

# 复合绝缘子的人工加速老化试验

殷禹<sup>1</sup>, 梁曦东<sup>2</sup>, 李庆锋<sup>1</sup>, 宿志一<sup>1</sup>, 范建斌<sup>1</sup>, 史梓男<sup>3</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京市海淀区 100085; 2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京市海淀区 100084; 3. 北京电力设计院, 北京市 宣武区 100055)

## Artificial Accelerated Ageing Test of Composite Insulators

YIN Yu<sup>1</sup>, LIANG Xi-dong<sup>2</sup>, LI Qing-feng<sup>1</sup>, SU Zhi-yi<sup>1</sup>, FAN Jian-bin<sup>1</sup>, SHI Zi-nan<sup>3</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China; 3. Beijing Electric Power Design Institute, Xuanwu District, Beijing 100055, China)

**ABSTRACT:** The features of several existing ageing test method for composite insulators abroad are presented. The ageing phenomena of domestic composite insulators put into field operation is analyzed, on this basis for the purpose of simulating the ageing mode of composite insulators made of silicon rubber, which are put into field operation, corresponding testing equipments are designed and built with which a variety of artificial accelerated ageing tests are performed, and the feasibility and reasonableness of different test methods are compared. Comparison results show that existing ageing test methods have their own superiorities and properties, and it is to be further researched for the ageing method suitable to the icing conditions in China.

**KEY WORDS:** composite insulator; artificial accelerated ageing test; tracking wheel test; 1000 h salt fog test; high voltage and insulation technology

**摘要:** 介绍了国际上现有的几个复合绝缘子老化试验方法的特点, 并对我国现场运行复合绝缘子的老化现象进行分析, 在此基础上以模拟硅橡胶复合绝缘子在现场运行中的老化模式为目的, 设计、建造了相应的试验装置, 进行了多种人工加速老化试验, 并比较了不同方法的可行性和合理性。结果表明, 各种老化方法都有自己的优势和特点, 但适合国内情况的老化方法还有待于更深入的研究。

**关键词:** 复合绝缘子; 人工加速老化试验; 转轮法; 1000 h 盐雾法; 高电压与绝缘技术

## 0 引言

复合绝缘子在中国的大量应用已超过 15 a, 截止到 2001 年挂网运行的复合绝缘子已达 160 万支, 约 290 万支·a, 目前保守估计挂网运行的复合绝缘

子已远超过 200 万支<sup>[1]</sup>。我国最初研制复合绝缘子的目的是防治输电线路的污闪, 在中等及以上污区已大面积推广使用复合绝缘子。大量的运行经验表明, 复合绝缘子对于减少污闪、维护电网安全运行起了重要的作用。但随着复合绝缘子运行年限的增长, 用户对其老化性能越来越关注。我国污秽地区恶劣的运行环境会加速复合绝缘子的老化, 且环境的明显差异也导致复合绝缘子在老化机理上可能存在差异, 如何评估复合绝缘子现在的运行状态以及如何判定更换时间成为迫切需要解决的问题<sup>[2-7]</sup>。

为评估复合绝缘子的现场运行情况, 必须要有合理的、简单的、便于现场操作的老化判据。在合理老化判据的基础上, 才能客观正确评判复合绝缘子现场老化情况和阶段。合适的老化试验方法对研究老化判据有很大的作用, 同时老化试验方法与实际运行情况的比较也需通过老化判据来实现。

针对上述情况, 中国电力科学研究院首先对国内硅橡胶复合绝缘子老化方面的情况进行了调查和研究工作, 提出了现场复合绝缘子硅橡胶伞裙护套老化的表现, 以此归纳实际运行中硅橡胶伞裙护套的老化判据<sup>[2]</sup>; 其次针对现在国际上不同的老化试验方法, 在国内首先建立了大型的综合因素老化试验装置, 在此基础上尝试了综合老化试验方法, 以期找到适合国内复合绝缘子老化机理的老化试验方法<sup>[8]</sup>。

