

计及新型泄漏电流指数的玻璃绝缘子 风险评估方法

王节¹, 金维刚²

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090;

2. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430077)

摘要: 针对高压(HV)玻璃绝缘子均匀与非均匀污染检测难度大、风险评估不准确等问题, 提出了一种基于新型泄漏电流指标 R_{hi} 的高压玻璃绝缘子风险评估方法。该新型泄漏电流指标 R_{hi} 由泄漏电流的第3次、第5次和第7次谐波推导出来, 并根据测量到的临界电压梯度(E_c), 采用两串33 kV的帽针式玻璃绝缘子, 在不同的上下表面比(J)和润湿率下对受污染绝缘子进行临界电压应力试验, 以评估其风险水平。此外, 还分析了等效盐沉积密度(ESDD)与不可溶沉积密度(NSDD)之比对绝缘子闪络发生的影响。最后, 通过实验验证了该新型指标能更准确地预测绝缘子的危险程度和闪络发生的概率。

关键词: 污染绝缘子; 风险评估; 泄漏电流谐波; 快速傅里叶变换; 玻璃绝缘子

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23503

A Risk Assessment Method for Glass Insulators with a New Leakage Current Index

WANG Jie¹, JIN Weigang²

(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, Hubei, China)

Abstract: In view of the difficulty in detecting the uniform and non-uniform contamination of high voltage (HV) glass insulators and the inaccuracy of risk assessment, a risk assessment method for HV glass insulators based on a new leakage current indicator R_{hi} was proposed. The new leakage current index R_{hi} was derived by the leakage current of the 3rd, 5th and 7th harmonics, according to the measured critical voltage gradient (E_c), using two bunch of 33 kV cap glass pin type insulator, the critical voltage stress test of polluted insulator in different top and bottom surface ratio (J) and wetting rate was carried out to evaluated the level of risk. In addition, the influence of the ratio of the equivalent soluble deposit density (ESDD) to that of non soluble deposite dentisty (NSDD) on insulator flashover was also analyzed. Finally, the experimental results show that the new index can predict the risk degree of insulator and the probability of flashover more accurately.

Key words: polluted insulators; risk assessment; leakage current harmonics; fast Fourier transform; glass insulator

室外绝缘子是电力系统输配电的关键设备之一。它用于绝缘导体与接地塔、辅助电力线路与机械支持。室外绝缘子的性能受到材料类型、安装配置、表面污染程度等不同的机械和环境因素的显著影响^[1]。污染的环境使得绝缘子容易受到泄漏电流的影响, 并增加绝缘子表面的电弧活动。这些情况可能会导致闪络现象, 而闪络现象反过来又会触发断路器中断电力传输^[2]。因此, 为了克服这一问题, 监测泄漏电流成为一个重要

的预防方面, 以确保绝缘子的整体健康。电弧和电晕活动改变了绝缘子表面特性, 导致绝缘子过早老化^[3-4]。这些现象都增加了绝缘子表面泄漏电流(leakage current, LC)的大小。

户外绝缘子性能及其长期性能的评价是众多研究者研究的热点^[5]。其中, 特别值得关注的问题是, 在绝缘子使用期间, 建立LC和污染严重程度之间的准确关系。文献[6-7]通过分析LC的统计值, 如平均值、最大值和标准偏差(standard

基金项目: 国家自然科学基金(51777082)

作者简介: 王节(1996—), 男, 硕士研究生, Email: 1370053232@qq.com

deviation, STD), 估计了绝缘子污染层的大小和严重程度。文献[8]利用泄漏电流和电压信号之间的相位角来研究预测污染的严重程度。结果表明,相角余弦(位移因子)的变化是判断绝缘子表面污染程度的良好指标。文献[9]的研究结果表明,闪络测量方法可用于预测绝缘子的污染严重程度。然而,该方法假定一些参数为已知的,如干燥带;另一种评估方法为LC提取技术^[10-11]。该方法是利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)对绝缘子的LC进行了频域分析,从频率来看,可以通过测量其奇次谐波分量来量化LC。对于50 Hz的电力系统,需要关注的谐波是第3次(150 Hz)和第5次(250 Hz)。这些谐波的增强增加了总谐波失真(total harmonic distortion, THD),这取决于污染级别。根据这一观察结果,文献[12-15]提出了一个反映绝缘子健康状况的指数。另外,利用频率分解的概念,提出了LC的5次至3次谐波比率,以预测绝缘子闪络发生情况。对硅橡胶和瓷绝缘子的研究表明,污染的严重程度与该比值的大小密切相关。

