

基于 MATLAB 平台的复合绝缘子憎水性分析软件开发

闫 康

(国网石家庄市鹿泉区供电公司,河北 石家庄 050200)

摘要:复合绝缘子憎水性状况对于电力系统的安全稳定运行具有重要影响。为了准确、快捷、方便地识别复合绝缘子憎水性,借助 MATLAB 图像处理工具和 GUI 图形用户界面功能开发了一款复合绝缘子憎水性分析软件。该软件开发运用了模块化思想,建立了图像处理、水珠特征量提取、憎水性检测方法和数据库管理等功能模块;采用改进的 Canny 算子对图像进行分割,提取了水珠(或水迹)的特征;最后利用改进径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络对绝缘子憎水性进行分级。实验结果表明,该软件能够准确、客观地识别绝缘子憎水性等级,准确识别率高达 92%。避免了人为因素的影响,提高了工作效率,为现场运行人员提供了数据支持和参考。

关键词:复合绝缘子;憎水性;MATLAB;软件开发

中图分类号:TM216

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)05-0126-06

0 引言

硅橡胶复合绝缘子较瓷绝缘子与玻璃绝缘子具备抗拉强度高、防污闪性能优异、质量轻、日常运维检修方便、不易发生断裂、无零值等诸多优点,在我国电网建设中得到了广泛的应用,并逐步代替了历史上使用最多的传统瓷绝缘子和玻璃绝缘子。截至目前,已经积累了 30 余年的现场运行经验,为电网安全可靠运行提供了有力保障^[1]。相关研究文献显示,复合绝缘子优良的防污闪性能主要与其独特的憎水性能和憎水迁移性能密切相关。但电网实际运行经验和记录数据显示,由于受运行工作年限、外界运行环境污秽、光照紫外线以及电晕放电等诸多因素影响,复合绝缘子的硅橡胶伞裙会逐渐发生老化,严重者甚至会出现伞裙粉化现象,进而导致其憎水性能和憎水迁移性逐步出现不同程度的下降,甚至完全丧失,致使复合绝缘子的耐污闪性能严重下降,给电网的安全、稳定、可靠运行带来重大隐患和风险^[2-6]。

为降低复合绝缘子憎水性能和憎水迁移性能致使电网发生污闪事故的风险,有必要对在网运行的复合绝缘子的憎水性能进行定期的检测和评价,对于检测不合格的复合绝缘子,根据其检测结果应及时列入检修计划,加强观察或尽快更换。常用的检测复合绝缘子憎水性的传统方法为表面张力法、静态接触角法和喷水分级法^[7-9]。其中,表面张力法和静态接触角法对检测时所处的外界环境因素要求很严格,检测结果较容易受外界因素影响,只适用于实验室条件下检测,不适用于在运行现场进行

大规模的检测^[10-11]。喷水分级法操作简便,检测速度快,广泛应用于运行现场对复合绝缘子憎水性能的检测。该方法由于是通过现场操作人员对比测试复合绝缘子的憎水性图像与标准图谱的相似程度,并参考憎水性等级分级判据得出绝缘子的憎水性等级,因此其检测结果会不可避免的因操作人员技能水平、经验水平不同而存在一定的主观差异性。

为了准确、客观地检测、评价复合绝缘子的憎水性等级,同时为实现在线检测复合复合绝缘子憎水性能提供可靠的检测平台,提高检测工作效率,文中借助 MATLAB 图像处理工具和 GUI 图形用户界面功能开发了一款复合绝缘子憎水性分析软件。该软件可以通过对复合绝缘子憎水性图像进行增强预处理,再利用改进的 Canny 算子和数学形态学对憎水性图像进行准确分割,进而提取憎水性图像相关特征量,最后利用改进的径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络根据提取的复合绝缘子相关特征量对其憎水性能进行准确分级。该软件有效避免了人为主观因素的影响,提高了检测精度和工作效率,为现场运行人员提供了可靠的数据支持和参考,并且有助于运维检修部门建立复合绝缘子运行数据档案库,根据复合绝缘子的实际运行状况合理制定检修计划,保障电网安全稳定运行。

1 软件的总体设计

复合绝缘子憎水性分析软件平台基于 MATLAB/GUI 设计,主要是借助、依托 MATLAB 软件平台的图像处理功能和科学计算功能, MATLAB 为创建用户界面提供了捷径(GUIDE),GUIDE 可以在界面设计过程中直接自动生成 M 文件框架,从而

