

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.03.013

考虑多因素的棒形悬式复合绝缘子老化评估研究

胡 雯¹, 赵 淳²

(1. 湖北经济学院信息工程学院, 武汉 430205; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 综合考虑复合绝缘子在运行中表现出来的各种老化特性,客观评估其老化程度是保障复合绝缘子安全运行的关键。为此,提出一种复合绝缘子的老化评估模型,将复合绝缘子试品的外观检查试验、憎水性试验、红外测温试验结果作为评估模型的输入参数,对复合绝缘子试品进行老化评估,发现2号复合绝缘子老化程度最重,建议退出运行;1号复合绝缘子老化程度最轻;而3号复合绝缘子老化程度一般,需要跟踪监测。最后通过扫描电镜试验和傅里叶红外光谱试验,验证了评估结果的正确性,说明文中提出的评估模型对于复合绝缘子的老化评估具有一定的意义。

关键词: 复合绝缘子; 多因素; 扫描电镜; FITR; 老化评估

Research on Aging Assessment of Composite Rod Insulators Considers Multiple Indexes

HU Wen¹, ZHAO Chun²

(1. College of Information Engineering, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China;
2. Wuhan NARI Limited Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Effectively considering the aging properties of composite insulator in service and assessing the aging of the composite insulator objectively are crucial to ensure the system to work well. An aging assessment model of the composite insulator is advanced. The results of visual examination, hydrophobicity tests and infrared thermal imaging tests of composite insulators were used as the input parameters to assess the aging of the composite insulators. The No.2 insulator was suggested to quit because of its worst aging condition, the No.3 need to be tracked and monitored, and the No.1 had a best aging condition. The assessment result was verified by the SEM test and FITR test, the aging assessment model has guiding significance for the composite insulators.

Key words: composite insulator; multiple indexes; SEM; FITR; aging assessment

0 引言

复合绝缘子以其重量轻、耐污闪性能好、维护方便等优点,在输电线路中得到广泛应用,并取得很好的效果。尤其在污秽地区和直流线路上运行的绝大部分复合绝缘子都表现出优良的性能^[1-4]。截止到2014年,中国110 kV及以上输电线路挂网运行的复合绝缘子数量早已超过500万支^[5]。复合绝缘子伞裙材料及护套采用的是有机材料硅橡胶,其老化速度明显快于瓷等无机材料^[6]。具体表现为运行过程中护套、伞裙材料在湿度、紫外线、温度、表面放电等综合因素作用下发生憎水性弱化、烧蚀、表面分化及机械强度降低等变化^[7-8]。随着使用量和运行年限

的增加,复合绝缘子因老化而造成的事故逐渐增多^[9-10]。因此,正确客观的评估复合绝缘子的老化程度,对保证电网安全运行具有重要意义。

文中首先提出一种复合绝缘子老化评估模型,以行业标准和国内外相关研究为基础,详细阐述了模型的建立过程;用复合绝缘子试品的试验结果为输入参数,对复合绝缘子进行了老化评估,并用扫描电镜试验(SEM)和傅里叶红外光谱试验(FITR)对评估结果进行了验证。