尽管上述方法在一定程度上提升了预测精度,但评价指数中未含高次谐波,基于此,本文提出了一种评估串状玻璃绝缘子风险状态的新指标 R_{hi} ,该指标是由LC的第3次、5次和7次谐波分量组合而成。为了验证这一新指标的有效性,本文在不同污染条件下对33 kV绝缘子串进行了实验测试,实验条件包括润湿条件和可溶沉积物密度与不可溶沉积物密度之比,采用正态分布函数和概率分布函数(probability distribution functions, PFD)计算绝缘子串风险指标,深入分析剖面对闪络电压梯度 E_c 和闪络发生概率程度的影响。最后,研究结果表明,所提方法可有效用于监测和诊断现场串式绝缘子的风险水平。

1 评估方法与实验材料

1.1 实验设置及试样

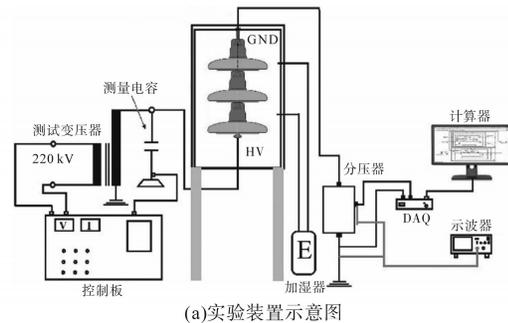
本文选取了两组不同结构的绝缘子串,分别用A型和B型表示。它们的参数如表1所示。

表1 测试绝缘子参数

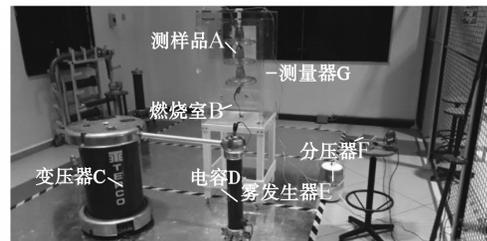
Tab.1 Test insulator parameters

绝缘子 型号	高度/ cm	直径/ cm	泄露 距离/cm	下边长/ cm	上边长/ cm
A	14.6	25.5	32.0	20.5	11.5
B	14.6	28.0	34.0	21.5	12.5

图1为测试绝缘子的实验设置示意图和实物图。图1a为测试绝缘子的实验设置示意图。图1b为实验设置实物图,实验设备包含一个高压变压器C给绝缘体供电(220 kV, 5 kV·A, 50 Hz)、一个保护电阻(2 400 Ω , 因太小图中没有显示)、一个电容分压器F(100, 25.000 pF)和一个泄漏电流(因太小图中没有显示)和闪络电压梯度测量器G。试验按照 IEC 60507 标准进行^[13],采用蒸汽发生器装置E和润湿速率控制器对绝缘子的润湿进行了模拟。



(a)实验装置示意图



(b)实验装置实物图

图1 实验图

Fig.1 Experimental diagram

1.2 污染和润湿条件

首先,用酒精和自来水彻底清洗测试绝缘子,以确保它们完全没有污垢和油脂的痕迹。然后,让绝缘子自然干燥。

采用固体层法在被测绝缘子表面均匀或不均匀地形成污染层。以不同的可溶性沉积物密度即等效盐沉积密度(equivalent salt deposit density, ESDD)制作了三种污染浆料。根据ESDD值,将污染程度分为低(0.03 mg/cm²)、中(0.09 mg/cm²)、高(0.15 mg/cm²)和严重(0.24 mg/cm²)四个污染程度级别。这个分类符合 IEC 60507 标准。

测试室的墙壁是由聚碳酸酯材料制成。墙的尺寸是50 cm×50 cm×75 cm。

采用空气-水压缩机和雾发生器对试验绝缘子进行高压水雾喷射。为了产生润湿,沿室内壁安装了8个喷嘴。这些喷嘴是通过高压管道从空气-水压缩机输入的。试验绝缘子用三级净

雾浸湿:轻度、中度和重度。湿润率近似为 2.5 ± 0.1 rh, 5 ± 0.2 rh, 7.5 ± 0.3 rh。室内温度在 $27 \sim 30$ °C。雾发生器的相对湿度在 $81\% \sim 85\%$ 之间变化。气压保持在 101 kPa左右。

