

# 复合绝缘子憎水性检测技术研究进展

贺含峰<sup>1</sup>, 陈洪波<sup>2</sup>, 白欢<sup>2</sup>, 何松<sup>2</sup>, 刘涛<sup>2</sup>, 彭敬<sup>3</sup>

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610023; 2. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072;  
3. 重庆市电力公司璧山电业局, 重庆 402760)

**摘要:** 输电线路是否更换运行中的复合绝缘子需要客观、准确、快速、方便地评判出该复合绝缘子的憎水等级。在提出评判工作的标准后,对国内外憎水等级评判工作进行综述,总结了复合绝缘子憎水等级评判的研究现状。首先,对接触角法、喷水分级法以及表面张力法等几种传统的评判方法进行总结比较,并指出由于动态接触角法能够客观准确地评判出复合绝缘子的憎水等级,该法将广泛地利用于憎水等级评价工作中,尽管目前没有利用于憎水等级的在线评判。其次,对基于数字图像处理的憎水等级评判方法的过程进行总结,针对各个过程国内外所采取的方法进行比较、总结。最后,提出实现多因素多参量评判复合绝缘子憎水等级评判是今后工作的发展方向。

**关键词:** 复合绝缘子; 憎水性; 等级; 评价

**Abstract:** The current evaluation methods for hydrophobic nature of the composite insulators are summarized, including the basic evaluation methods, that is, the contact angle method, water spray classification and surface tension method, and the classification methods of hydrophobic nature based on digital image processing. The processes of classification methods of hydrophobic nature based on digital image processing are emphatically discussed and compared as well as the advantages and disadvantages of the adopted methods used in each process. In order to realize the on-line evaluation for hydrophobic nature of composite insulators objectively, accurately, rapidly and conveniently, some suggestions on using the dynamic contact angle to evaluate the hydrophobic nature of composite insulators on line are proposed. At last, it is put forward that using the multi-factor and multi-parameter to evaluate the hydrophobic nature of composite insulator is the development direction of the future researches.

**Key words:** composite insulator; hydrophobic nature; level; evaluation

中图分类号: TM211 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0063-06

## 0 引言

硅橡胶复合绝缘子具有低表面能、良好的憎水性以及憎水迁移性,能够有效地防止电力系统发生污秽闪络以及提高绝缘子的污闪电压<sup>[1-2]</sup>,目前,复合绝缘子已经广泛地应用于输电线路外绝缘中<sup>[3]</sup>。但是,中国十几年的复合绝缘子运行经验表明复合绝缘子耐污闪能力强不等于能够完全防止污闪事故的发生<sup>[4]</sup>。对复合绝缘子憎水等级的评判工作对于运行中的复合绝缘子是否退出线路运行具有重要的指导意义。

目前,国内外对于复合绝缘子憎水等级评判工作进行了研究,在分析国内外大量文献的基础之上,针对国内外复合绝缘子憎水等级评判工作了进行总

结,归纳了复合绝缘子憎水等级评判的研究现状。对于复合绝缘子憎水等级评价方法,其可行性从以下几方面考虑:客观、准确、实用、方便、适合于在线检测。

目前,国内外传统的复合绝缘子憎水等级评价方法分为:1) 接触角法;2) 表面张力法;3) 喷水分级法;4) 基于数字图像憎水性等级评判;5) 其他方法。

## 1 接触角法

液体在固体表面的接触角是反映液体在固体表面润湿特性的重要指标之一,通常人们所认为的接触角定义为:过气、液、固三相的接触点,向气-液界面做切线,该切线与液-固界面的夹角是接触角<sup>[5]</sup>。如图1所示, $\theta$ 即为静态接触角。文献[5-

7]指出:在相同的水滴体积下,材料表面静态接触角越大,憎水性越好。通常认为,静态接触角 $\theta > 90^\circ$ 时,表面呈憎水性; $\theta < 90^\circ$ 时,表面呈亲水性。所以,静态接触角可以作为评判憎水性的依据之一。