1 老化评估模型的建立

1.1 评估模型建立

老化评估模型见图1。

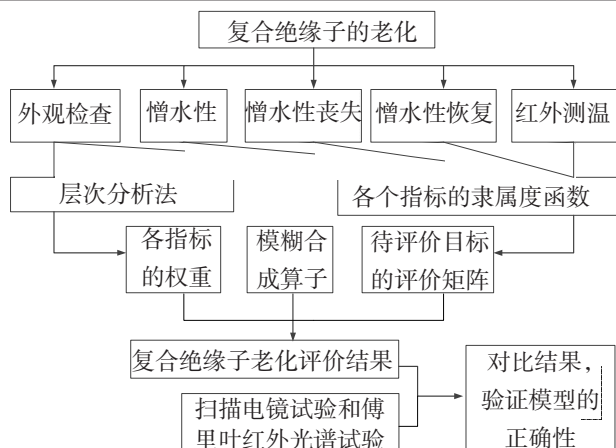


图1 老化评估模型

Fig. 1 The model of aging assessment

1.2 评估指标的确定

复合绝缘子在老化过程中,外观上会有明显的变化。外观检查是检测复合绝缘子老化非常直接和有效的手段。因此将外观检测作为评估复合绝缘子运行状态和老化程度的指标之一。根据DL/T 864—2004中的规定,外观检查方面主要关注:伞裙表面变色程度;伞裙柔韧性和完整性;金具、护套、芯棒等完整性和锈蚀程度;伞裙表面电蚀损的程度。外观检测指标见表1。

表1 外观检测指标

Table 1 The indexes of visual examination

评估等级	外观检查情况
优秀	伞裙表面呈硅橡胶红色,伞裙柔软,无破损;金具和护套外形完好,无锈蚀,色泽明亮。
合格	伞裙表面局部呈黑色污斑,伞裙比较柔软,有少量裂纹;金具和护套外形比较完好,有轻微锈蚀,色泽变暗。
注意	伞裙表面有明显黑色污斑,电弧烧痕面积较多,有明显破损,柔软性较差;金具和护套外形有变形,锈蚀比较严重,有明显变暗痕迹。
严重	伞裙表面大面积呈现黑色污斑,电弧烧蚀明显,破损较多而且明显,基本没有柔软性;金具和护套外形残缺,锈蚀严重,无光泽。

国内研究表明,老化程度不同的复合绝缘子其憎水性有明显不同。硅橡胶材料憎水性丧失后可以在一定条件下获得恢复,既硅橡胶材料具有优异的憎水性恢复和迁移特性,这是硅橡胶材料用作高压复合绝缘子伞套材料的关键因素^[8-14]。憎水性是硅橡胶绝缘子最重要的特征^[15]。因此将憎水性作为复合绝缘子老化评估的指标。同样根据DL/T 864—2004^[16]中的规定,憎水性、憎水性丧失和憎水性恢复指标见表2。

DL/T 664—2008中规定,复合绝缘子在运行中

出现异常发热时,可以判定该绝缘子出现故障,如伞裙破损、芯棒受潮、球头部位松脱进水等。因此,将复合绝缘子在运行中的温升作为其老化评估的指标,见表3。

表2 憎水性指标

Table 2 The indexes of hydrophobicity test

评估等级	表面憎水性	憎水性丧失后憎水性等级	憎水性恢复后憎水值
优秀	HC1-HC2	HC1-HC3	HC1-HC2
合格	HC3-HC4	HC3-HC4	HC2-HC3
注意	HC5	HC4-HC5	HC4-HC5
严重	HC6	HC5-HC6	HC5-HC6

表3 红外测温指标

Table 3 The indexes of infrared thermal imaging method

评估等级	温升/K
优秀	0.0~0.5
合格	0.5~3.0
注意	3~4
严重	大于4

1.3 隶属度函数确定

以憎水性指标为例,DL/T 864—2004对于憎水性的规定:憎水性在HC1-HC2时,认为复合绝缘子基本未老化,可继续运行,抽检时间也比较长;憎水性在HC3-HC4时,认为复合绝缘子的老化程度需要注意,可继续运行,但缩短了抽检时间;憎水性在HC5时,抽检时间变为1年,且必须跟踪监测;憎水性在HC6时,认为复合绝缘子老化程度严重,需要退出运行^[19]。基于此,将复合绝缘子憎水性的论域^[16]进行划分,规定复合绝缘子憎水性值为1.5、3.5、5、6时,憎水性表现依次为“优秀”、“合格”、“注意”、“严重”,对数据进行归一化后,即 $\mu_1(0.9)=1$, $\mu_2(0.5)=\mu_3(0.2)=\mu_4(0)=1$ 隶属度函数见表4。同理可得,外观检查指标、红外测温指标、憎水性丧失指标和憎水性恢复指标的隶属度函数见表4、5。

