6固定不变, 对于每种绝缘子选取盐密值为0.08、0.12、0.18 mg/cm², 在冷雾环境下, 测得多个有效污层电导率值求取平均值后, 并校正至20℃时的值作为该污秽度下的污层电导率值, 并将试验值与计算值进行比较, 计算出相对误差, 其具体结果见表3和图3。

表3 污层电导率试验值与计算值及其相对误差

Tab. 3 SPLC test value and calculated value and relative error

绝缘子型式	盐密 (mg·cm ⁻²)	试验值/ μ S	计算值/ μ S	相对误差/%
XP-70	0.08	10.87	10.51	-3.31
	0.12	14.25	14.79	3.79
	0.18	21.92	21.19	-3.33
LXY ₄ -160	0.08	10.63	10.51	-1.13
	0.12	14.32	14.79	3.28
	0.18	20.78	21.19	1.97
XWP ₂ -70	0.08	10.59	10.51	-0.76
	0.12	14.87	14.79	-0.54
	0.18	20.45	21.19	3.62
LXY-70	0.08	10.04	10.51	4.68
	0.12	14.60	14.79	1.30
	0.18	21.03	21.19	0.76
XP-160	0.08	10.17	10.51	3.34
	0.12	14.92	14.79	-0.87
	0.18	21.24	21.19	-0.24

从试验结果可以看出, 所有污层电导率的试验值与计算值之间的相对误差很小, 均在允许误差 $\pm 5\%$ 以内, 试验数据均有效。

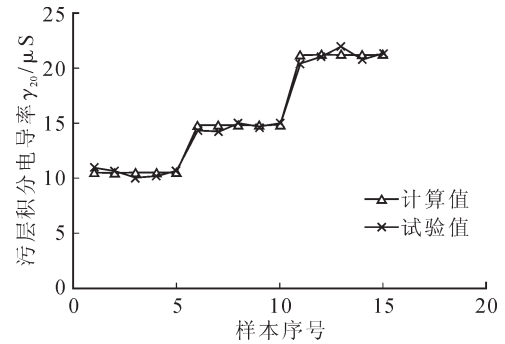


图3 污层电导率试验值与计算值相对误差

Fig. 3 SPLC relative error of test values and the calculated values

比较表2、3中的值可以看出: XP-70绝缘子盐密为0.05 mg/cm²时污层电导率为7.21 μ S, 盐密为0.10 mg/cm²时电导率为11.65 μ S, 而其盐密为0.08 mg/cm²时的试验值为10.87 μ S, 而计算值为10.51 μ S, 该结果有效。又如XWP₂-70绝缘子盐密为0.15 mg/cm²时的污层电导率为17.04 μ S, 盐密为0.20 mg/cm²时为24.86 μ S, 盐密为0.18 mg/cm²时的污层电导率试验值为20.45 μ S, 计算值为21.19 μ S, 该试验结果也有效。从表3也可以看出, 污层电导率与绝缘子的型式无关, 由此可以验证式(17)的回归方程是正确的。

6 结论

笔者以典型结构绝缘子为研究对象, 在冷雾环境中, 通过人工污秽试验测量了其在不同污秽度下的污层电导率, 并根据试验结果得到了评估污秽度的数学模型, 得到了以下结论:

1) 不同绝缘子在同种污秽度下的污层电导率值几乎相同。它不随绝缘子尺寸参数的变化而变化, 可以有效地反映绝缘子表面的污染程度。

2) 应用最小二乘法对人工污秽试验结果进行拟合计算, 得到了污层电导率与盐密间的关系式为 $\gamma_{20}=97.08 \cdot ESDD^{0.881}$ 。

3) 用人工试验数据对数学模型进行验证, 试验值与计算值误差均在 $\pm 5\%$ 以内, 评估模型正确, 可应用于绝缘子污闪预警评估。

参考文献:

- [1] 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, 1990.
- [2] 张仁豫. 绝缘污秽放电[M]. 北京: 水利电力, 1994.
- [3] CHRZAN K L, STEC C, FARZANEH M. Probes for spot measurement of surface conductivity on polluted insulators [J]. IET Sci. Meas. Technol, 2007, 1(5): 295-300.
- [4] SUNDARARAJAN R. Effect of insulator profiles on DC flash-