1.3 闪络电压测量

不同工况下的闪络电压应力试验如图2所示。

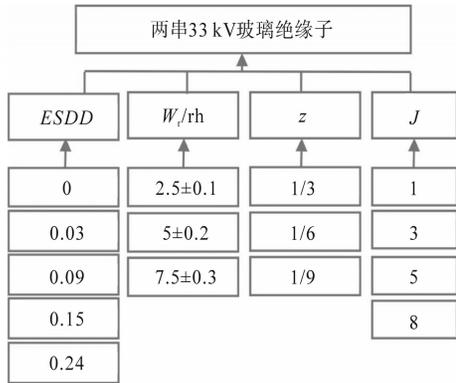


图2 试验串绝缘子运行条件

Fig.2 Operating conditions for tested string insulators

图2中, W_i 为湿润率, J 为绝缘子下、上表面的盐沉积密度之比, z 为 $ESDD/NSDD$, $NSDD$ 为非可溶性沉积物密度(non-soluble deposit density, NSDD)。通电电压以 3 kV/s的速率增加。在每个湿润率和污染水平下进行至少4次闪络试验, 间隔 3 min。

4次闪络试验的平均闪络电压应力 E_c 可表示如下:

$$E_c = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 E_i \quad (1)$$

$$E_c = U_c/L \quad (2)$$

而闪络电压应力的标准偏差($\sigma\%$)计算公式为

$$\sigma\% = \frac{1}{E_c} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (E_i - E_c)^2}{3}} \times 100 \quad (3)$$

式中: E_i 为闪络电压应力; U_c 为连续工作电压; L 为爬电距离。

1.4 污染严重程度(ESDD)计算

为了测量被测绝缘子表面污层的等效盐沉积密度(ESDD), 将污层从绝缘子表面(金属部分除外)提取出来。提取的污染物溶解在 0.5 L去离子水中。

使用电导率计HI8733, 在室温下测量溶液的电导率, 校正系数 b 计算公式如下:

$$b = 0.9 \times 10^{-5} \theta^2 - 0.8 \times 10^{-3} \theta + 0.0353 \quad (4)$$

这里取 $b=0.0228$ 。

溶液的盐度 S_a 按IEC 60507标准可由下式

表示:

$$S_a = 5.7 \times \sigma_{20}^{1.03} \quad (5)$$

根据测定的室温电导率, 20 °C时的电导率为

$$\sigma_{20} = \sigma_\theta \times [1 - b(\theta - 20)] \quad (6)$$

ESDD可表示为

$$ESDD = (S_a \times V)/A \text{ mg/cm}^2 \quad (7)$$

式中: σ_{20} , σ_θ , θ , A 分别为假设污秽层在 20 °C时的电导率(S/m)、体积电导率(θ)、溶液温度(°C)、绝缘子表面积(cm^2); S_a 为溶液的盐度(kg/m^3); V 为溶液体积(cm^3)。

当污染分布不均匀时, 绝缘子表面上、下面的ESDD平均值可满足为

$$ESDD_{av} = (ESDD_U \times S_U + ESDD_L \times S_L) / (S_U + S_L) \quad (8)$$

$$J = ESDD_L/ESDD_U \quad (9)$$

式中: $ESDD_U$, $ESDD_L$ 分别为绝缘子上、下表面的盐沉积密度; S_U , S_L 分别为绝缘子的上、下表面积。

不溶性污秽物质密度, 即非可溶性沉积物密度(NSDD)可表示为

$$NSDD = [(w_f - w_i) \times 10^3] / A \text{ mg/cm}^2 \quad (10)$$

式中: w_f , w_i 分别为有污染物滤纸的重量及干燥条件下滤纸的初始重量。

可溶性沉积物密度(ESDD)与非可溶性沉积物密度(NSDD)之比表示为

$$z = ESDD/NSDD \quad (11)$$

1.5 泄漏电流测量

本文采用绝缘子上盖与接地电极之间的分压器(104:1)测量污染串绝缘子的LC。该分压器接入电路产生低电压, 用于监控和测量设备的安全, 可以通过数据采集卡N16024E将测量的数据值降低至 ± 10 V的允许输入电压范围内。需要注意的是, 监控系统除了测量硬件单元外, 还包括软件单元。该单元用于从DAQ N16024E传输数据, 然后在LabVIEW图形界面上显示。本文采用LabVIEW软件实现了监控系统的软件界面。

2 实验结果与分析

2.1 工作状态下的泄漏电流特性

通过实验对漏电流进行了进一步分析, 即针对绝缘子LC信号的峰值、谐波分量、谐波指数等特性进行了可靠的评估, 从而对其进行识别, 根据漏电流的传导情况预测绝缘子闪络或风险情况。