文献[10]利用接触角测量仪测量复合绝缘子表面静态接触角大小,并据此对复合绝缘子表面憎水性等级进行评判。

文献[8]同时指出,对于憎水性表面的憎水等级,静态接触角方法具有很好的区分性,但是对于亲水表面,这种方法的区分性很差。动态接触角评判憎水等级具有很好的区分性,对于研究液体在材料表面上的铺展有重要意义<sup>[9-11]</sup>,它能够很好地解释水珠或水迹在材料表面的润湿性,利用这种方法能够有效地对复合绝缘子表面憎水性进行分级<sup>[12]</sup>。目前,测量动态接触角的方法主要有如下3种<sup>[10, [12]]</sup>。

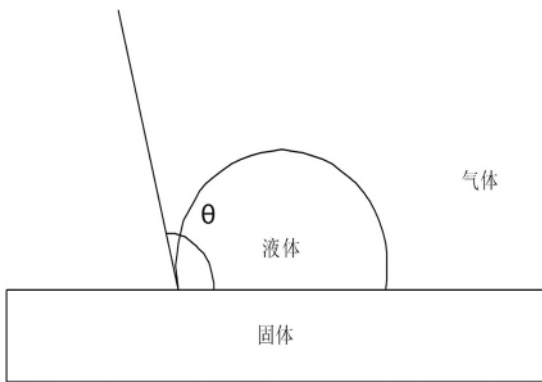


图1 接触角示意图

### 1) Wilhelmy 方法

文献[13]利用 Wilhelmy 方法测定硅橡胶板上的动态接触角。测量的方法如图2所示。首先将硅橡胶板以一定的速度浸入水中,在浸入水中的过程中,测量接触角,记为前进接触角 $\theta_a$ ;然后将硅橡胶板以一定速度从水中提出,测量接触角,记为后退接触角 $\theta_r$ 。此方法虽然比较精确,且排除了人为因素的干扰,但测量值与硅橡胶板浸入和提取的速度有关,不适合于在线检测憎水性。

### 2) 加液/减液法

文献[16]利用加液/减液法测量动态接触角。测量方法是:在固体表面形成液滴后,再以很低的速度向液滴加入液体,使其体积不断增大。开始时,液滴与固体表面的接触面积并不发生变化,接触角渐渐增大。当液滴的体积增大到某一临界值时,液滴

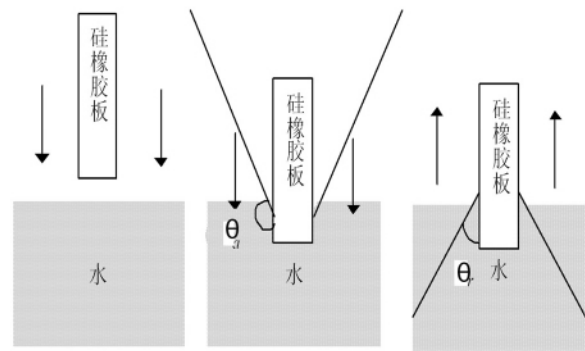


图2 Wilhelmy 方法测量动态接触角

在固体表面的三相接触线发生往外移动,而在发生移动瞬间的接触角,被称为前进接触角 $\theta_a$ 。在此之后,接触角基本保持不变。反之,如果从已形成的液滴不断地以很低的速度把液体吸走,使其体积减小。开始时,液滴与固体表面的接触面积也并不发生变化,但接触角逐渐减小。当液滴的体积减小到一定值时,液滴在固体表面的固/液/气三相接触线开始往里移动。在发生这一移动前的接触角,就是后退接触角 $\theta_r$ 。在此之后,接触角也应基本保持不变。利用加液/减液法测量动态接触角精度高,并能有效区分憎水等级,但是不利于实现憎水性的在线监测。

