

# 高压直流复合绝缘子 5000 h 人工加速老化试验

李庆峰, 宿志一

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085)

## 5 000 h Artificial Accelerating Ageing Test of HVDC Composite Insulator

LI Qing-feng, SU Zhi-yi

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

**ABSTRACT:** As the first attempt of making such a test in China, a 5000 h artificial accelerating ageing test, which consults and follows the standard ageing process specified by IEC 61109, for HVDC composite insulators with different shapes of sheds, compositions and produced by different manufacturing technologies is performed in China Electric Power Research Institute (CEPRI). In this test the influence of following factors on ageing of composite insulators, such as DC electrical stress, solar radiation, high temperature, high humidity, severe pollution, etc., are researched. Test results show that by means of 5000 h artificial accelerating ageing test the unceasing transport and recovery of surface hydrophobicity of silicon rubber, contamination retention features of composite insulators with different shapes of sheds as well as the differences of surface discharge paths can be reproduced. It is put forward that surface discharge is the principal cause of contamination retention and transport of hydrophobicity, and the temperature and solar radiation greatly affect the transport and recovery property of silicon rubber's hydrophobicity. The surface hydrophobicity of silicon rubber composite insulators dynamically varies in whole 5 000 h artificial accelerating ageing test, and the hydrophobicity also varies under different ageing factors being applied.

**KEY WORDS:** HVDC; composite insulator; silicon rubber; ageing; tracking; erosion; hydrophobicity

**摘要:** 选取不同配方、不同工艺、不同伞形的多种复合绝缘子, 在国内首次参照标准 IEC 61109 的老化程序进行了直流 5000 h 人工加速老化试验。直流 5000 h 人工加速老化试验包含直流电应力、日照、高温、高湿度、重污秽等诸多因素对复合绝缘子老化性能的影响。结果表明直流 5000 h 人工加速老化试验可以再现硅橡胶表面憎水性不断丧失与恢复的情况、不同伞型绝缘子的积污特点和表面放电路径的差异; 提出了表面放电是复合绝缘子积污和憎水性丧失的主要因素, 温度和光照对硅橡胶的憎水性迁移和恢复特性有较大

影响。硅橡胶复合绝缘子表面的憎水性在整个 5000 h 综合老化试验中呈动态变化, 在不同的老化因素作用下呈现出不同的憎水性。

**关键词:** 高压直流; 复合绝缘子; 硅橡胶; 老化; 漏电起痕; 电蚀; 憎水性

## 0 引言

随着我国远距离高压直流输电的发展以及环境污染的加重, 直流复合绝缘子在我国得到了广泛应用, 其用量已居世界第一<sup>[1-10]</sup>。在±800 kV 特高压直流输电工程的建设中, 复合绝缘子的使用将有效减小绝缘子串长, 从而降低工程造价<sup>[11-14]</sup>。由于直流电压下复合绝缘子面临更加严峻的运行环境, 其耐漏电起痕和电蚀能力、长期运行老化性能都成为用户关注的焦点。

目前国内外许多科研机构都针对交流复合绝缘子的老化性能进行了大量的试验研究<sup>[15-18]</sup>, 主要试验方法是转轮法和综合加速老化试验方法, 但在直流复合绝缘子的老化研究方面还是空白。自 IEC 61109-1992 发布以来, 5000 h 综合加速老化试验成为了标准中的附录项。我国一直没有开展该项试验, 未对我国使用的典型结构工艺的复合绝缘子的长期老化性能和耐漏电起痕和电蚀性能进行研究。

笔者利用中国电力科学研究院建成的国内唯一人工加速老化试验装置进行了 5000 h 加速老化试验, 模拟自然老化过程中的各种老化因素, 选取我国典型伞裙结构、工艺、配方的绝缘子试品进行老化对比试验。重点研究了直流复合绝缘子的长期运行性能, 分析了不同伞形结构绝缘子的积污特点和憎水性变化情况, 阐述了直流电压下复合绝缘子耐直流漏电起痕及电蚀性能, 以为直流工程选择复合绝缘子提供技术参考。