图3为湿润率为 2.5 ± 0.1 rh, z 为 $1/3$ 和 J 为 $1/1$ 的不同污染水平下33 kV绝缘子A的泄漏电流 I_{LC} 时间及频率特性。

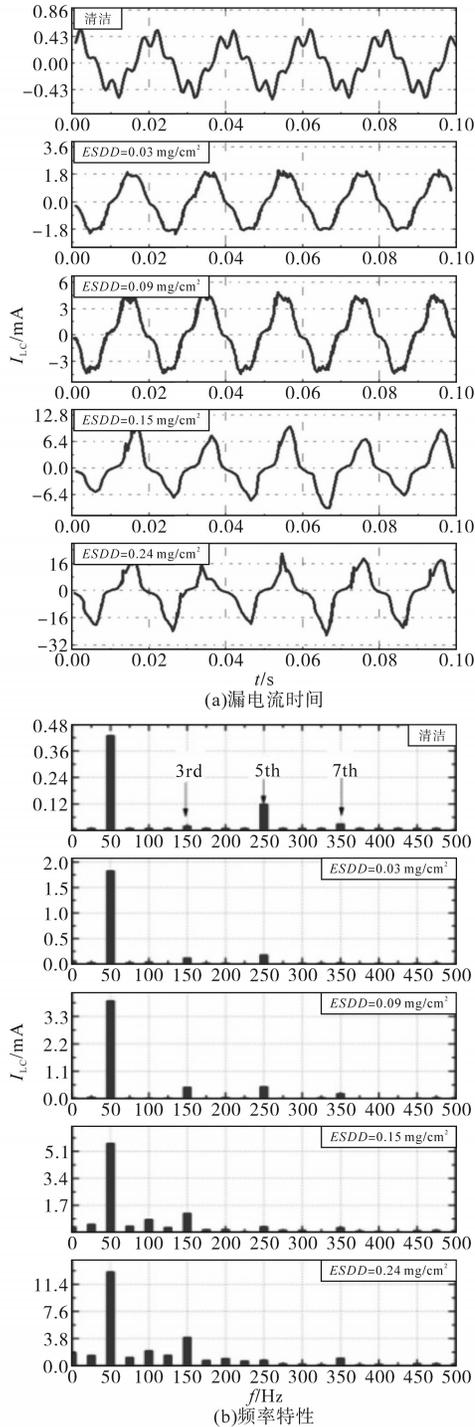


图3 不同污染水平下绝缘子A的漏电流时间和频率特性
Fig.3 Leakage current time and frequency characteristics for the insulator A under different pollution levels

由图3b可以看出,随着污染程度的增加,LC的基谐波分量的值显著增加。同时,测试绝缘子LC的3次谐波在清洁状态下低于5次谐波。另一方面,当施加雾时,可注意到第3次、5次、7次谐

波的巨大变化,增加了被污染绝缘子表面的润湿率。随着污染和湿度的增加,3次谐波将逐渐增加,直至超过5次谐波,而7次谐波值将增加,并接近第5次谐波的数量,如图4所示。与5次、7次谐波相比,部分电弧情况下的3次谐波有明显的增加,它接近基波分量的40%。

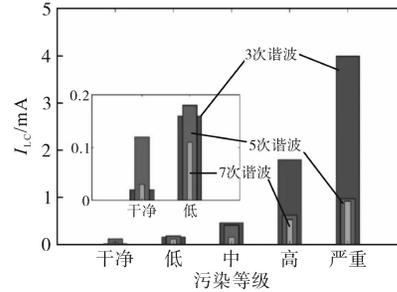


图4 不同污染程度下的泄漏电流奇次谐波
Fig.4 Leakage current odd harmonics under different contamination levels

2.2 漏电流指数 R_{hi}

基于泄漏电流的绝缘子监测主要取决于泄漏电流波形的形状。绝缘子表面污盆存在非线性阻抗。绝缘子表面的污染和润湿会提高其导电性,从而增加泄漏电流。因为这个非线性阻抗。电流的正弦波被扭曲。LC值的上升会产生干带,并导致小的放电,从而扭曲电流波形。非正弦波的泄漏电流反映了3次谐波含量的存在,3次谐波含量随着污染的增加而增加,超过了5次和7次谐波含量。