### 3) 斜面法

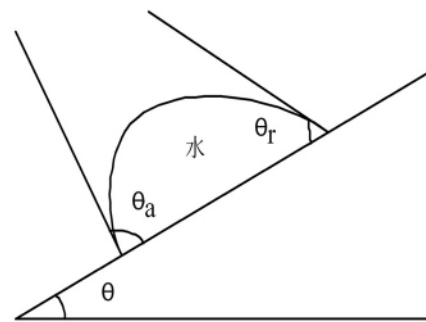


图3 斜面法测量动态接触角

文献[7, 12, 14, 15]利用水珠在倾斜表面测量其前进接触角和后退接触角。具体方法是:将足够大体积的液滴置于待测的样品表面后,把样品表面朝一方缓慢、不断地倾斜。开始时液滴不发生移动,而只是其中的液体由后方向前方转移,使得前方的接触角不断增大,而后方的不断缩小。当倾斜到一定角度时,液滴开始发生滑动。发生滑动前夕液滴的前角就是前进接触角 $\theta_a$ ,后角则为后退接触角 $\theta_r$ 。斜面倾斜的角度 $\theta$ 称为滚动角,如图3所示。斜面法较前面两种方法操作简单,更适合于在线检测复合绝缘子憎水性,今后工作的重点是实现斜面

法的在线监测复合绝缘子的憎水性。

## 2 表面张力法

表面张力法<sup>[16-18]</sup>使用具有不同表面张力的一组液体以确定绝缘子的憎水性。采用3个张力范围内的液体混合物:低范围(30~56 mN/m, 20℃)为甲酰胺和乙二醇单乙醚;中等范围(58~73 mN/m, 20℃)为甲酰胺和蒸馏水;高范围(73~82 mN/m, 20℃)为蒸馏水和氯化钠。将少量混合物轻轻喷洒在直径大约为25 mm的试样表面上,记录液体连续层分裂为小液滴所需要的时间。连续层在试样表面保持时间最接近2 s的混合物所具有的表面张力被定义为被测试品的表面张力。由于表面张力法中所使用的部分液体如甲酰胺对人体有害<sup>[16,19]</sup>,目前还没有得到广泛的应用。

表1 HC法憎水性分级(HC值)判断标准

HC	试样表面水滴状态描述
HC1	仅形成分立的小水滴,当垂直于其表面观察时,它的形状差不多是圆形的。相应的这些小水滴的 $\theta_r = 80^\circ$ 或更大些。
HC2	仅形成分立的小水滴,其表面的大部分是由这样的小水滴所覆盖,当垂直于其表面观察,还是规则的圆形,但离圆形形状有些偏离。相应的这些小水滴大部分的 $\theta_r: 50^\circ < \theta_r < 80^\circ$ 。
HC3	仅形成分立的小水滴。其表面的大部分由不规则形状的小水滴所覆盖。相应的这些小水滴大部分的 $\theta_r: 20^\circ < \theta_r < 50^\circ$ 。
HC4	观察到的由水珠或水膜覆盖的面积小于10%。观察到分立的小水滴和来自水膜的湿润的痕迹(即某些小水滴 $\theta_r = 0^\circ$ )。观察到的由水珠或水膜覆盖的面积大于10%但小于90%。
HC5	观察到分立的小水滴和来自水膜的湿润的痕迹(即某些小水滴 $\theta_r = 0^\circ$ )。观察到的由水膜覆盖的面积大于90%但小于100% (即仍然能观察到很小的未湿润面积/点/痕迹)。
HC6	100% (即仍然能观察到很小的未湿润面积/点/痕迹)。
HC7	在观察的整个面积上形成了连续的水膜。

## 3 喷水分级法

喷水分级法<sup>[20]</sup>是由瑞典输配电研究所(Swedish Transmission Research Institute, STRI)提出。具体方法是:用普通喷壶对试样表面喷洒水雾,观察水珠在试样表面的分布情况,对比分级判据和标准图