## 1 复合绝缘子的老化试验方法

线路上使用的硅橡胶复合绝缘子在使用过程中, 由于内外因素的相互作用, 随着使用时间的推移, 硅橡胶伞裙和护套的机电性能逐渐变差, 该过

程称为老化(或劣化)。在此意义上,复合绝缘子在使用中其硅橡胶伞裙和护套逐渐发生表面硬化、粉化、脆化以及憎水性退化,乃至烧蚀、开裂的过程,都是老化,而这些表现也都是老化的结果。

针对这种定义,在较长时间内对硅橡胶某种性能的考核试验都可称作老化试验。如 1 000 h 盐雾法和转轮法,虽然所加因素简单,但其通过加强外界某些因素的影响,考核了试品在相当长一段时间内性能的变化情况,因此也可归类为老化试验的范畴。

老化试验的目的是用最简单的方法,在最短时间内模拟实际运行中复合绝缘子的长期性能的变化。作为一种较好的人工加速老化试验方法,它必须具有等价性(或典型性, representative)、可重复性(repeatability)和可再现性(reproducibility)。在这 3 个特性中,等价性往往排第一,这是加速老化的第一要求,要反映真实的老化过程。

目前,复合绝缘子的人工加速老化试验方法基本上可分为 2 类:①由 IEC 61109-1992<sup>[9]</sup>规定的漏电起痕和电蚀损试验(简称 1 000 h 盐雾法)和转轮法试验,即简单因素老化试验方法;②由 5 000 h 老化试验衍生出来的多因素人工加速老化试验方法。

1 000 h 盐雾法也许是最早被写入标准 IEC 61109-1992 的老化试验方法,出现在 1982 年的德国标准 DIN 57441 中<sup>[10]</sup>。该方法主要是在盐雾条件下对绝缘子施加 1 000 h 的电压,观察试品的烧蚀及放电情况,它比较成功地再现了绝缘子表面在恶劣条件下的放电现象,但该方法被认为更接近污秽试验。

转轮法的研究出现得也很早,作为标准最早出现在 IEEE 1204-1988 中<sup>[11]</sup>,它主要是使绝缘子间隔性地染污和加压。转轮法在北美地区有着广泛的应用,被写入 CEALWIWG 1996<sup>[12-13]</sup>。转轮法分为 2 种:①采用喷射盐雾的方式使绝缘子表面染污;②采用将试品浸入盐水的方法。这 2 种方法在加速老化结果方面基本相同。浸盐水法与喷盐雾法相比,可控性更高,也更易实现。浸盐水的转轮法已作为一种标准老化试验方法加入 IEC 62217-2004<sup>[14]</sup>的附录 2 中。

5 000 h 综合老化试验最早出现在 IEC 61109 的附录中,它属于多因素的综合老化试验方法,在试验箱中包括了对紫外、盐雾、雨、湿度、温度等各种因素的模拟,能够比较全面地模拟绝缘子现场运行的条件。由于各地区的气候条件不同,各国研究机构针对各自地区的气候特点,设置了不同的试验

参数和程序,对 5 000 h 的老化方法进行了研究和试探性的改进<sup>[15]</sup>。但作为国际化的试验方法,仍以 IEC 62217 规定的程序和参数为准。

1 000 h 盐雾法和转轮法具有很好的可重复性及较好的可再现性。但这 2 种试验方法对于复合绝缘子本身憎水性的恢复特性未予以考虑(导致很多时候硅橡胶的测试性能不如三元乙丙橡胶 EPDM)。此外,简单的表面放电是否能够正确模拟现场多因素的老化模式还值得商榷。

5 000 h 模拟气候加速老化试验方法对于现场中的各种气候因素都有考虑,有较好的模拟性。但该方法的气候模拟性比较强,且试验设备复杂,时间周期比较长,控制因素比较多,人们对该方法的可重复性和可再现性还缺少共识(转轮法试验就是针对这种情况被加入 IEC 62217-2004 的)。目前包括中国电力科学研究院、清华大学、日本中部大学在内的一些实验室在近几年已开始寻找一种改进的综合加速老化试验方法,力图更好地模拟复合绝缘子现场老化模式。