泄漏电流的奇次谐波(3次、5次、7次)的变化是评估被试绝缘子运行状况的标准,因此,提出绝缘子状态监测的判据时,仅考虑1~7次的奇次谐波分量在绝缘子上的泄漏电流,该指数 R_{hi} 可表示为

$$R_{hi} = I_3 / (I_5 + I_7) \quad (12)$$

式中: I_3, I_5, I_7 分别为泄露电流3次、5次、7次谐波分量的幅值。

漏电流谐波分量信号的一般描述为

$$I_h = I_{mh} \sin [2\pi(h \times f_f)t + \varphi_h] \quad h = 3, 5, 7 \quad (13)$$

式中: I_h 为 h 次谐波电流; I_{mh} 为谐波分量幅值; φ_h 为基波与谐波分量相位角; f_f 为50 Hz的频率系统; h 为谐波数。

因此,该指标可作为评价绝缘子风险状态的标准。

本文计算了所提出的指标和3次谐波与5次谐波比率指标,并对这两个指标进行比较。表2和图5为以A型绝缘子为样本,在ESDD变化及润湿率为 2.5 ± 0.1 rh下,与指标 R_{hi} 值进行比较。

表2 A型绝缘子的3/5比值及 R_{hi} 比较

Tab.2 3rd/5th ratios and R_{hi} comparison for insulator type A

ESDD/($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	3次 (标么值)	5次 (标么值)	7次 (标么值)	3/5	R_{hi}
0.03	0.073 2	0.12	0.03	0.61	0.55
0.09	0.043 2	0.18	0.11	0.24	0.90
0.15	0.348 5	0.41	0.15	0.85	1.57
0.24	0.334 8	0.62	0.53	0.54	2.68

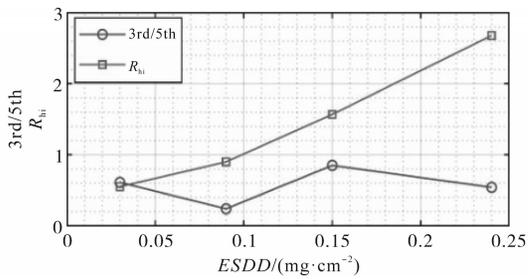


图5 A型绝缘子3/5比和 R_{hi} 对比

Fig.5 Comparison of 3rd/5th ratios and R_{hi} for insulator type A

由表2、图5可知,3/5指标没有趋于稳定,作为监测指标的准确性有所下降。而在恒定的ESDD下,所提LC指数保持相对稳定,随着ESDD的增加, R_{hi} 也随之增加,其为更可靠的绝缘子监测指标。

2.3 ESDD与LC指数的相关性

表3为不同污染等级下被测绝缘子串泄漏电流奇次谐波分量中提取的新指标的结果。这些成分被用作估算污染物,以预测受污染绝缘子串的风险情况。

表3 不同污染等级、 z 和 W_r 下的LC指数

Tab.3 LC index under different uniform pollution, z and W_r

型号	z	$W_r/(\text{h}^{-1})$	污染等级/($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)				
			0	0.03	0.06	0.15	0.24
A	1/3	2.5±0.1	0.033	0.55	0.84	1.57	2.85
		5±0.2	0.067	0.62	0.94	1.67	2.95
		7.5±0.3	0.069	0.74	0.95	1.78	3.06
	1/6	2.5±0.1	0.042	0.58	0.92	1.60	2.94
		5±0.2	0.065	0.66	0.97	1.65	2.99
		7.5±0.3	0.073	0.82	0.98	1.76	3.10
	1/9	2.5±0.1	0.062	0.62	0.95	1.64	3.01
		5±0.2	0.081	0.68	1.00	1.69	3.06
		7.5±0.3	0.094	0.84	1.01	1.80	3.17
B	1/3	2.5±0.1	0.027	0.42	0.73	1.23	2.32
		5±0.2	0.043	0.56	0.84	1.33	2.48
		7.5±0.3	0.062	0.63	0.75	1.42	2.56
	1/6	2.5±0.1	0.041	0.49	0.78	1.31	2.16
		5±0.2	0.058	0.63	0.77	1.23	2.21
		7.5±0.3	0.062	0.78	0.8	1.43	2.43
	1/9	2.5±0.1	0.051	0.58	0.72	1.23	2.52
		5±0.2	0.073	0.64	0.93	1.54	2.66
		7.5±0.3	0.081	0.82	0.95	1.47	2.73