片,得出绝缘子表面的憎水性状况。根据运行状态下倾斜伞裙表面水滴的后退角 $\theta_r$ (倾斜表面水珠的接触角之一)和水膜的覆盖面积两个物理量联合判断。憎水性分为7级(分别表示为HC1~HC7),HC1级对应憎水性很强的表面,HC7级对应完全亲水性的表面。憎水性分级(HC值)判断标准见表1。

在IEC/TS 62073-2003<sup>[18]</sup>中,“HC等级”被重新命名为“WC等级”(wettability class),但WC各等级所对应的绝缘子表面湿润状态与HC等级所对应的完全一致<sup>[16]</sup>。

喷水分级法操作简单,易于现场测试,目前国内外较为广泛地采用这种方法<sup>[2,21-28]</sup>。但是该方法是一种人工肉眼判断的方法,对人的主观依赖性很大,只适合于做定性的分析<sup>[6]</sup>,因此要寻找更为客观可靠的憎水等级评判方法。

## 4 基于数字图像处理的憎水等级评判

近年来,随计算机技术和数码技术的飞速发展,运用图像处理方法评判复合绝缘子憎水等级的方法得到快速应用和发展。基于数字图像处理的憎水等级评价方法基本步骤如图4所示。首先进行图像采集,然后对图像进行增强去噪处理,使水珠边缘更加清晰,然后对水珠或水迹区域进行分割,提取水珠或水迹的边界,最后对水珠边界的特征量进行提取,针对提取的特征量实现憎水性的分级处理。

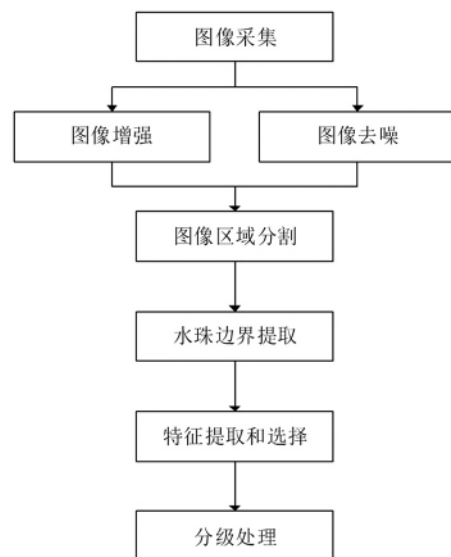


图4 基于数字图像处理憎水评价基本步骤

### 4.1 特征值提取

准确地提取水珠边界后,为了实现复合绝缘子

憎水等级的定量评判,必须对水珠的特征值进行提取。在不同憎水性复合绝缘子表面,水珠的特点如表2所示。

根据表2中的水珠特点,得到描述水珠的各种特征量。其中,文献[38-55]设正整数 $N$ 为识别出的水珠轮廓数, $S_i, C_i, (x_i, y_i)$ 分别为水珠 $i$  ( $0 \leq i \leq N$ )的面积、周长和包围矩形的中心坐标,通过水珠在不同憎水表面,提出了以下特征量。

表2 水珠特点

憎水等级	憎水性最好	憎水性下降	憎水性完全丧失
形状	孤立的球型水珠	水珠扁平、变得不规则	水膜
单个水珠/水膜体积个数	最小 很多	变大 个数减小	一片水膜 连成一片
水珠照片特点	透明而且反光,中间部分要明显比整个试样表面更为明亮,而水珠的边缘部分则要比整个试样表面更暗	反光能力下降	反光能力严重下降
灰度频率	灰度值分布于各个灰度级	部分灰度级出现的频率减小	集中在某个灰度级
灰度信息量	信息量大	信息量减小	信息最小