### 1 试验装置

中国电力科学研究所的复合绝缘子人工加速老化试验装置于 2001 年建成，试验方法依据标准 IEC 1109-1992 “额定电压高于 1000 V 的交流架空线路复合绝缘子试验方法和接收准则”。装置由交、直流高压试验电源、模拟环境试验箱和控制台 3 部分组成。高压电源的交流输出电压为 22 kV，直流输出电压为 ±30 kV；环境试验箱为 2 m×2 m×2 m，设有温度调节系统、湿度调节系统、降雨及雨量调节系统、盐雾发生及控制系统、日光光源及调节系统和计算机自动数据采集处理系统，装置组成和外观如图 1、图 2 所示。

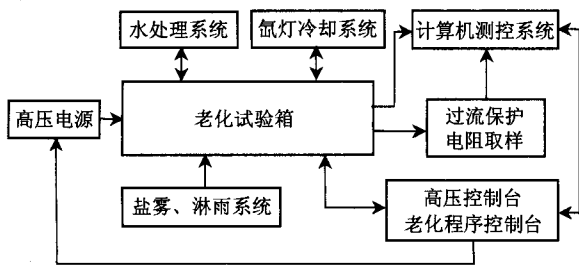


图 1 人工加速老化试验装置组成

Fig. 1 Configuration of artificial accelerating ageing test device

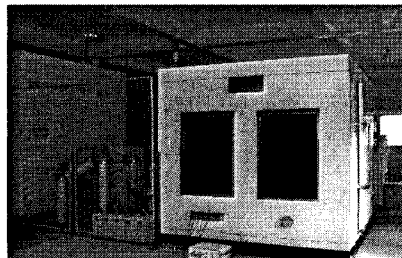


图 2 人工加速老化试验装置外观

Fig. 2 Appearance of artificial accelerating ageing test device

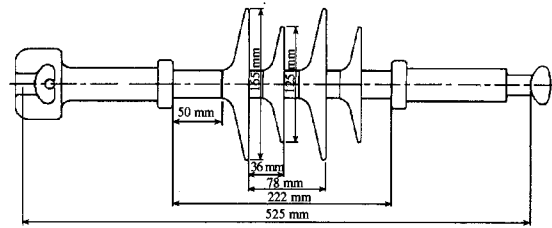
### 2 试品及其布置

试品采用 4 支直流复合绝缘子，其中 2 种伞形各 2 支，具体参数和结构见表 1 和图 3，老化试验箱实际布置如图 4 所示。试验电压按 34.5 mm/kV 计算，实际施加电压为负极性直流电压 18.9 kV。

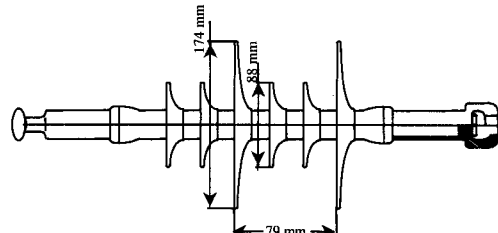
表 1 试品参数

Tab. 1 Parameters of samples

项目	参数	
试品种类	A	B
试品编号	1、3	2、4
爬电距离	665 mm	640 mm
伞形配置	1 大 1 小，见图 3(a)	1 大 2 小，见图 3(b)
大小伞直径	大伞 165 mm，小伞 125 mm	大伞 174 mm，小伞 88 mm
大伞间距	78 mm	79 mm
芯棒直径	28 mm	28 mm
生产工艺	挤包穿伞，压接	整体模压，压接



(a)



(b)