## 2 1 000 h 盐雾法

1 000 h 盐雾法在考虑绝缘子伞形结构的基础上,以短绝缘子为试品,主要检验绝缘子耐漏电起痕及抗蚀损能力。1 000 h 盐雾法试验的主要参数如表 1 所示。

表 1 1 000 h 盐雾法试验参数  
Tab. 1 Parameters of 1 000 h salt fog test

项目	参数	项目	参数
试品数量	2	试品悬挂方式	1 水平, 1 垂直
试品爬距	484~693 mm	试验电压	(爬距/34.6)kV
试验持续时间	1 000 h	雾滴大小	5~10 $\mu\text{m}$
喷雾量	(0.4±0.1)L/(m <sup>3</sup> ·h)	盐水中 NaCl 含量	(10±0.5)kg/m <sup>3</sup>

注: 超过 3 次过流跳闸(1A)或者腐蚀深达芯棒或伞盘击穿即终止试验。

其典型的电流变化趋势如图 1 所示,基本上电流变化可分为 4 个阶段,这 4 个阶段均与试品本身的憎水性变化紧密相关:

(1) 第一阶段,在试品开始受潮阶段,硅橡胶表面保持良好的憎水性,此时泄漏电流很小,只

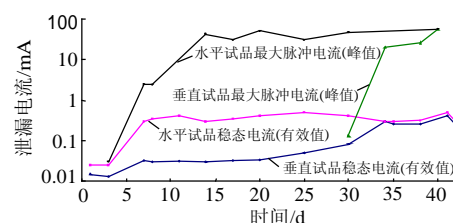


图 1 1 000 h 盐雾法典型电流变化趋势  
Fig. 1 Current change of 1 000 h salt fog test

有十几微安。由于垂直放置试品其下表面很难受潮，在几天内泄漏电流均很小。水平试品电流较高，同时发展得也较快。

(2) 第二阶段，硅橡胶充分受潮，憎水性开始有所下降，泄漏电流出现明显的增长，但泄漏电流有效值仍然不高，只有几十微安，同理，水平放置试品比垂直试品的电流增长幅度及电流值都要高一些。

(3) 第三阶段，硅橡胶的憎水性全面下降，泄漏电流呈现缓慢的增长，出现明显的沿面放电。泄漏电流增长至几百微安，并出现一些毫安级峰值的脉冲放电。

(4) 第四阶段，硅橡胶在放电和潮湿的作用下，憎水性完全丧失，放电进一步增强，峰值几毫安到几十毫安不等。硅橡胶表面有明显电弧放电。这个阶段对于不同试品各不相同，开始时间从几天到几十天都有可能。

倘若在 1000h 内硅橡胶发生烧蚀等情况，则放电电流会发生更为明显的增长。目前国内的复合绝缘子经过这么多年的发展，基本上都能通过 1000h 盐雾法试验<sup>[16-18]</sup>。

### 3 转轮法

约 20 a 前复合绝缘子的转轮法试验就已开始了；在其后若干年一直没有很大的发展。近年来，在复合绝缘子老化试验方法的讨论中，因 5000h 老化试验方法过于复杂、时间长、试验参数难以统一，转轮法又被人们重新提出，作为检测复合绝缘子的一种简单老化试验方法列入即将颁布的 IEC 62217-2004 附录中。

转轮法装置示意图如图 2 所示，4 个绝缘子相差 90°被固定在中间转盘上，最下面的绝缘子浸泡在转盘下的溶液池中(溶池中为 130 L 盐水溶液，浓度为每升去离子水中含 NaCl (1.4±0.6) g)。转盘轴上连接电机，控制试品旋转，电机每旋转 90°停止大约 40 s(足够电弧熄灭的时间)，旋转一周约 200 s。试验时，每支试品在盐水中浸泡 40 s，然后旋转到水平位置自然干燥 40 s，接着旋转到最高位置加压 40 s，再经过水平位置 40 s 自然冷却后重新进入盐水槽中浸泡。如此周而复始，标准试验程序共 30 000 转，时间大约是 1 700 h(70 d)。试验电压梯度为 35 V/mm。