水珠覆盖率  $cover$  为

$$cover = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{LW}$$

水珠分布均匀度  $dis - uni$  为

$$dis - uni = \frac{\sum_{row=0col=0}^2 \sum_{col=0}^2 \frac{n(row, col)}{N} \ln\left(\frac{n(row, col)}{N}\right)}{Z}$$

其中  $Z$  是归一化因子  $n(row, col)$  由下式计算

$$\left| col * \frac{L}{3} \leq x_i \leq (col + 1) * \frac{L}{3}; row * \frac{W}{3} \leq y_i \leq (row + 1) * \frac{W}{3} \right|$$

水珠大小均匀度  $area - uni$  为

$$area - uni = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})}{N\bar{S}} \quad \text{其中 } \bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{N}$$

水珠平均圆度  $plum$  为

$$plum = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{4\pi S_i}{C_i^2}}{N}$$

另外,由瑞典的 M. Berg 提出的均焔法<sup>[56-57]</sup>采用通过提取图片的亮度信息,计算出标准均焔对复合绝缘子憎水性进行评判。但是,由于拍摄现场的光照强度、拍摄角度以及绝缘子的污秽背景均不可控,利用标准均焔表征憎水性等级的效果并不好。

目前,应用比较广泛且很实用的特征值提取方法是形状因子法和最大面积法。

由日本的 T. Tokoro 提出的形状因子法<sup>[58-59]</sup>是根据  $f_c$  的值来判断憎水性等级(HC),  $f_c$  定义为

$$f_c = \frac{4\pi a}{c^2}$$

式中  $a$  是最大水珠的面积;  $c$  是最大水珠的周长。

为了提高判别的准确率,在形状因子的基础上,文献[42-49]根据最大水珠面积与憎水性好坏的对对应关系提出最大面积法。最大面积比  $k$  定义为

$$k = \frac{\text{最大水珠(或水迹)的面积}}{\text{图像总面积}}$$

由于形状因子法和最大面积法特征值的简单性和易操作性,广泛地被利用于复合绝缘子憎水等级评判工作中。

另外,在充分考虑复合绝缘子的憎水丧失以及憎水迁移等特性的基础上,文献[60]利用清洁表面接触角、染污表面接触角、憎水恢复接触角、憎水转移接触角等4个特征值对复合绝缘子憎水性进行判断。该方法充分考虑了复合绝缘子的憎水丧失及其迁移等特性,能够有效客观地对复合绝缘子憎水性进行评判。

#### 4.2 憎水分级

在获取到水珠/水迹的特征值之后,中心任务就是利用这些参数来确定憎水等级。

当提取的特征值只有1个时,根据大量的憎水图片统计以及憎水等级标准图片对照的结果,对憎水等级进行分类。目前应用比较广泛的是采用形状因子法<sup>[58-59]</sup>、改进的形状因子法、均焔法<sup>[56-57]</sup>进行憎水等级判别。根据特征值属于不同的取值范围确定憎水级别,这种方法易受噪声干扰的影响,图像获取时采光和拍摄距离、图像处理的阈值和噪声都对提取的特征值有较大的影响,因此,利用1个特征值实现憎水等级评判时存在很大的误差。

当提取的特征值较多时,国内外目前有两种方法进行评判。第一种方法是利用考虑各个因素综合评判复合绝缘子的憎水等级,如文献[60]利用四因

素法(即清洁表面接触角、染污表面接触角、憎水恢复接触角、憎水转移接触角)实现憎水等级评判。第二种方法是利用分类模型,国内外在憎水分级中应用的分类模型有K-近邻法、支持向量机法等。文献[61]利用K-近邻法对憎水性进行分类,文献[38]利用支持向量机实现憎水性的分级。多个特征值的分类算法客观精确,分级的误差比较小,能够有效地客观地评判复合绝缘子的憎水性。因此,利用多因素方法评判复合绝缘子憎水性是今后进行复合绝缘子憎水评级工作的重点。