大大减少了有关 GUI 应用程序创建工作,研发人员直接在此框架中填入自己编写的程序代码即可。

该软件的界面布局沿用了成熟的自顶向下的设计理念和方 法,共研发设计了 3 个用户操作界面:初始界面、主界面和子界面。基于模块化的设计思想,可将憎水性分析软件划分为几个功能相对独立的模块,该软件的模块结构如图 1 所示。

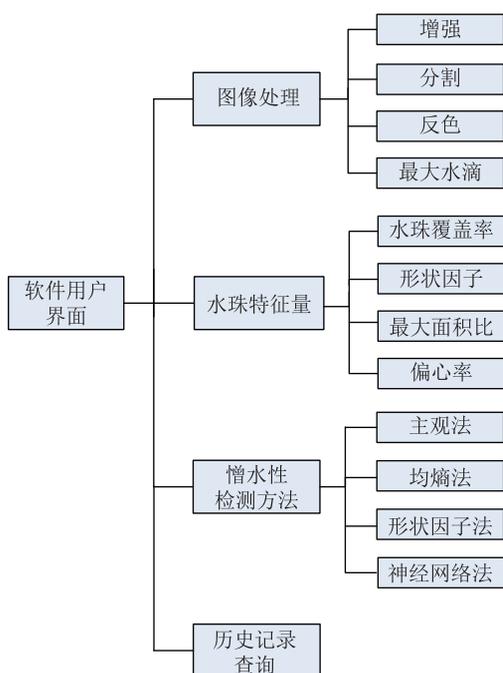


Fig.1 The module structure of software

2 软件的主要功能及实现

2.1 图像增强预处理

在网运行的复合绝缘子长期暴露于户外,不断遭受风霜雨雪、雾霾、光照、鸟粪等不利因素侵袭,因此,复合绝缘子伞裙的表面都覆盖有不同成分、不同程度的污秽。此外,受水珠(或水迹)的透明性以及水珠(或水迹)对光照的反射作用等不利因素影响,拍摄的复合绝缘子憎水性图像中水珠(或水迹)的边界比较模糊或昏暗不明,严重影响了对复合绝缘子憎水性图像中水珠(或水迹)的边界的识别、分割。为了有效克服上述诸多不利因素的影响,对憎水性图像运用滤波和增强技术进行处理,凸显复合绝缘子憎水性图像中水珠(或水迹)的边界信息十分必要。

文中采用基于同态滤波的自适应直方图均衡化方法^[12-13]对憎水性图像进行预处理。首先利用同态滤波法对憎水性图像进行增强处理,使水珠(或水迹)的边界细节信息得到增强,水珠(或水迹)的边界清晰可见。但处理后憎水性图像的灰度动

态范围较处理之前变得狭窄,致使整幅憎水性图像变得较为昏暗,为此,文中采用自适应直方图均衡化方法对憎水性图像进行进一步处理。该方法可以有效拓展图像的灰度动态范围,提高图像的亮度,改善图像的视觉效果,弥补了同态滤波的缺陷,二者联合使用能够取得较为理想的增强效果。

2.2 图像分割

图像分割的目标是把图像中感兴趣的部分细节信息从图像中提取出来。而在复合绝缘子憎水性检测工作中,准确分割憎水性图像是一个重要环节,对后续构建的网络模型准确识别绝缘子憎水性等级有着重要影响。

2.2.1 边缘提取

传统的 Canny 算子,图像边缘检测性能优良,检测效果较为稳定,技术成熟,因此,在数字图像处理领域得到了广泛的认可和使用。但是传统的 Canny 算子的阈值设置需要人工选择,即需要检测人员通过不断调整阈值寻找最佳的检测结果,阈值选择缺乏自适应选择能力^[14]。为此,文中将 Ostu 阈值法引入到 Canny 算子中,针对传统的 Canny 算子进行了改进。Ostu 阈值法^[15]是以最小二乘法的基本原理为基础推导出的一种自适应阈值确定方法,该方法能够根据不同憎水性图像的自身特点自适应的获取最佳阈值 K ,进而获得最佳的边缘检测效果,其表达式如下, $\delta^2(k)$ 表示图像类间距离:

$$K = \max \delta^2(k) \quad 1 \leq k \leq m \quad (1)$$

在传统 Canny 算子中引入 Ostu 阈值法,克服了传统 Canny 算子阈值选择需要人工确定的缺点,改进 Canny 算子在阈值选取方面具备了自适应选择能力,能够自主寻找最佳阈值,进而改善了图像边缘检测效果,大大提升了边缘检测效率。