图 3 试品尺寸结构

Fig. 3 Size and structure of samples

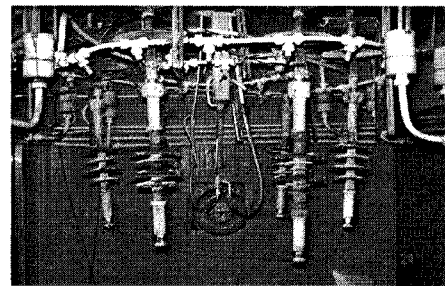


图 4 老化试验箱实际布置

Fig. 4 Layout in ageing chamber

### 3 试验结果分析

#### 3.1 表面放电和泄漏电流分析

##### 3.1.1 泄漏电流的长期变化情况

在 5000h 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 2 个施加盐雾的周期中就会出现较大的放电，泄漏电流有一个跃变，这是由于放电对憎水性的破坏造成的。在初始的憎水性由于潮湿或表面微放电等作用破坏后，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 2 阶段泄漏电流整体呈现趋于平稳的状态，并呈现出图 5 中的规律性变化。

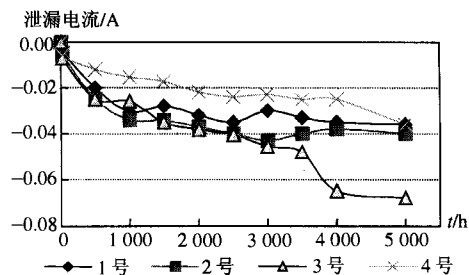


图 5 5000 h 老化试验中泄漏电流变化趋势

Fig. 5 Trend of the leakage current in 5000 h ageing test

3.1.2 不同伞裙结构的表面放电与积污特性

试验中发现，绝缘子是否带电和绝缘子伞形结构对其表面积污分布有较大影响。如图 6 所示，拍摄时间为 4000h，绝缘子表面积污趋于饱和状态。图 6(a)为 1 大 1 小伞形结构，表面积污主要集中在护套及其周围，其表面有一层白色致密的污秽层；图 6(b)为 1 大 2 小伞形结构，表面积污整体比较均匀，靠近高压端的护套上污秽较致密，其余地方污秽较少；图 6(c)和图 6(d)为测量泄漏电流用地线端的隔离绝缘子，下表面为伞裙本色，几乎没有污秽沉积，上表面为盐雾沉降造成的积污。

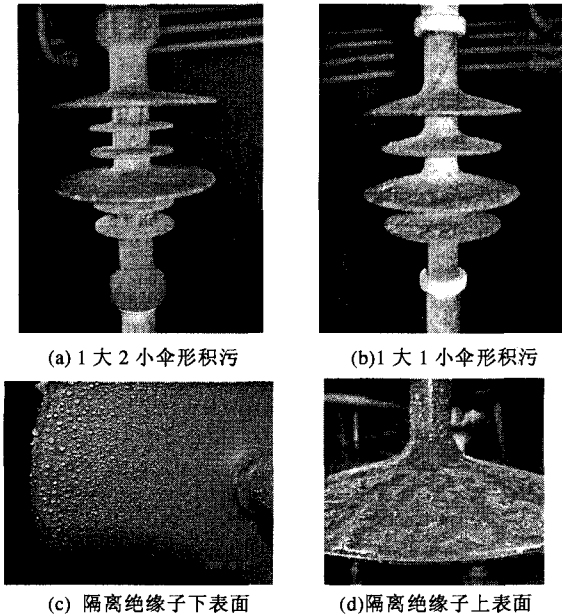


图 6 绝缘子表面污秽分布情况  
Fig. 6 Distribution of contamination on the insulator surface

绝缘子表面污秽成分主要是盐雾中的 NaCl 结晶和淋雨中的 Ca<sup>2+</sup>离子等沉积。图 6(a)和图 6(b)绝缘子在盐雾中表面放电产生的高温使试品表面水分迅速蒸发(试验中可以明显地观察到每次较强烈的放电都伴随着水蒸气的蒸发)，其水分中的盐类物质留在绝缘子表面，而积污的地方在受潮时电流密度大，容易发热并产生局部电弧，因此放电越多的地方污秽沉积越严重；图 6(c)绝缘子不带电，表面无放电，其污秽主要来自于盐雾的沉降，积污自然少很多。

1 大 1 小伞形绝缘子表面放电过程中，放电由上端接地侧的护套开始，然后是高压端的护套表面放电，整个放电过程中电弧贴着护套表面，见图 7，每次放电相当于一次等离子沉积，这种沉积方式造成了护套上的污秽特别致密。