## 5 其他方法

文献[29]直接通过湿润条件下的表面电阻或泄漏电流来表征材料的憎水性。文献[30,31]利用高聚合物表面荷电能力的强弱来定量描述有机材料的憎水性,这两种方法能够有效评判复合绝缘子表面憎水性,但是目前很少被使用。

## 6 总结

评价憎水分级方法优劣的标准是:准确、客观、快速、方便地对实现憎水性分级处理。国内外现有的憎水等级的评价的方法很多,但是目前所取得的效果不甚理想。

对于传统的复合绝缘子憎水等级评判工作,倾向使用动态接触角法实现憎水性的分级,今后研究重点是实现该方法的在线检测,开发实用便利的在线检测憎水等级装置。

对于基于数字图像处理的复合绝缘子憎水等级评判工作,如何准确快速地提取水珠的真实边界是未来工作的重要方向,同时为了客观反映憎水等级,实现多因素多参量综合评判憎水等级成为今后工作的重要方向。

### 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.  
[2] 胡毅. 送电线路绝缘子运行性能及分析[J]. 高电压技术,2001,27(2):33-35.  
[3] 刘泽洪. 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.

[4] 熊俊. 污湿环境中复合绝缘子泄漏电流特性与湿润模的研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.  
[5] 徐志钮,律方成,赵鹏,等. 拟合方法用于硅橡胶静态接触角的测量[J]. 高电压技术,2009,25(10):2475-2480.  
[6] 黄晓明. 基于图像分析技术的复合绝缘子憎水性判断方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.  
[7] 张世文,廉育英. 憎水性与接触角的测量[J]. 现代计量测试,1994(3):36-41.  
[8] T. Tokoro, T. Inoki, E. Wada, et al. Diagnosis of Degradation Condition of Silicone Rubber Using Hydrophobic Surface Analysis [C]. ISEIM 2008: Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating. Ed. Eds., 2008(1):89.  
[9] 王晓东,彭晓峰,陆建峰,等. 粗糙表面接触角滞后现象分析[J]. 热科学与技术,2003,2(3):230-234.  
[10] 王晓东,彭晓峰,王补宣. 动态湿润与动态接触角研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报,2003,11(4):396-404.  
[11] 王晓东,彭晓峰,闵敬春. 接触角滞后现象的理论分析[J]. 工程热物理学报,2002,23(1):67-70.  
[12] H Hillborgl, UW Gedde. Hydrophobicity Changes in Silicone Rubbers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5):703-717.  
[13] HOMMA Hiroya, LEE Chang-Ryong, KUROYAGI Toshiyuki. Evaluation of Time Variation of Hydrophobicity of Silicone Rubber Using Dynamic Contact Angle Measurement [C]. Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Ed. Eds., 2000(1):637-640.  
[14] 田建华,袁建州. 合成绝缘表面憎水性分级方法介绍[J]. 华北电力技术,1998(5):35-37.  
[15] 田建华. 合成绝缘子憎水性分级试验方法[J]. 电力建设,1998(6):56-57.  
[16] 赵林杰,王浩锐,李成榕,等. 复合绝缘子憎水性带电检测技术的发展与应用[J]. 南方电网技术研究,2007,3(2):38-41.  
[17] Guidance on the Measurement to Wettability of Insulator Surfaces [S], 2003.  
[18] IEC/TS 62073-2003. Guidance on the Measurement to Wettability of Insulator Surfaces [S]. International Electrotechnical Commission, 2003.  
[19] 邱志贤. 高压复合绝缘子及其应用[M]. 北京:中国电力出版社,2006.  
[20] STRI Guide 92-1. Hydrophobicity Classification Guide