2.2.2 数学形态学修正

数学形态学的基本思想为运用不同形态的结构元素去处理图像对应的形状以达到对图像分析和识别的目的。其基本运算包括膨胀运算、腐蚀运算、开运算和闭运算 4 种。由于受表面污秽、外界光照、拍摄相机本身性能及水珠本身的透明性、反光等诸多不利因素影响,运用改进的 Canny 算子检测出的绝缘子憎水性图像边界不可避免地会出现断线、不连续等现象。为此,文中引入了数学形态学对存在断线、不连续的部分憎水性图像的边界像进行修正,使得修正后的憎水性图像边界变得连续,并且与原图像能够保持高度相似。

2.3 特征量提取

提取了 4 个与绝缘子憎水性相关的特征量:最

大水珠(或水迹)的形状因子 f_c ,水珠覆盖率 A ,最大水珠(或水迹)与整幅图像的面积比 K ,最大水珠的偏心率 e 。相关文献证明这4个特征量能够很好地表征不同憎水性等级的图像特征^[16-17],其表达式如下:

(1) 形状因子:

$$f_c = \frac{4\pi S_{\max}}{l^2} \quad (2)$$

式中: S_{\max} 为最大水珠(或水迹)的面积; l 为最大水珠(或水迹)的周长。

(2) 水珠覆盖率:

$$A = \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{S} \quad (3)$$

式中: N 为识别出的水珠总数量; S_i 为第 i 个水珠的面积; S 表示图像的总面积。

(3) 最大面积比:

$$K = \frac{S_{\max}}{S} \quad (4)$$

(4) 偏心率:

$$e = \frac{a}{b} \quad (5)$$

式中: a 为最大水珠外接矩形的长轴; b 为最大水珠外接矩形的短轴。

2.4 改进的 RBF 神经网络识别模型

RBF神经网络^[7,18]是运用多维空间插值的传统技术,属于前向神经网络类型。该网络具备结构简单、训练方法简便、训练学习收敛速度快,能够很好拟合任意非线性函数等诸多优点,因此,适于建立非线性的复合绝缘子憎水性识别模型。

RBF神经网络结构主要由输入层、隐含层和输出层组成。输入层的作用是传输数据,即将图像的4个特征量:形状因子 f_c ,覆盖率 A ,面积比 K ,偏心率 e ,输入并传递到隐含层,由于径向基函数的形式对RBF网络性能影响不大,因此文中选取了使用广泛的高斯函数作为RBF神经网络的径向基函数,因此RBF神经网络的激活函数可以表示为:

$$R(x_p - c_i) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|x_p - c_i\|^2\right) \quad (6)$$

式中: $\|x_p - c_i\|$ 为欧式范数; x_p 为输入的特征量; c_i 为高斯函数的中心; σ 为高斯函数的均方差。

由RBF神经网络的结构可知,该网络的输入和输出存在如下映射关系:

$$y = \sum_{i=1}^h R(x_p - c_i) \quad (7)$$

式中: $R(x_p - c_i)$ 为激活函数; h 为隐含层节点数; y 为

输出向量,文中为绝缘子憎水性等级。

传统的RBF神经网络的训练速度与精度与学习算法中的径向基中心分布因子 S_c 的取值有关, S_c 的数值会影响网络结构,进而对训练精度和速度产生影响。因此,采用一种将网络训练误差引入 S_c ,使得 S_c 具备自适应调整能力,能够对各种复杂的复合绝缘子憎水性图像的特征值迅速学习并收敛,提高学习效率和精度。其选取如下:

$$S_c^* = f(S_c) + k\xi \quad (8)$$

式中: $\xi = |\min(E) - E^*|$; E^* 为设定训练误差; k 为适配因子; S_c^* 为自适应分布因子。

选取350组憎水性图像作为网络训练学习样本,网络误差目标设定为0.000 01,得出两种网络训练学习结果,如表1所示。

表1 训练学习结果
Tab.1 The training recognition

训练算法	训练后的均方误差 $\times 10^{-7}$	效率
传统 RBF	1.987 8	1.0
改进 RBF	1.944 2	1.45

由表可知,改进后的RBF训练精度提高了21.93%,训练效率提升了45%,表现出更高的训练精度和效率。

2.5 数据库管理

数据库被用来储存、管理复合绝缘子的各种信息,其中包含了数据分析统计、查询等功能,以Excel表格的方式输出、存储绝缘子的各种信息,为运维检修部门制定复合绝缘子检修计划提供有力的数据支持。