转轮法试验中电流的变化趋势一般可分为 4 个阶段(典型的电流变化趋势如图 3 所示)：

(1) 第一阶段，在憎水性未被破坏以前，基

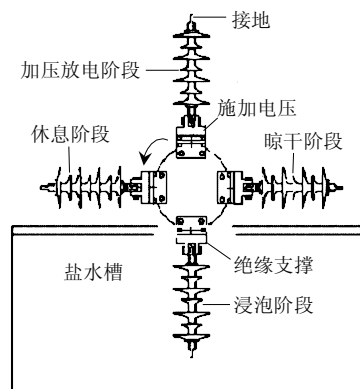


图 2 转轮法装置

Fig. 2 Configuration of tracking wheel test

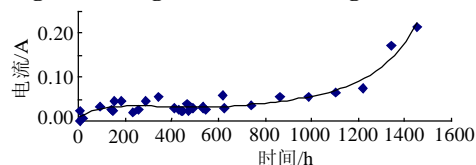


图 3 转轮法试验中典型的电流变化趋势

Fig. 3 Current change in tracking wheel test

本没有放电现象，这个阶段的持续时间因试品憎水性情况而定。在已完成的试验中，这个阶段最短几个小时，最长可达数天。

(2) 第二阶段，开始出现微小的放电，放电处的憎水性明显迅速降低，但宏观上仍保有憎水性，持续时间一到数天。该阶段的放电多为沿面的淡蓝色电晕放电，放电电流值很小，约为几个毫安。

(3) 第三阶段，随着试验的进行试品憎水性完全消失，电流为电弧放电，并大多数集中在杆径及其下表面。电流幅值增长至一个比较稳定的值，该值随试品不同而不同，一般在 20~40 mA 之间。进入这个阶段，电流在很长时间内增长缓慢，随放电持续时间有所增长，放电时间由开始 0.1 s 左右到最长 5~10 s。该阶段可在 20~50 d 以上。

(4) 第四阶段，因为试品烧蚀等原因电流进入下一轮快速增长期，一般在数天之内电流可增长 1 倍以上。

转轮法在一定程度上可对复合绝缘子进行筛选，并在某些情况下可以再现现场运行情况，但它与盐雾法试验一样，实际上只是考核复合绝缘子的耐电蚀损能力，对于复合绝缘子的老化情况并不能进行很好地模拟<sup>[19]</sup>。

## 4 复合绝缘子的综合老化试验

### 4.1 综合老化试验方法

目前除 5000h 综合加速老化试验方法<sup>[14]</sup>以外，还有几种各国分别针对自己的情况颁布的长期老化

试验方法,包括法国电力公司提出的改进 5000h 老化试验,意大利 ENEL 实验室和 CESI 实验室分别提出的 5000 h 老化试验方法<sup>[20]</sup>,美国电力科学研究院提出的夏/冬季节循环试验<sup>[21]</sup>和沙漠气候试验<sup>[22]</sup>,国际高电压大电流技术研究联合会提出的 5000 h 老化试验方法<sup>[23]</sup>。

即将发布的 IEC 62217-2004 附件中的综合老化试验方法是从 IEC 61109-1992 的附录 C 延伸而来的,经 20 多年没有重大改变,CIGRE 的 5000h 老化试验在方法上与其相同,IEC 的综合老化程序如图 4 所示。