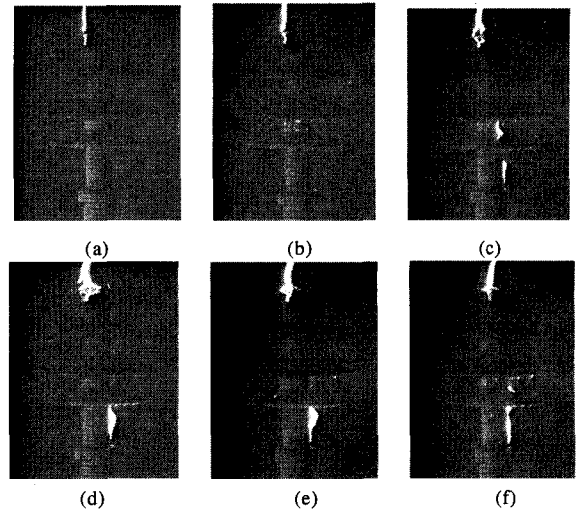


图 7 试品 A 表面放电过程  
Fig. 7 Discharge process on surface of sample A

1 大 2 小伞形绝缘子表面放电过程中，由于伞数较多，伞间距小，特别是小伞之间的距离约为 26mm，中间护套表面的放电在电动力的作用下电弧易发展至伞间而飘到伞裙外，见图 8。此外由于该绝缘子端部采用了不同的密封方式，在端部护套与金具的界面上加了一个包裹金具和护套的密封层，端部的弧根容易沿着倾斜的密封层向外飘，因此整支绝缘子积污特点是小伞表面和端部密封层积污较重，中间护套积污轻。

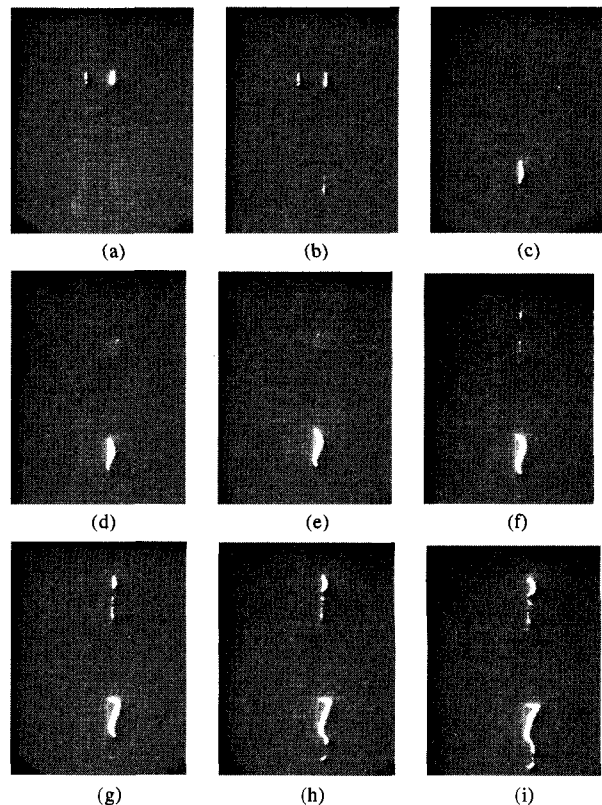


图 8 试品 B 表面放电过程  
Fig. 8 Discharge process on surface of sample B

1大2小伞形试品(2号、5号)采用的是整体注射成型工艺,其试品表面有明显的合膜缝,但在这2支垂直试品的合膜缝上未发现特别的积污痕迹。

### 3.2 憎水性分析

#### 3.2.1 憎水性随时间的变化情况

5000h老化试验中,受潮、淋雨和表面放电会降低绝缘子憎水性,而光照和加热又会促进憎水性的恢复。在多重因素作用下,绝缘子表面的憎水性呈现出2个变化,一是在一个循环周期中憎水性是动态变化的,二是绝缘子表面不同的位置呈现出不同的憎水性。