图6为不同运行条件下LC指数 R_{hi} 与ESDD函数关系曲线图,为了建立所提指标与污染严重程度之间的相关性,利用线性最小二乘算法对实验提取的数据进行拟合。

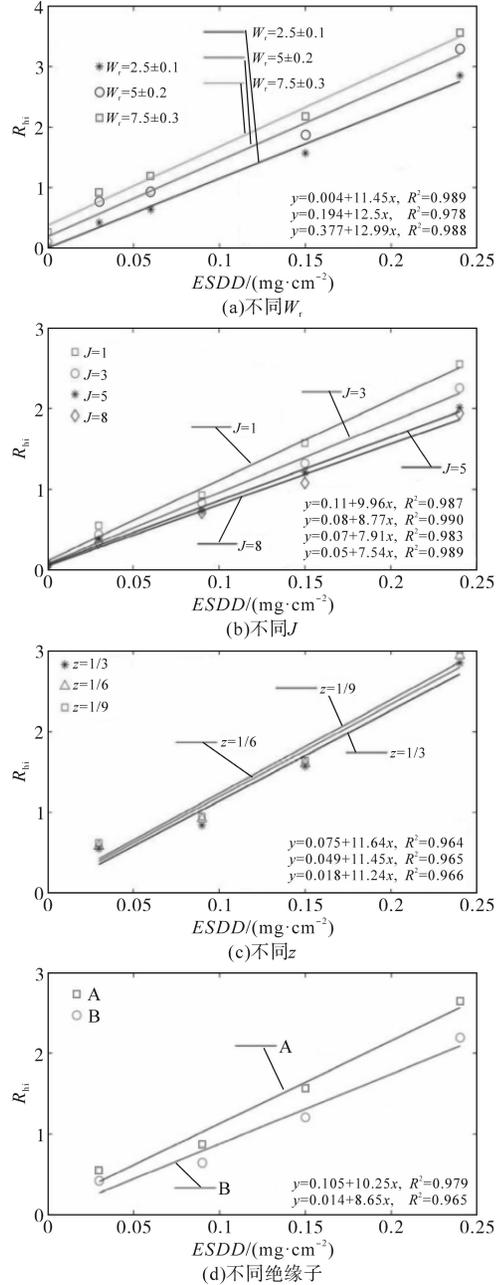


图6 不同运行条件下 R_{hi} 与ESDD函数关系

Fig.6 The R_{hi} as function with ESDD under different operation condition

图6中 y 代表 R_{hi} , x 代表ESDD, R^2 为所有直线的拟合曲线相关系数。由图6a可知,润湿速率对A型绝缘子串LC指数有中等影响。例如,在不同 W_r 值下,当 $J=5$ 时, $ESDD=0.24 \text{ mg/cm}^2$,如果润湿率由 $W_r=2.5\pm0.1 \text{ rh}$ 增加到 $5\pm0.2 \text{ th}$ 和 $7.5\pm 0.3 \text{ rh}$, R_{hi} 分别上升4.9%,10.5%,即 R_{hi} 随着 W_r 的增加而增加。因此,在污染条件下,不同的雾输入速率会

对绝缘子产生不同的润湿效应,进而产生不同的 R_{hi} 。在不均匀污染程度 J 下,LC指数 R_{hi} 与污染严重程度度的关系如图6b所示,可见,随着 J 值的增加,各污染等级的 R_{hi} 值在减少。图6c为LC指数与污染严重程度度的关系,在 z 变化的情况下,可以看出增加 $ESDD$ 对LC指数 R_{hi} 的影响较小。值得注意的是绝缘子轮廓的差异,如泄漏距离、直径等,也对绝缘子的LC指数和电性能有显著影响,如图6d所示。

3 基于LC指数的概率分布函数

为了简化对绝缘子状况的监测,文献[14]采用概率分布函数(probability distribution functions, PDFs)对绝缘子风险进行评估,因此,根据从泄漏电流中提取的指数来计算测试绝缘子闪络发生的风险和概率是非常有用的。本文采用LC指数 R_{hi} 作为污染严重程度度的指标,采用PDFs和累积分布函数进行相应的运算。PDFs将闪络发生的概率作为LC指数 R_{hi} 的函数,即将LC指数 R_{hi} 存在的概率作为该指数的函数。

3.1 LC指数存在概率

LC指数存在概率可以用一个正态分布函数来描述:

$$f(R_{hi}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\gamma-\mu}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