1.4 指标权重的确定

采用层次分析法,确定外观检查指标 t_1 、憎水性指标 t_2 、憎水性丧失指标 t_3 、憎水性恢复指标 t_4 和红外测温指标 t_5 的判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 & 5 & 1/6 \\ 3 & 1 & 5 & 7 & 1/5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 3 & 1/7 \\ 1/5 & 1/7 & 1/3 & 1 & 1/9 \\ 6 & 5 & 7 & 9 & 1 \end{bmatrix}$$

根据判断矩阵得到5个指标的权重为

表4 憎水性指标和红外测温指标隶属度函数

Table 4 The membership function of hydrophobicity test and infrared thermal imaging method

等级	憎水性指标	红外测温指标
优秀	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0.9 \\ \frac{x-0.5}{0.9-0.5} & 0.5 \leq x < 0.9 \\ 0 & 0.5 \geq x \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.5625 \\ \frac{x-0.5625}{0.9375-0.5625} & 0.5625 \leq x < 0.9375 \\ 1 & 0.9375 \leq x \end{cases}$
合格	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-0.2}{0.5-0.2} & 0.2 \leq x < 0.5 \\ \frac{0.9-x}{0.9-0.5} & 0.5 \leq x < 0.9 \\ 0 & x \leq 0.2, x \geq 0.9 \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-0.125}{0.5625-0.125} & 0.125 \leq x < 0.5625 \\ x \frac{0.9375-x}{0.9375-0.5625} & 0.5625 \leq x < 0.9375 \\ 0 & x \leq 0.125, x \geq 0.9375 \end{cases}$
注意	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-0}{0.2-0} & 0 \leq x < 0.2 \\ \frac{0.5-x}{0.5-0.2} & 0.2 \leq x < 0.5 \\ 0 & x \leq 0, x \geq 0.5 \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x}{0.125} & 0 \leq x < 0.125 \\ \frac{0.5625-x}{0.5625-0.125} & 0.125 \leq x < 0.5625 \\ 0 & x \leq 0, x \geq 0.5625 \end{cases}$
严重	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0 \\ \frac{0.2-x}{0.2-0} & 0 \leq x < 0.2 \\ 0 & 0.2 \leq x \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0 \\ \frac{0.125-x}{0.125} & 0 \leq x < 0.125 \\ 0 & 0.125 \leq x \end{cases}$

表5 其他指标隶属度函数

Table 5 The membership function of the other indexes

等级	外观表现指标	憎水性恢复指标	憎水性丧失指标
优秀	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0.8 \\ \frac{x-0.6}{0.8-0.6} & 0.6 \leq x < 0.8 \\ 0 & 0.6 \geq x \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.7 \\ \frac{x-0.7}{0.9-0.7} & 0.7 \leq x < 0.9 \\ 1 & 0.9 \leq x \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0.8 \\ \frac{x-0.5}{0.8-0.5} & 0.5 \leq x < 0.8 \\ 0 & 0.5 \geq x \end{cases}$
合格	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-0.4}{0.6-0.4} & 0.4 \leq x < 0.6 \\ \frac{0.8-x}{0.8-0.6} & 0.6 \leq x < 0.8 \\ 0 & x \leq 0.4, x \geq 0.8 \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-0.4}{0.7-0.4} & 0.4 \leq x < 0.7 \\ \frac{0.9-x}{0.9-0.7} & 0.7 \leq x < 0.9 \\ 0 & x \leq 0.4, x \geq 0.9 \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-0.3}{0.5-0.3} & 0.3 \leq x < 0.5 \\ \frac{0.8-x}{0.8-0.5} & 0.5 \leq x < 0.8 \\ 0 & x \leq 0.3, x \geq 0.8 \end{cases}$
注意	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-0.2}{0.4-0.2} & 0.2 \leq x < 0.4 \\ \frac{0.6-x}{0.6-0.4} & 0.4 \leq x < 0.6 \\ 0 & x \leq 0.2, x \geq 0.6 \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-0.1}{0.4-0.1} & 0.1 \leq x < 0.4 \\ \frac{0.7-x}{0.7-0.4} & 0.4 \leq x < 0.7 \\ 0 & x \leq 0.1, x \geq 0.7 \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-0.1}{0.3-0.1} & 0.1 \leq x < 0.3 \\ \frac{0.5-x}{0.5-0.3} & 0.3 \leq x < 0.5 \\ 0 & x \leq 0.3, x \geq 0.5 \end{cases}$
严重	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.2 \\ \frac{0.4-x}{0.4-0.2} & 0.2 \leq x < 0.4 \\ 0 & 0.4 \leq x \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.1 \\ \frac{0.4-x}{0.4-0.1} & 0.1 \leq x < 0.4 \\ 0 & 0.4 \leq x \end{cases}$	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.1 \\ \frac{0.3-x}{0.3-0.1} & 0.1 \leq x < 0.3 \\ 0 & 0.3 \leq x \end{cases}$