憎水性的测试采用喷水分级法(HC法)<sup>[19]</sup>,由于绝缘子表面各处的憎水性都不同,绝缘子最上方伞裙的上表面(该伞裙上表面容易受光照、淋雨和盐雾的影响,较为典型)在1000h和4000h时的憎水性在一个循环周期(24h)中随老化因素和环境温度的变化而规律性变化。绝缘子在4000h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。憎水性的变化有以下特点:

(1) 在淋雨2h和盐雾4h后表面憎水性全部消失,达到HC6级,但1000h时表面憎水性的恢复速度比4000h时快,而且如果时间足够长,憎水性恢复等级比4000h时高。

(2) 绝缘子的憎水性恢复受氙灯照射和箱体温度影响很大。氙灯的照射使绝缘子表面温度上升到70℃左右以及50℃的环境温度都对绝缘子憎水性的恢复有很好的促进作用。

#### 3.2.2 憎水迁移特性

图9为1号绝缘子上端护套4h盐雾后经过氙灯照射2h和加热2h后的憎水性照片。绝缘子表面覆盖了一层白色致密的污秽,金具端护套的憎水性较差,远离金具的护套憎水性较好,这主要是由于表面放电时弧根主要集中在护套与金具交界处,而弧根的温度较高,灼烧了表面的低分子硅氧烷,导致憎水性丧失,可见表面放电对憎水性影响很大。



图9 护套上的憎水性

Fig. 9 Hydrophobicity of housing

文献[20]研究表明,绝缘子表面污秽化学成分对憎水性的迁移影响很大,如果绝缘子表面的污秽物质是纯无机盐,绝缘子的憎水性将无法迁移出污秽层,而积聚在硅橡胶材料表面的尘土、水泥或NaCl与硅藻土的混和物则能在短时间内获得优异的憎水性。试验中采用的盐雾是由99%以上纯度的NaCl加去离子水配置的,在老化试验的各个阶段经过氙灯照射4h后,护套上的憎水性都能恢复到HC2级左右,说明硅橡胶依然表现出了良好的憎水迁移性。取绝缘子表面少量污秽样用X射线荧光光谱仪分析鉴定,分析样品中可能存在的氧化物,结果见表2。

表2 污秽物中的氧化物及其含量

Tab. 2 Components and their contents of contamination

成分	含量/%
Cl	43.6754
Na <sub>2</sub> O	42.3976
SiO <sub>2</sub>	11.6564
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.7507
SO <sub>3</sub>	0.4727
MgO	0.4505
CaO	0.4263
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0649
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0534
K <sub>2</sub> O	0.0283
ZnO	0.0238

由分析结果可知污秽物以NaCl的沉积为主,含有少量的其它杂质,初步分析可能是箱体风循环中带来的灰尘在绝缘子表面沉积,它们与NaCl等无机盐和氧化物在绝缘子表面的沉积形成了一个致密的污层,5000h老化试验中污秽的缓慢沉积和绝缘子表面的高温使得硅橡胶的憎水性有充分的时间和条件迁移至污层表面。

## 4 结论

(1) 直流5000h加速老化试验包含直流电应力、日照、高温、高湿度、重污秽等诸多因素对复合绝缘子老化性能的影响;成功地再现了硅橡胶憎水性的恢复和迁移现象以及硅橡胶材料硬化的现象,考核了硅橡胶伞裙护套和试品端部密封层的耐电蚀性能。试验表明表面放电是导致复合绝缘子积污和憎水性丧失的主要原因,温度和光照对于试品憎水性迁移和恢复的影响较大。

(2) 硅橡胶复合绝缘子表面的憎水性在整个5000h综合老化试验中呈动态变化,在不同的老化因素作用下呈现出不同的憎水性。老化试验后虽然整体憎水性迁移速率变慢,但如果恢复时间足够长,憎水性能恢复到较高的水平。因此,在现场或