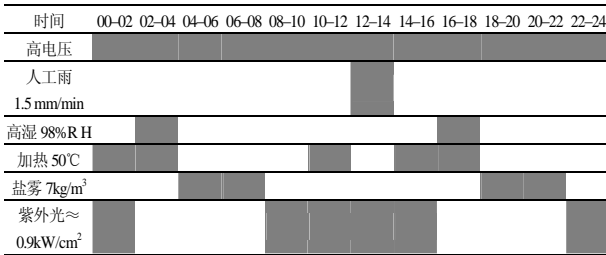


图 4 IEC 综合老化试验程序

Fig. 4 Program of IEC artificial ageing test

### 4.2 IEC 5000 h 老化试验方法

5000h 综合老化试验是在直流条件下进行的,其试验参数和程序与 IEC 5000h 标准试验相同。综合老化试验在直流条件下进行:①考虑试验条件更为严格,②通过 5000h 老化试验研究直流复合绝缘子伞裙护套的配方以及 IEC 标准老化方法是否适用于直流条件。实际上,直流 5000h 老化的试验现象和结果相对于交流而言有相当的一致性<sup>[23]</sup>。

在 5000h 的老化试验中,泄漏电流的变化可分为 2 个阶段。在开始阶段上升较快,基本是在第二个循环周期施加盐雾中就会出现较大的放电,使泄漏电流有一个跃变。这是放电对憎水性的破坏造成的,即初始的憎水性由于潮湿或者表面微放电等作用被破坏以后,局部小电弧的出现明显加速了憎水性的破坏速度,从而使泄漏电流在短时间内迅速增长。第二阶段的泄漏电流在整体上呈现趋于平稳的状态,并呈现如图 5 所示的规律性变化,泄漏电流

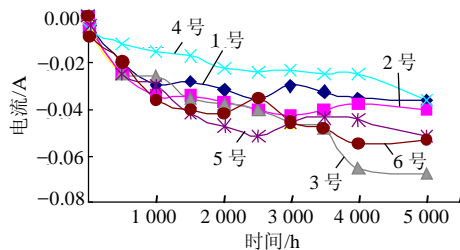


图 5 IEC 5000 h 老化泄漏电流变化趋势

Fig. 5 Current change in IEC 5000 h ageing test

约为 10~40mA 之间。

这种变化趋势与交流 5000h 综合老化试验中的电流变化有相似性,电流变化与复合绝缘子表面憎水性密切相关,在开始阶段上升较快,当放电开始出现时,由于其对憎水性的破坏作用,泄漏电流会有一个跃变的过程。在其后的长时间内电流保持一个稳定的、缓慢的增长趋势。

IEC 的 5000h 老化试验中,受潮、淋雨和表面放电会降低绝缘子的憎水性,而光照和加热又会促进憎水性的恢复。憎水性的测试采用瑞典输电研究院(Sweden transmission research institute, STRI)提出的喷水分级法(HC 法),试品在 1000 h 和 4000 h 时,憎水性在一个循环周期(24 h)中的变化情况如图 6 所示。绝缘子在 4000 h 老化后整体憎水性迁移速率变慢,但依然具有较好的憎水性恢复性能。

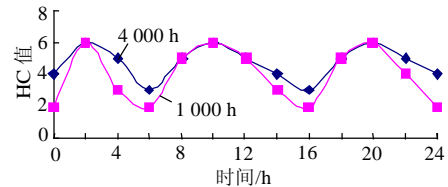


图 6 一个循环周期中绝缘子上表面的变化情况

Fig. 6 Change of insulator surface performance in one circle

在目前已完成的试验中未发现有试品不通过试验,这当然与我国复合绝缘子制造水平较好有关,但这种试验方法是否过于宽松也值得探究。

### 4.3 新的 5000 h 综合老化试验方法

硅橡胶复合绝缘子在我国电网主要用于防治污闪,而我国目前大气环境污染比较严重,大部分地区绝缘子表面的污秽等值盐密(equivalent salt deposit density, ESDD)比较大,且不溶物密度(non-soluble material deposit density, NSDD)高,与国外有很大不同<sup>[24]</sup>。针对这种情况,尝试一种更适合我国国情的老化试验方法,即用含不溶盐的盐雾代替单纯的盐雾,并针对硅橡胶的憎水性丧失、恢复和迁移特性延长污秽雾的时间和日照时间,使得试品在污秽雾中能有充足的时间丧失其憎水性并产生放电,而后在氙灯的照射下有足够的时间使其憎水性得以恢复和迁移。