式中: γ 为 $\ln(R_{hi})$; μ 为同一检验下 $\ln(R_{hi})$ 值; σ 为 $\ln(R_{hi})$ 的标准差。

这些参数是根据绝缘子在低电压下的LC试验,并通过LC指标值计算出来的。

3.2 基于LC指数的闪络发生概率

利用三参数威布尔分布函数建立闪络发生的统计模型,表示为

$$P(R_{hi}) = 1 - e^{-\frac{1}{\beta} \left[\left(\frac{R_{hi}}{R_{hi0}} \right)^\alpha - 1 \right]^k} \quad (15)$$

$$R_{hi0} = R_{hi(av)} \times \left(\frac{U_0}{U_{av}} \right)^{1/\alpha} \quad (16)$$

$$R_{hi(av)} = \left(\frac{\gamma}{U_c} \right)^{1/\alpha} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{nc}{(1-nc)(\ln 2)^{1/k}} \quad (18)$$

$$c = \sigma/U_{av} \quad (19)$$

$$k = \frac{1.38}{\ln[n/(n-1)]} \quad (20)$$

$$U_0 = U_{av} - n\sigma \quad (21)$$

式中: $P(\cdot)$ 为概率函数; U_0, U_{av}, R_{hi0} 和 $R_{hi(av)}$ 分别为耐压(闪络概率为0)、平均闪络电压、闪络概率为0时的LC指标值及各污染等级下得到的LC指标值; k, α, β, γ 为常数; n 为2。

通过增加LC值,润湿率增加,闪络发生概率的比值增大。当LC指数等于1时,A绝缘子串的闪络发生概率增加了12%, W_r 从 2.5 ± 0.1 rh增加至 5 ± 0.2 rh;当LC指数为1.5时,闪络发生概率随 W_r 的增加而增加了18%。A绝缘子串的闪络发生概率随 J 值的升高而减小,增大 $NSDD$ 量对闪络发生概率的影响如图7所示。与其他研究条件(J 和 W_r)相比,可以观察到与 z 值对应的弱效应。总体而言,闪络发生概率随 z 值的增大而减小。

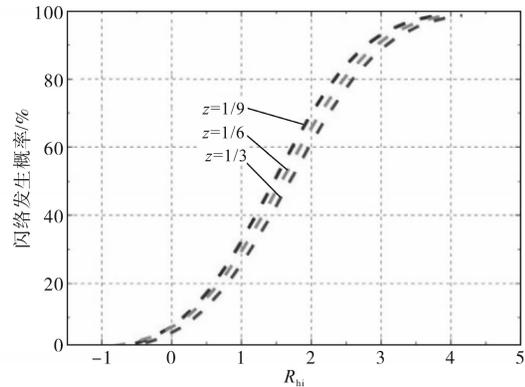


图7 z对A绝缘子串的LC指数闪络发生概率

Fig.7 Probability of flashover occurrence in terms of LC index for insulator string A in z

3.3 绝缘子的风险计算

如前所述,绝缘子风险的定义是将作为污染程度指标的LC指数读数与闪络发生的概率相乘,所产生的曲线的积分即为使用绝缘子的风险值,如下式所示:

$$S = \int_{R_{hi0}}^{R_{hi(FO)}} f(R_{hi}) \times P(R_{hi}) dR_{hi} \quad (22)$$

式中: S 为绝缘体风险值; $R_{hi(FO)}$ 为漏电流指数区间最大值。

图8为均污绝缘子串在 $W_r=2.5 \pm 0.1$ rh, $z=1/3$ 的风险的计算,其中,实线为A型绝缘子串,虚线为B型绝缘子串。从图8可以看出,使用A绝缘子(直径较细,长度较短)串的风险要大于B型绝缘子(直径较粗,长度较长)串。也就是说,爬电距离长、直径粗的绝缘子比爬电距离短、直径小的绝缘子风险小。A绝缘子的风险值为0.12(标么值),B绝缘子的风险值为0.17(标么值)。为了使用新的LC指数评估污染对闪络发生风险的影响。