对运行后的绝缘子进行憎水性测试时, 环境因素对测量结果影响很大, 应进行憎水性恢复对比试验以判断其憎水性能。

(3) 我国生产的直流复合绝缘子在 5 000 h 加速老化试验中表现出了良好的耐候性能, 其伞裙和伞套材料具有优异的耐漏电起痕和电蚀损性能。

## 参考文献

- [1] Hackam R. Outdoor high voltage composite polymeric insulators [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 557-585.
- [2] Kikuchi T, Nishimura S, Nagao M, et al. Survey on use of non-ceramic (composite) insulators in the world[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 548-556.
- [3] Working Group 03 of Study Committee 22. Worldwide service experience with HV composite insulators[J]. Electra, 2000, (191): 26-43.
- [4] 崔江流, 宿志一, 易辉. 我国硅橡胶复合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.
- [5] 吴碧华, 洗伟雄, 陈雄一. 广州地区输电线路用复合绝缘子的运行实践[J]. 电网技术, 2001, 25(5): 53-55, 73.  
Wu Bihua, Xian Weixiong, Chen Xiongyi. Operational experience of composite insulator for overhead transmission line in Guangzhou region[J]. Power System Technology, 2001, 25(5): 53-55, 73.
- [6] 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 FRP rod[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 30-32.
- [7] 梁曦东, 戴建军. 防护复合绝缘子芯棒脆断的方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 136-140.  
Liang Xidong, Dai Jianjun. A method for preventing brittle fracture of FRP rod of composite insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 136-140.
- [8] 张鸣, 陈勉. 500kV 罗北甲线合成绝缘子芯棒脆断原因分析[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 51-53.  
Zhang Ming, Chen Mian. Analysis on core brittle fracture of composite insulators in a certain 500 kV transmission line[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 51-53.
- [9] 谭章英, 舒先民, 马建国, 等. 500 kV 葛双一回复合绝缘子芯棒脆断原因分析[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 67-69.  
Tan Zhangying, Shu Xianmin, Ma Jianguo, et al. Analysis of a polymeric insulator core fracture on 500 kV Ge-Shuang No.1 transmission line[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 67-69.
- [10] 张畅生, 王晓刚, 黄立虹. 500 kV 惠汕线合成绝缘子芯棒脆断事故分析[J]. 电网技术, 2002, 26(6): 71-73.  
Zhang Changsheng, Wang Xiaogang, Huang Lihong. Analysis of composite insulator mandrill breaking on 500 kV Huishan line [J]. Power System Technology, 2002, 26(6): 71-73.
- [11] 舒印彪, 刘泽洪, 袁骏, 等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-12.  
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Yuan Jun, et al. A survey on demonstration of UHV power transmission by State Grid Corporation of China in the year of 2005[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 1-12.
- [12] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等.  $\pm 800$  kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.  
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Gao Liying, et al. A preliminary exploration for design of  $\pm 800$  kV UHVDC project with transmission capacity of 6400MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8.
- [13] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.  
Yuan Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3.
- [14] 周浩, 余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-9.  
Zhou Hao, Yu Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-9.
- [15] 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.
- [16] 应伟国, 周松尧. 500 kV 棒形悬式复合绝缘子芯棒脆断的预防措施[J]. 电瓷避雷器, 2004, (6): 9-11.  
Ying Weiguo, Zhou Songyao. Precaution for composite rod insulator of 500 kV against rod brittle fracture[J]. Insulators and Surge Arresters, 2004, (6): 9-11.
- [17] 孙昌富, 梁曦东, 周远翔, 等. 合成绝缘子动载性能的研究[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 33-36.  
Sun Changfu, Liang Xidong, Zhou Yuanxiang, et al. Research on dynamic load properties of composite insulators[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 33-36.
- [18] 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.
- [19] DL/T864-2004, 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[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [20] 王绍武. 污秽地区有机外绝缘特性的研究[D]. 北京: 清华大学, 2001.

收稿日期: 2006-05-29.

作者简介:

李庆峰(1977—), 男, 工程师, 从事高电压技术、输电线路外绝缘和带电作业研究, E-mail: liqf@epri.ac.cn;

宿志一(1946—), 男, 教授级高级工程师, 从事高电压技术、绝缘子、外绝缘等研究。

(责任编辑 沈杰)