在这种思路下,清华大学提出了一种新的人工加速老化试验方法(暂称为简化综合老化试验方法),试验程序如图 7 所示。试品在盐雾箱中首先降雨(为缩短雾浸润试品时间),而后升起含盐和灰的雾,并加电压,在放电的同时积污 1 d,接着雨水

时间	0~24 h	24~48 h
加压方式 34.5 mm/kV	■	■
人工雨电导率 10~50 μS/cm	■	■
高湿 100%	■	■
高温 48~60℃	■	■
污秽雾 NaCl 2kg/m <sup>3</sup> , 硅藻土 1kg/m <sup>3</sup>	■	■
紫外光 0.8~1.0 kW/m <sup>2</sup>	■	■

图7 新的人工加速老化试验程序

**Fig. 7 A new method of artificial accelerated ageing test**  
冲刷模拟现场运行时的雨水清洁过程；然后试品转至氙灯老化试验箱，在强氙灯光照射下进行老化，同时恢复其表面憎水性。24 h后转回盐雾箱，如此交替进行。每2 d称为1个循环<sup>[25]</sup>。

按照上述方法已完成的人工加速老化试验中，在积污、憎水性退化过程以及粉化、硬化、电蚀现象上都能较好地模拟现场运行情况。

分别在144 h、240 h、480 h、720 h、2 500 h和5 000 h测量了试品表面污秽度，测得的污秽平均值变化如图8和图9所示。污秽呈现了明显的饱和现象，下伞面盐密、灰密均高于上伞面，这些均与现场情况相符。盐密、灰密的饱和值也基本与现场调查的50%累积概率值相差不大。

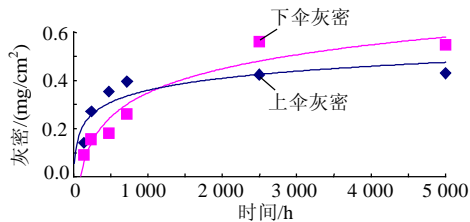


图8 试品表面灰密随时间的变化  
Fig. 8 Change of NSDD with test duration

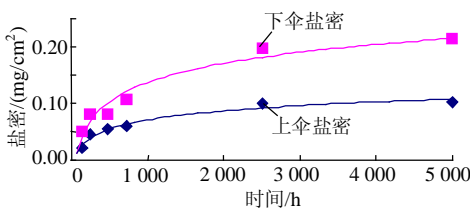


图9 试品表面盐密随时间的变化  
Fig. 9 Change of ESDD with test duration

灰盐比(NSDD/ESDD)与现场测量的复合绝缘子伞裙上、下表面的结果相差不大。现场测量结果中，50%累积概率的对应值约为2~2.5，灰盐比例在1.5~4之间的约占60%。试验到5 000 h时上表面灰盐比为4.2，下表面灰盐比为2.6，这与实际运行中的绝缘子测到的结果是完全吻合的。试验中灰盐比变化如图10所示。憎水性测量按喷水分级法。所有试品在进入试验箱前的憎水性测量结果HC值(憎水性等级)均为1级。