$$W = (0.115\ 2, 0.222\ 8, 0.059\ 2, 0.031\ 5, 0.571\ 3)$$

考虑试验结果,通过变权公式

$$w_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = w_i^0 x_i^{\alpha-1} / \sum_{k=1}^m w_k^0 x_k^{\alpha-1} \quad (1)$$

式(1)中: x_i 为第*i*个评价因素的值; m 为评价因素的个数; w_i 为第*i*种因素的权重; w_i^0 为第*i*种因素的常权重。计算各指标的变权为:

$$W_1 = (0.142\ 2, 0.224\ 3, 0.113\ 4, 0.060\ 4, 0.460\ 3) \quad (2)$$

$$W_2 = (0.275\ 9, 0.533\ 7, 0.141\ 8, 0.048\ 6, 0) \quad (3)$$

$$W_3 = (0.108\ 9, 0.210\ 6, 0.121\ 9, 0.064\ 8, 0.493\ 8) \quad (4)$$

2 老化评估模型的应用

1号复合绝缘子,其外观表现评分为0.3,憎水性测量的值为HC3-HC4,憎水性丧失后的憎水性为

HC5-HC6,憎水性恢复24 h后的憎水性为HC5-HC6,红外测温温升为0~1 K。该绝缘子的5个指标的评分分别为:[0.3,0.5,0.1,0.1,0.875],隶属度函数中,得到1号的评价矩阵为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.83 & 0.17 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

模糊算子采用加权平均型,即

$$s_k = \min \left\{ 1, \sum_{j=1}^m \min(\mu_j r_{jk}) \right\} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

得到1号绝缘子的老化评估结果为

$$S_1 = W_1 \circ R_1 = (0.382, 0.302\ 6, 0.071\ 1, 0.244\ 9) \quad (7)$$

同理,2号复合绝缘子,其外观表现评分为0.1,憎水性测量的值为HC5-HC6,憎水性丧失后的憎水

性为HC5~HC6,憎水性恢复24 h后的憎水性为HC4~HC5,红外测温温升为9 K。该绝缘子的5个指标的评分分别为:[0.1,0.1,0.1,0.3,0]。2号复合绝缘子的老化综合评价结果为

$$S_2 = W_2 \circ R_2 = (0, 0, 0.299\ 4, 0.700\ 6) \quad (8)$$

3号复合绝缘子,其外观表现评分为0.7,憎水性测量的值为HC2~HC3,憎水性丧失后的憎水性为HC5~HC6,憎水性恢复24 h后的憎水性为HC5~HC6,红外测温温升为0~1 K。该绝缘子的5个指标的评分分别为:[0.7,0.7,0.1,0.1,0.875]。3号复合绝缘子的老化综合评价结果为

$$S_3 = W_3 \circ R_3 = (0.569\ 6, 0.243\ 7, 0, 0.186\ 7) \quad (9)$$

根据评估结果,把绝缘子老化状态中的“优秀”、“合格”、“注意”、“严重”分别赋值为4、3、2、1。采用

$$v^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(v_i) \cdot B_i^k}{\sum_{i=1}^n B_i^k}$$