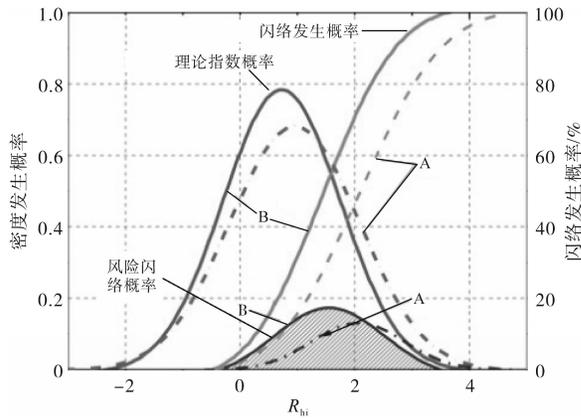


图8 绝缘子串利用风险计算

Fig.8 Calculation of insulator strings utilization risk

图9为相同LC指数下绝缘子几何结构对风险抵御的影响。

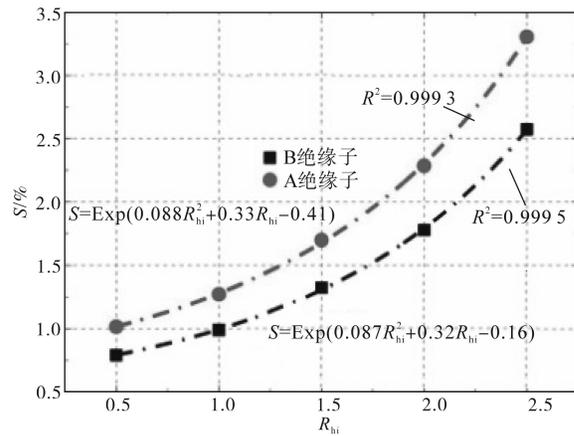


图9 不同绝缘子类型下A型绝缘子串利用风险对LC指数的函数关系

Fig.9 Risk of insulator string type A utilization as a function of LC index in different of insulator type

由图9可以看出,A型绝缘子串比B型绝缘子串的风险更大。因此,假设绝缘子风险与LC指数的相关性为正指数。

在特定的LC指标值下,用指数函数对绝缘子风险数据百分比进行拟合,得到的最佳风险点为

$$S = e^{(aR_{hi}^2 + bR_{hi} + c)} \quad (23)$$

式中: a, b, c 为正幂指数函数的常数。

这些常数值如图9所示。

由图9可以看出,所有直线的拟合曲线相关系数 R^2 均大于0.97。这表明式(23)中的幂函数非常适合用两种被试绝缘子在工作条件下的LC指数 R_{hi} 来评估绝缘子的风险。

4 结论

本文对两种不同形状的玻璃绝缘体的风险

进行了研究。针对污染程度的变化、污染的分布、ESDD与NSDD的比值以及润湿率进行了研究。基于此,本文采用了一种从漏电流频域推导出来新型LC指数,所提指数可作为预测绝缘子污染程度的有效工具。

研究结论如下:

1)研究发现绝缘子闪络电压与LC指数呈负斜率关系,也就是说,通过增大 J 值、减小 z 值、增大 W_r 值来影响闪络电压的减小。在此基础上,本文提出了用概率分布函数和累积分布函数来估计绝缘子风险的方法。

2)以指数函数的形式估计了LC指数与绝缘子风险之间的相关性。随着LC指数的增加,绝缘子风险为正,并通过增大 J 值、减小 z 值和增大 W_r 值对绝缘子风险产生正向影响。

3)LC指数(R)与绝缘子风险(S)之间的相关性在评估绝缘子风险百分比值方面具有较高的准确性。

所提方法是一种不需要直接测量就能估计绝缘子污染程度的可行方法。

参考文献

- [1] LIU Y, KONG X. Numerical investigation on collision of pollution particles on outdoor insulators[J]. IEEE Access, 2019, 7: 56974-56985.
- [2] LI Z, YANG Z. Surface charge transport characteristics of ZnO/silicone rubber composites under impulse superimposed on DC voltage[J]. IEEE Access, 2019, 7: 3008-3017.
- [3] RAMESH M. Electrical power and energy systems impact of superficial and internal defects on electric field of composite insulators[J]. Int. J. Electr. Power Energy Syst., 2019, 106(6): 327-334.
- [4] 律方成,秦春旭,郭文义,等. 高海拔地区±800 kV特高压直流输电系统绝缘子带电自然积污特性[J]. 电气传动, 2018, 39(3): 513-519.
LÜ Fangcheng, QIN Chunxu, GUO Wenyi, et al. Characteristics of natural contamination of insulators on line in ±800 kV UHV DC transmission system in high altitude area[J]. Electrical Drive, 2018, 39(3): 513-519.
- [5] DOUAR M. Degradation of various polymeric materials in clean and salt fog conditions: measurements of AC flashover voltage and assessment of surface damages[J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2019, 22(1): 391-399.
- [6] 高海峰,樊灵孟,李庆峰,等. ±500 kV高肇直流线路绝缘子积污特性对比分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 672-676.
GAO Haifeng, FAN Lingmeng, LI Qingfeng, et al. Comparative analysis of pollution accumulation characteristics of ±500kV