- [Z]. Swedish Transmission Research Institute, 1992.
- [21] 李震宇, 崔吉峰, 周远翔, 等. 现场运行复合绝缘子憎水性的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 24-26.
- [22] 李名加. 10 kV 合成绝缘子沿面电场分布计算及其憎水性变化因素分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [23] H Janssen, A Herden, HC Kamer. Lmw Components in Silicone Rubbers and Epoxy Resins [C]. High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on Ed. Eds., 1999(1): 23-27.
- [24] 鲁志伟. 复合绝缘材料憎水性和憎水迁移性的度量[J]. 华北电力技术, 1999(12): 50-51.
- [25] 张福林, 刘地. 复合绝缘子伞套绝缘结构表面憎水性能特点分析[J]. 电瓷避雷器, 2002(2): 3-5 9.
- [26] 袁检, 张建荣, 吴经锋, 等. 复合绝缘子憎水性机理分析[J]. 绝缘材料, 2002(2): 1-3.
- [27] 鲁志伟, 杨秀媛. 硅橡胶憎水迁移机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 51-55 73.
- [28] 于永清. 丧失憎水性的直流复合绝缘子耐污特性[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 12-15.
- [29] Liang Xidong, Cheng Xupeng, Xue Jiaqi. Effective Contaminant Deposit density a New Concept of the Pollution Level of Composite Insulators [C]. Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Ed. Eds.: Brisbane, 1994(1): 523-525.
- [30] RS Gorur, JW Chang, OG Amburgey. Surface Hydrophobicity of Polymers Used for Outdoor Insulation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4): 1923-1933.
- [31] Chang JW, Gorur RS. Surface Recovery of Silicone Rubber Used for HV Outdoor Insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(6): 1039-1046.
- [32] 姜联堂, 甘露, 林均. 基于图像分析绝缘子憎水性分级系统[J]. 鄂州大学学报, 2007, 14(5): 5-7.
- [33] 程养春, 刘斌, 李成榕, 等. 超高压直流线路复合绝缘子检测方法的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 47-52.
- [34] 赵林杰, 李成榕, 熊俊, 等. 基于带电检测的复合绝缘子憎水性评价[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 135-142.
- [35] 吴旭涛. 运行中复合绝缘子憎水性能的影响因素[J]. 宁夏电力, 2003(4): 45-46 57.
- [36] 宋伟, 赵林杰, 李成榕, 等. 复合绝缘子在线检测技术的发展[J]. 高电压技术, 2005, 33(5): 28-30.
- [37] 董文婷. 边缘检测方法在憎水性图像分析中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [38] 王泉德, 文必洋, 王先培. 采用图像识别和分类判定绝缘材料憎水等级[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(1): 93-98.
- [39] 周彬, 孙毅, 祁兵. 硅橡胶复合绝缘子憎水性图像分割算法[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2008, 13(1): 19-22.
- [40] 周彬. 基于数学形态学的图像处理算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [41] 唐良瑞, 董文婷, 孙毅. 基于模糊数学的绝缘子憎水性图像边缘检测算法[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 35-38 43.
- [42] 唐良瑞, 赵春辉, 祁兵. 基于蚁群算法的绝缘子憎水性等级判别方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1322-1327.
- [43] 赵春辉. 憎水性图像处理算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [44] 于文文, 孙毅, 唐良瑞. 基于区域相似特征的憎水性图像分割算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(7): 1747-1749, 1763.
- [45] 王香菊. 图像去噪方法及应用[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(27): 213-215.
- [46] 陶维亮, 王先培, 刘艳, 等. 复合绝缘子接触角的图像处理检测[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(2): 232-237 244.
- [47] 祁兵, 唐良瑞, 赵春辉. 绝缘子憎水性图像水珠/水迹形状提取算法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 19-24.
- [48] T Peli, D Malah. A Study of Edge Detection Algorithm [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1982, 20(1): 1-21.
- [49] 唐良瑞, 张晶, 孙毅. 基于信息测度和 Hausdorff 距离的复合绝缘子憎水性等级判定[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 35-41.
- [50] 祁兵, 唐良瑞, 张晶. 绝缘子憎水性图像检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 120-124.
- [51] 张晶. 基于 FCM 的绝缘子憎水性图像处理方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [52] 唐良瑞, 于文文, 陆俊. 基于 S-L 模型的憎水性图像水珠形状提取[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 37-39.
- [53] 于文文. 基于 Snake 模型的憎水性图像分割算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