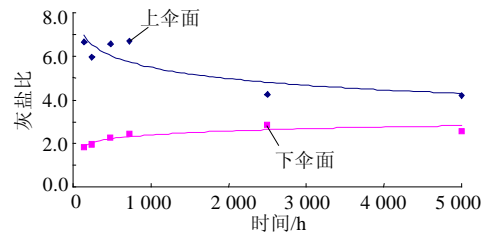


图10 灰盐比的变化趋势  
Fig. 10 Change of ratio of NSDD to ESDD

图11为试验中试品第24轮、第37轮和第102轮时的憎水性在氙灯照射下的恢复情况比较。可以看出，试品的憎水性恢复速度随时间增加而明显降低。

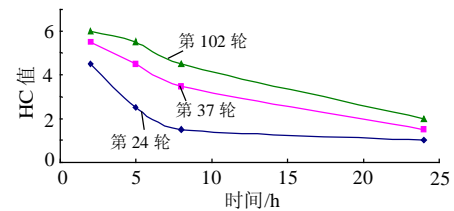


图11 试品在氙灯箱内憎水性恢复HC值变化对比  
Fig. 11 Change of HC value in test

5 000 h试验试品电流不同幅值的脉冲统计数目典型变化如图12所示。由各试品的电流发展趋势可以看出，放电的增长是一个很快的过程，尤其是对于小电流放电，放电数量级的增长几乎是在一轮中就完成，这是由放电对憎水性的破坏作用所造成的，在初始的憎水性由于潮湿或者表面微放电等若干作用破坏后，电晕放电的出现明显加速了憎水性的破坏速度，从而使得放电在短时间内迅速增长，这与转轮法试验的发展情况也是相同的。

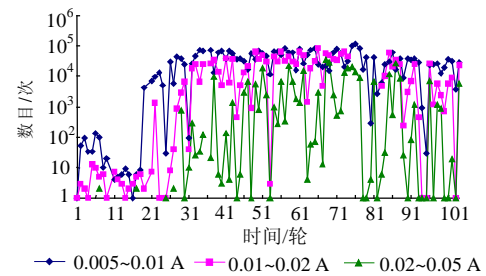


图12 试品电流统计数目随时间的变化  
Fig. 12 Change of current with test duration

在试验中有些性能差的试品出现了严重的烧蚀，导致过流跳闸。其他试品在试验后也有硬度、粗糙度增加以及粉化的现象。

## 5 讨论

本文提到的各种老化试验方法各有其特点，并都能在一定程度上反映复合绝缘子硅橡胶材料的性能。1 000 h盐雾法和转轮法再现了复合绝缘子现场运行时硅橡胶表面发生的恶劣放电状况，主要考核

硅橡胶的耐电蚀损能力。IEC 5000h 综合老化试验和简化综合老化试验都能程度不同地模拟硅橡胶伞裙与护套在现场运行中的积污状况和憎水性的丧失、恢复和迁移以及伞裙硬化的情况。简化综合老化试验还通过降低盐雾中盐含量,使放电更趋沿面。试验表明,硅橡胶复合绝缘子需要经历多种环境因素的全面考核。因此为研究硅橡胶复合绝缘子的长期性能,使用 IEC 5000h 综合老化试验法和简化综合老化试验法较 1000h 盐雾法和转轮法更可取。

比较各种老化试验方法的优劣,5000h 综合老化试验方法仍有可改进的余地。如,IEC 5000h 综合老化试验方法和简化综合老化试验方法都使用高场强、污秽、强紫外、高温、高湿以及降雨等试验条件。不同的是,简化试验法用含有较多不溶物的低盐度污秽雾代替了 IEC 标准方法中的纯盐雾,并延长了各环境因素的作用时间;但简化试验法中施加的电压不是连续的,这与实际运行情况又不相符。根据现有的试验结果来看,今后可将二者结合起来,将 IEC 5000h 综合老化试验方法中的盐雾换成含不溶物的低盐度污秽雾(添加不溶物使污秽累积效应明显),并适当延长每一环境因素的作用时间(比如 8~12h),保持持续施加试验电压,这样既能很好地再现复合绝缘子现场运行状况,又能提高试验效率、缩短试验时间。在检验硅橡胶伞裙和护套憎水性变化和耐电蚀损能力的同时,还需适当增加紫外辐射量,提升温度,加速试品的硬化和抗撕裂强度的下降,以提高鉴别“过早老化”的能力。