- over voltage under polluted conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulations, 1994, 1(1): 124-132.
- [5] SUN Baoqiang, WANG Liming, GUAN Zhicheng. The comparative study of overall and partial surface conductivity method[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 6(6): 225-255.
- [6] 蔡伟, 李敏, 杨颜红. 污秽绝缘子在线监测系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 45-48.
CAI Wei, LI Min, YANG Yanhong. On-line monitoring system for polluted insulator based on telemetry[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 45-48.
- [7] 徐击水, 张子蓬, 王淑青, 等. 基于GNBR算法的BP网络对绝缘子运行状态预测研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6): 6-9.
XU Jishui, ZHANG Zipeng, WANG Shuqing, et al. Research on the prediction for the operating state of insulators using BP network based on GNBR algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 6-9.
- [8] ARAI N. AC fog withstand test on contaminated insulators by steam fog[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1982(PAS-101): 4316-4323.
- [9] WYK L V, HOLTZHAUSEN J P, VOSLOO W L. Surface conductivity as an indication of the surface condition of non-ceramic insulators[J]. IEEE AFRICON 4th, 1996(1): 485-488.
- [10] GB/T 4585—2004 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S]. 2004.
GB/T 4585—2004 Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on AC systems[S]. 2004.
- [11] IEC 60507—1991 Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on AC systems[S]. 1991.
- [12] ZHOU J G, DONG G, IMAKOMA T, et al. Contamination performance of outer-rib type suspension insulators [C]// IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002. Asia Pacific, Yokohama Japan: IEEE/PES, 2002: 2185-2190.
- [13] 徐涛, 吴光亚, 周文俊. 交流特高压输电线路绝缘子串污秽耐压特性试验[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 9-13.
XU Tao, WU Guangya, ZHOU Wenjun. Withstand pollution characteristic test of UHV AC transmission line insulator string[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 9-13.
- [14] 李恒真, 王颖凯, 刘刚, 等. 电力外绝缘污秽颗粒等效模型和粒径分布探讨[J]. 电瓷避雷器, 2013(1): 34-38.
LI Hengzhen, WANG Yingkai, LIU Gang, et al. Discussing about the equivalent model and particles size distribution of pollution particles of power system external insulation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(1): 34-38.
- [15] 廖青华, 吕龔, 唐林权. 基于灰靶理论的高压绝缘子污秽状态综合评判[J]. 电瓷避雷器 2012(3): 9-14.
LIAO Qinghua, LYU Yan, TANG Linquan. Synthetic evaluation of high voltage insulator pollution state based on grey target theory[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(3): 9-14.
- [16] NATIO K, MATSUOKO R, SAKANISHI K. Investigation for the insulation performance of the insulator covered with ice[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1991, 6(3): 1634-1640.
- [17] AL-HAMOUDI I Y. Performance of high voltage insulators under heavy natural pollution conditions[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance. [S.l.]: [s.n.], 1995: 25-31.
- [18] SCHWARDT W H, HOLTZHAUSEN J P, VOSLOO W L. A comparison between measured leakage current and surface conductivity during salt fog tests[C]//7th AFRICON Conference in Africa. [S.l.]: IEEE, 2004: 597-600.
- 宋毅(1963—), 男, 高级工程师, 从事输电线路技术工作。

(上接第 105 页)

- status of online monitoring and live detection technologies of transmission and distribution equipment in electric network[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 84-90.
- [22] 徐斌, 王晶, 李彦明. 变压器中局部放电超高频信号传播的仿真研究[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 244-247.
XU Bin, WANG Jing, LI Yanming. Emulational study on the propagation of UHF signal emitted by PD in transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 244-247.
- [23] 王颂, 李香龙, 李军浩, 等. 变压器局部放电超高频信号外传播特性的试验研究[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 100-101.
WANG Song, LI Xianglong, LI Junhao, et al. Experimental study for outside propagation characteristic of the UHF signal emitted by partial discharge in transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 100-101.
- 李燕青(1974—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统及其自动化。
- 王菲(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向电气设备在线监测与故障诊断。
- 王飞龙(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向电气设备在线监测与故障诊断。