加权平均原则,根据 可得,最终的评价结果为:

$$v_1^* = \frac{4 \times 0.382 + 3 \times 0.302\ 6 + 2 \times 0.071\ 1 + 1 \times 0.244\ 9}{0.382 + 0.302\ 6 + 0.071\ 1 + 0.244\ 9} = 2.822\ 9 \quad (10)$$

$$v_2^* = \frac{4 \times 0 + 3 \times 0 + 2 \times 0.299\ 4 + 1 \times 0.700\ 6}{0 + 0 + 0.299\ 4 + 0.700\ 6} = 1.299\ 4 \quad (11)$$

$$v_3^* = \frac{4 \times 0.569\ 6 + 3 \times 0.243\ 7 + 2 \times 0 + 1 \times 0.186\ 7}{0.569\ 6 + 0.243\ 7 + 0 + 0.186\ 7} = 3.196\ 2 \quad (12)$$

最终对1、2、3号的评估结果分别为2.822 9、1.299 4和3.196 2。其外观见图2。

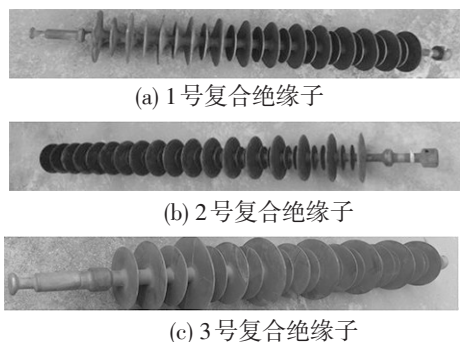


图2 绝缘子试品外观图

Fig. 2 The appearance of insulators

图2说明:

1)3号复合绝缘子老化程度最轻,其运行状态处于优秀等级,正在向合格等级发展;

2)2号复合绝缘子老化程度最重,其运行状态处

于注意等级,并且马上要达到严重等级,可以建议该绝缘子退出运行;