对于酸雨、水泥等一些工业污秽,可通过增加少量 SO<sub>2</sub> 气体,或者有针对性地设计专门的试验程序,重点考核复合绝缘子的耐酸雨及其他工业污秽的特性。

## 6 结论

(1) 1000h 盐雾法是目前 IEC 标准规定的唯一标准化老化试验方法,它主要用于考核复合绝缘子伞裙护套材料的耐漏电起痕性能。对于现有硅橡胶复合绝缘子,该试验不够严格。

(2) 转轮法作为考核硅橡胶材料耐漏电起痕性能的试验方法,是一种简单的老化试验方法,与 1000h 盐雾法有一定的相似性,在一定条件下能够再现复合绝缘子伞裙和护套发生的电蚀损现象。

(3) 新提出的综合老化试验以不溶物含量较多的污秽雾取代盐雾,并将表面放电与紫外辐射及高温高湿分开,使硅橡胶特有的憎水性衰减、恢复以

及迁移性能有充裕的时间显现,比较符合国内运行环境。但它将施加电应力与紫外辐射完全分开,使憎水性的恢复与迁移没有强电场的参与而在一定程度上失去了真实性。

(4) 现有的复合绝缘子老化试验方法和新的简化综合老化试验方法都还不能全面再现复合绝缘子外绝缘材料的老化现象,仍有不足之处。今后研究方向应集中在持续加压和对各环境因素强度、作用时间的调整上,提出更符合国情、更快速有效的综合老化试验方法;同时考虑工业污秽,使之成为更有针对性的老化试验方法。

## 参考文献

- [1] 崔江流,宿志一,易辉.我国硅橡胶合成绝缘子的应用与展望[J].中国电力,1999,32(1):38-41.  
Cui Jiangliu, Su Zhiyi, Yi Hui. The application and its prospect of silicon rubber composite insulators in China[J]. Electric Power, 1999, 32(1): 38-41.
- [2] 殷禹,梁曦东,周远翔,等.转轮法试验中硅橡胶复合绝缘子损坏现象的研究[J].电网技术,2004,28(19):68-71.  
Yin Yu, Liang Xidong, Zhou Yuanxiang, et al. Analysis on failures of silicon rubber composite insulators in tracking wheel test[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 68-71.
- [3] 梁旭明,蒲春雨,寻凯,等.500kV线路复合绝缘子鸟啄情况调查及原因分析[J].电网技术,2005,29(22):19-23.  
Liang Xuming, Pu Chunyu, Xun Kai, et al. Investigation on bird damage to composite insulators of 500 kV transmission lines [J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 19-23.
- [4] 程养春,李成榕,陈勉,等.高压输电线路复合绝缘子发热机理的研究[J].电网技术,2005,29(5):57-61.  
Cheng Yangchun, Li Chengrong, Chen Mian, et al. Research on heating mechanism of composite insulator of high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 57-61.
- [5] 梁曦东,王成胜,范炬.合成绝缘子芯棒脆断性能及试验方法的研究[J].电网技术,2003,27(1):34-37.  
Liang Xidong, Wang Chengsheng, Fan Ju. Research on brittle fracture of FRP rods and the test method[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 34-37.
- [6] 王祖林,黄涛,刘艳,等.合成绝缘子故障的红外热像在线检测[J].电网技术,2003,27(2):17-20.  
Wang Zulin, Huang Tao, Liu Yan, et al. Online inspection of defective composite insulators by infrared temperature measurement [J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 17-20.
- [7] 张福林,张善钢.复合绝缘子运行过程中芯棒出现脆断原因初析[J].电网技术,2000,24(1):30-32.  
Zhang Fulin, Zhang Shangang. Preliminary analysis on brittle fracture phenomenon of polymer insulator frail rod[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 30-32.
- [8] 李庆峰,殷禹.硅橡胶复合绝缘子老化情况调研及老化判据的提出[R].北京:中国电力科学研究院,2005.  
IEC61109-1992,标称电压大于1000V交流架空线用复合绝缘子:  
(下转第78页 continued on page 78)