(下转第 76 页)

影响较小,随着装机容量的逐渐增加,谐波含量可能超过国标要求,需要装设消谐装置解决此类问题。

(3) 针对分散式风电接入地区电网造成负荷预测、电网规划和运行的不确定性,提出进一步提高分散式风电功率预测准确率,根据历史运行情况,逐步将分散式风电出力纳入发电计划安排。同时根据政府地区发展规划,着眼于长远规划,根据地区风资源特性,合理研究分散式风电接入配套工程建设,避免临时性分散式风电建设打乱了地区电网建设的整体规划。

## 5 结 语

今后,分散式风电接入会越来越广泛,其主要的发展趋势是将基于多个布点的分散式风电系统接入同一配电网中进行统一调度、相互协调,为系统提供高峰电能以提高系统的稳定性和供电可靠性。虽然中国现状是风电模式还是传统集中接入,但是风电接入的发展方向将是分散式风电接入模式。

前面主要针对分散式风电接入后对地区电网运行带来的各种问题,分析分散式风电的特点、优点、接入方式以及运行方式对系统电压、继电保护动作情况、负荷预测等方面的影响。通过对分散式风电接入后带来的各种问题进行仔细分析,为今后分散

式风电的大规模发展提供了一定的理论指导和相关建议。

### 参考文献

- [1] 国家能源局. 国能新能[2011]226 国家能源局关于分散式接入风电开发的通知[R]. 2011.
- [2] 国家能源局. 国能新能[2011]374 国家能源局关于印发分散式接入风电项目开发建设指导意见的通知[R]. 2011.
- [3] 王敏,丁明. 含有分布式电源的配电网系统规划[J]. 农村电气化, 2003 (7): 19-20.
- [4] 王建,李兴源,邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 90-97.
- [5] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40.

作者简介:

孙立成(1982),男,工程师,研究方向为新能源、分布式电源规划运行研究;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术;

赵志强(1977),男,高级工程师,研究方向为电力系统规划运行。

(收稿日期:2012-12-29)

(上接第68页)

- [54] Qiuxia Yang, Liangrui Tang, Wenwen Yu. Waterdrops Shape Extraction of Hydrophobic Image Based on Snake Model [C]. Image and Signal Processing, 2009, Tianjin 2009(1): 1-3.
- [55] 彭亮. 水珠边缘检测算法的研究及其在电力行业中的应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [56] Marcus Berg, Rajeev Thottappillil, Viktor Scuka. A Digital Image Processing Method for Estimating the Level of Hydrophobicity of High voltage Polymeric Insulating Materials [C]. 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Ed. Eds, 1999(1): 756-762.
- [57] M Berg, R Thottappillil, V Scuka. Hydrophobicity Estimation of HV Polymeric Insulating Materials Development of a Digital image Processing Method [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1098-1107.
- [58] TETSURO Tokoro, YIKI Omoto, MASAMITSU Kosaki.

- Image Analysis of Hydrophobicity of Polymer Insulators Using PVM. [C]. 2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001, (1): 581-584.
- [59] T Tokoro, M Nagao, M Kosaki. Image Analysis of Hydrophobicity of Silicone Rubber Insulator [C]. 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999(1): 763-766.
- [60] Wang Xun, Liang Xidong, Zhou Yuanxiang, et al. Four-parameter Method for Hydrophobicity Judgement and Mechanism of Hydrophobicity Transfer Property [C]. Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, 2003(1): 1222-1225.
- [61] 彭克学,王泉德,王先培. 基于表面喷水图像分析的绝缘子表面憎水性检测方法[J]. 绝缘材料, 2005(1): 47-51.

(收稿日期:2012-12-27)