3)1号复合绝缘子老化程度一般,运行状态为合格等级,并逐渐向注意等级发展,需要跟踪检测。

3 老化评估模型的验证

3.1 扫描电镜试验

通过对比1、2、3号复合绝缘子伞裙的扫描电镜试验结果,判断其老化程度,并与老化评估模型的评估结果作出对比,验证老化评估模型的有效性。

分别从1、2、3号复合绝缘子的高压端、中部、低压端取伞裙试样,共9个试样,进行扫描电镜试验,见图3。

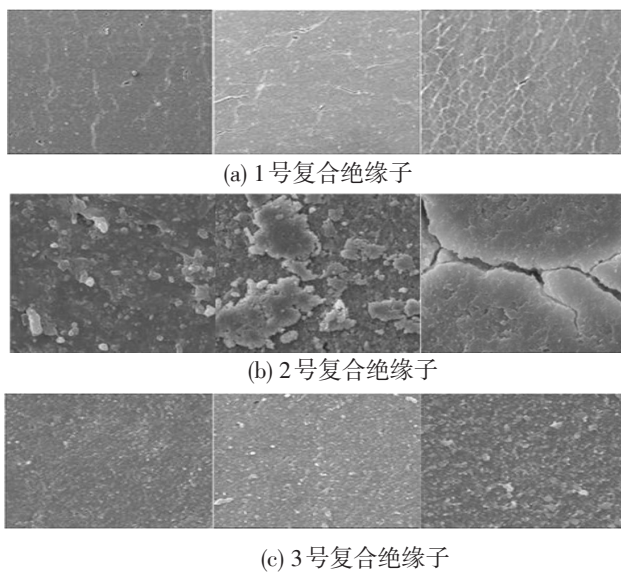


图3 复合绝缘子扫描电镜试验结果

Fig. 3 The SEM test of insulators

1、2、3号复合绝缘子高压端、中部、低压端伞裙扫描电镜试验结果如所示。通过对比图片,可以发现,2号复合绝缘子扫描电镜图片上,高压端的伞裙上面裂纹明显,材质粗糙,布满很多凸起物以及孔洞,中部和低压端的伞裙基本无裂纹,但是致密性不好,有很多凹凸不平的地方,可以认为2号复合绝缘子老化最为严重;1号复合绝缘子整体而言致密性较好,高压端部分裂纹比较密集,但都比较细小;3号复合绝缘子所有部位的伞裙都观察不到裂纹,致密性非常好,只有表面有凹凸不平的现象。所以,从扫描电镜的结果上来说,试品的老化程度从严重到轻微的排序为:2、1、3号。这与老化综合评估模型的评估结果具有很好的一致性,从侧面验证了该综合评估模型具有一定的可信度和有效性。

3.2 傅里叶红外光谱试验

对1、2、3号复合绝缘子进行了傅里叶红外光谱

试验^[20]。并采用光谱特征峰的高度作为衡量该基团变化的参量,见图4。

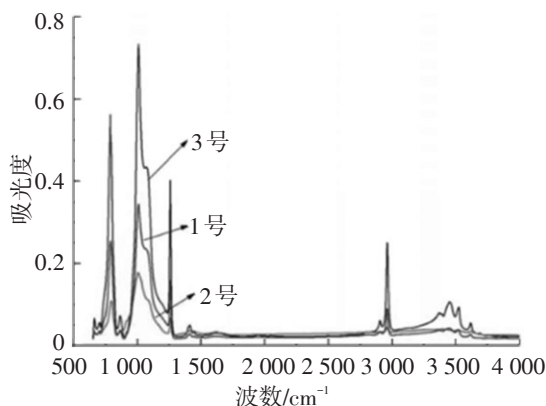


图4 复合绝缘子傅里叶红外光谱试验结果

Fig. 4 The FTIR test of insulators

从图4中可以看出,复合绝缘子伞裙中,处于 $1\,000\sim 1\,100\text{ cm}^{-1}$ 段的波峰、处于 800 cm^{-1} 段的波峰以及处于 $1\,260\text{ cm}^{-1}$ 处的波峰最为明显。查询特征图谱可以得知,这3处波峰分别对应的是主链Si-O-Si官能团和侧链Si-CH₃官能团。

可以看到,这3处波峰都呈现从3-1-2号逐渐减弱的趋势。这说明,3号中的主链和侧链的吸收峰最强,分子结构最为完整;2号中的主链和侧链的吸收峰最弱,分子结构遭到了很大的破坏和削弱。从宏观上,可以认为3号复合绝缘子基本未老化,材质性能良好;1号复合绝缘子次之;2号复合绝缘子老化严重,材质性能遭到严重破坏。这与复合绝缘子老化评估模型的评估结果也是对应的,从而再次证明该评估模型的正确性和有效性。

4 结论

1)提出了一种复合绝缘子老化评估模型。综合考虑复合绝缘子外观、憎水性以及红外测温表现,客观评估复合绝缘子的老化程度。

2)运用扫描电镜试验和傅立叶红外光谱试验,验证了老化评估模型的正确性。

参考文献:

- [1] 屠幼萍,陈聪慧,佟宇梁,等.现场运行复合绝缘子伞裙材料的老化判断方法[J]. 高电压技术,2012,38(10): 2522-2526.
TU Youping, CHEN Conghui, TONG Yuliang, et al. Aging characteristics of shed materials of silicone rubber composite insulators in service[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2522-2526.
- [2] 赵林杰. 硅橡胶复合绝缘子憎水性与污闪特性研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.
ZHAO Linjie. Study on the hydrophobicity and pollution flashover properties of silicone rubber composite insulators[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [3] 梁英. 高温硫化硅橡胶电晕老化特性及机理的研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.
LIANG Ying. Study on the aging characteristics of the high temperature vulcanization silicone rubber [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [4] 李敏. 硅橡胶材料臭氧老化的研究[D]. 北京:华北电力大学,2009.
LI Ming. Study on ozone aging of silicone rubber materials[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [5] 徐其迎,李日隆. 复合绝缘子的运行性能及问题探讨[J]. 电瓷避雷器,2003(3):14-19.
XU Qiying, LI Rilong. Analysis and discussion on composite insulator in service[J]. Insulators and Surge Arresters, 2003(3): 14-19.
- [6] 王秋莎,律方成,刘云鹏,等.电晕对室温硫化硅橡胶憎水性的影响研究[J]. 华北电力大学学报,2010,37(4):15-17.
WANG Qiusha, LYU Fangcheng, LIU Yunpeng, et al. Study on the influence of corona on the hydrophobicity of RTV silicon rubber[J]. Journal of North China Electric Power University, 2010, 37(4): 15-17.
- [7] 白欢,胡建林,李剑,等.应用动态接触角评判复合绝缘子憎水性等级的研究[J]. 高电压技术,2010,36(12):3021-3026.
BAI Huan, HU Jianlin, LI Jian, et al. Hydrophobicity evaluation of composite insulators using the dynamic contact angle[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3021-3026.
- [8] 吴光亚,蔡炜,肖国英,等. 复合绝缘子的运行特性及可靠性分析[J]. 电瓷避雷器,2004(1):3-9.
WU Guangya, CAI Wei, XIAO Guoying, et al. Service behavior and reliability analysis of composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2004(1): 3-9.
- [9] 张锐,吴光亚,袁田,等. 我国复合绝缘子关键制造技术的发展与展望[J]. 高电压技术,2007,33(1):106-110.
ZHANG Rui, WU Guangya, YUAN Tian, et al. Development history and direction of composite insulators on important manufacture technique[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 106-110.
- [10] 刘洪泽. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景[J]. 电网技术,2006,30(12):1-7.
LIU Zehong. Present situation and prospect of applying composite insulators to UHF transmission lines in China[J]. (下转第103页)

- JIANG Xun, WANG Zhongyi. Calculation and analysis for the electric field of composite high voltage bushing [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 17-21.
- [11] 冯 勇, 彭宗仁, 刘 鹏, 等. 特高压交流输电线路瓷绝缘子的均压特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 270-271.
- FENG Yong, PENG Zongren, LIU Peng. et al. voltage-sharing characteristics of porcelain insulators for UHV AC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 270-271.
- [12] 安翠翠, 刘 航, 王 琼, 等. 特高压直流母线 MOA 的电位与电场分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 9-11.
- AN Cuicui, LIU Hang, WANG Qiong, et al. Calculation of electric potential and field distribution of UHVDC busbar MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 9-11.
- [13] 吴光亚, 王铁街. 劣化绝缘子对长串绝缘子电位分布的影响[J]. 高电压技术, 1997, 23(4): 59-60.
- WU Yaguang, WANG Tiejie. The effect of aging insulators on voltage distribution of insulator string[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(4): 59-60.
- [14] 孙西昌, 罗 兵, 陈子岩. 800 kV 直流系统用棒形支柱瓷芯复合绝缘子电场分布计算及均压环配置优化[J]. 电瓷避雷器, 2009(1): 1-6.
- SUN Xichang, LUO Bing, CHEN Ziyang. Electric field distribution calculation and grading ring optimization of rod ceramic core post insulator for 800 kV DC system[J]. Insulators and Surge Arrester, 2009(1): 1-6.
- [15] 郭 洁, 刘良璧, 朱 跃. 雷电冲击下氧化物避雷器动作研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 18-20.
- GUO Jie, LIU Liangbi, ZHU Yue. Operating duty of metal oxide surge arresters at lightning surge[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 18-20.
- [16] 丁美新, 李慧峰, 朱子述. 雷电流波形的数学模型及频谱仿真[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 8-10.
- DING Meixin, LI Huifeng, ZHU Zishu. The mathematical model and frequency spectrum simulation of lightning current[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 8-10.
- [17] 吴 波. 高铁牵引变电所雷电过电压保护方案研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(6): 6-9.
- WU Bo. Research on the protection project of lightning overvoltage for the high-speed rail traction substation[J]. Insulators and Surge Arrester, 2013(6): 6-9.
- [18] 汪 里, 岳灵平, 方书博, 等. 500 kV 直流线路棒形悬式瓷绝缘子闭式卡具设计[J]. 电瓷避雷器, 2013(6): 25-28.
- WANG Li, YUE Lingping, FANG Shubo, et al. Design of enclosed clamp for long rod suspension ceramic insulator in 500 kV DC transmission line[J]. Insulators and Surge Arrester, 2013(6): 25-28.
- [19] 王黎明, 侯志刚, 梅红伟. 500 kV 港城变电站绝缘子均压环放电现象研究[J]. 高压电器, 2012, 07: 30-36.
- WANG Liming, HOU Zhigang, MEI Hongwei. Study on discharge of grading rings for insulators in the 500 kV Gangcheng Substation[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 07: 30-36.
- [20] 洪国耀, 赵羲英, 陈 冰. 小型化 SF₆ 气体绝缘金属封闭开关设备的研究开发[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 78-82.
- HONG Guoyao, ZHAO Xiyang, CHEN Bing. Research and development of the optimized & miniaturization GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 78-82.

赵新科(1985—), 男, 工程师, 主要研究方向高压避雷器开发工作。

(上接第 97 页)

- Power System Technology, 2006, 30(12): 1-7.
- [11] 孙西昌, 党镇平, 丁京玲, 等. 特高压交流棒形悬式复合绝缘子的研究[J]. 电瓷避雷器, 2006, 30(12): 1-7.
- SUN Xichang, DANG Zhenping, DING Jingling. et al. Study on UHV AC composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2006, 30(12): 1-7.
- [12] 张 锐, 吴光亚, 周国华. 棒形悬式复合绝缘子在变电站的应用及前景[J]. 电瓷避雷器, 2006(3): 23-27.
- ZHANG Rui, WU Guangya, ZHOU Guohua. The application and prospect of composite insulator used in substation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2006(3): 23-27.
- [13] 丁京玲. 棒形悬式复合绝缘子金属附件连接区域机械性能的研究[J]. 电瓷避雷器, 2006, (1): 7-11.
- DING Jingling. Study on mechanical property of connection zone of metal fitting for composite insulator rod[J]. Insulators and Surge Arresters, 2006, (1): 7-11.
- [14] 张 锐. 复合绝缘子用硅橡胶材料的配方设计与老化性能评估[J]. 电瓷避雷器, 2012(6): 39-45.
- ZHANG Rui. The ingredient design and aging performance evaluation for silicone rubber of composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(6): 39-45.
- [15] 吴经锋, 邱毓昌, 张建荣, 等. 运行中复合绝缘子质量的分析[J]. 电瓷避雷器, 2001(3): 19-22.
- WU Jingfeng, QIU Yuchang, ZHANG Jianrong, et al. Quality evaluation for composite insulators in operation [J]. Insulators and Surge Arresters, 2001(3): 19-22.
- [16] 标称电压高于 1 000 V 交流架空线路用复合绝缘子使用导则: DL/T 864—2004[S]. 2004.
- Application guide of composite insulators for AC overhead lines with a nominal voltage over 1 000 V: DL/T 864—2004[S]. 2004.
- 胡 雯(1987—), 女, 博士, 讲师, 从事电力物联网、输电智能运维等方面的研究工作。
- 赵 淳(1985—), 男, 博士, 高工, 从事电网防灾减灾、输电智能运维等方面的研究工作。