2.5.1 数据库设计

数据库设计是软件设计的重要组成部分,本软件采用关系型数据库SQL Server 2005来保存绝缘子的相关信息数据。数据库由绝缘子信息数据表组成,绝缘子信息数据表主要是用来记录绝缘子的基本信息和憎水性检测结果信息,该表的结构和关键字段有复合绝缘子型号、供应商、投运时间、运行年限、检测日期、检测位置、所在地区、污染情况、降雨量等级、检测方法、憎水性等级、检测员、检测日期等。

2.5.2 数据库操作

对数据库的操作主要有与数据库的连接、绝缘子信息的录入、修改、历史记录查询等操作。该软件在历史记录查询界面设置了4个查询选项,分别为:检测日期、绝缘子型号、憎水性等级、检测员,各选项之间可以选择“并且”或“或者”逻辑组合进行查询。

3 软件应用效果

选取了从现场退运的 120 支复合绝缘子作为试样,这些复合绝缘子的运行年限、生产厂家、运行地点不尽相同,由专业人员对这些复合绝缘子的不同部位的伞裙按照规程进行喷水,并拍摄憎水性图像,然后,由经验丰富的专家对比憎水性图像和标准图谱的相似度,完成憎水性等级的判定。共计拍摄了 1000 余幅图像,部分憎水性图像如图 2 所示。选取了其中 350 幅图像作为测试样本数据,其中每个憎水性等级样本各有 50 幅,利用此软件对样本复合绝缘子图像的憎水性等级进行识别,将识别结果与预先由专家判定的憎水性等级进行对比,以验证该软件的识别结果是否准确,识别结果如表 2 所示。

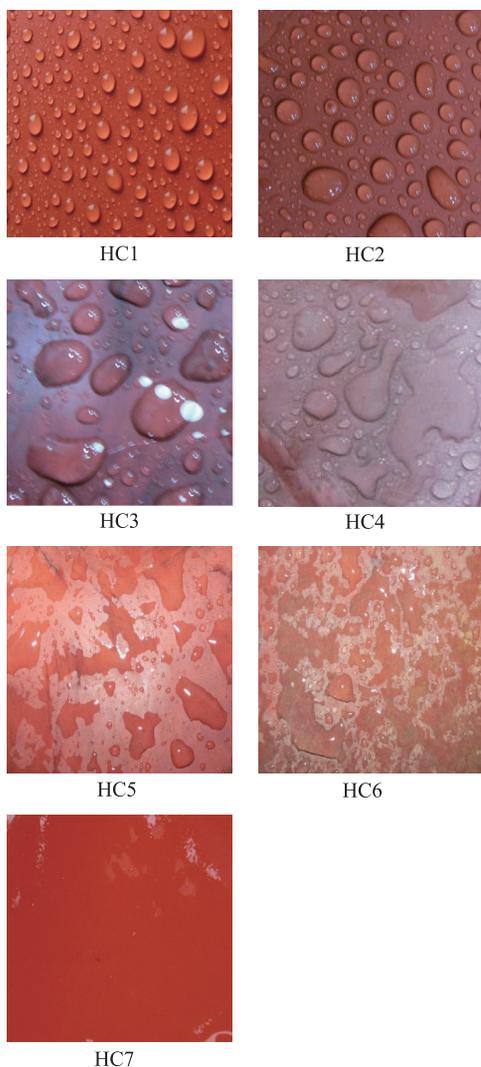


图 2 部分憎水性图像

Fig.2 Some hydrophobic images

从表 2 可以看出,软件识别模型对 HC4 和 HC5 两个憎水性等级的识别准确率较低,分别是 88% 和 86%。这可能是由两个原因造成的,一是这两个憎

表 2 识别结果

Tab.2 The results of recognition

憎水性等级	误判等级/误判个数	总误判个数	总样本数	正确率/%
HC1	HC2/2	2	50	96
HC2	HC1/3	3	50	94
HC3	HC2/2 HC4/2	4	50	92
HC4	HC3/1 HC5/5	6	50	88
HC5	HC4/5 HC6/2	7	50	86
HC6	HC5/2	2	50	96
HC7	HC6/3	3	50	94
总识别率				92

水性等级相邻,其憎水性图像相似性较高,准确区分比较困难;二是选取的训练样本的数量不够多,致使构建的识别网络模型不够健全、稳定。其他 5 个憎水性等级的判断正确率均达到或超过 92%,总识别率也达到 92%。

4 结语

借助于 MATLAB/GUI 平台开发设计了复合绝缘子憎水性分析软件,该软件具有以下优点:

(1) 能够有效识别复合绝缘子的憎水性等级,对憎水性等级为 HC1、HC2、HC3、HC6 和 HC7 的憎水性图像识别率最高,正确率均达到 92%;对憎水性等级为 HC4 和 HC5 的平均识别率偏低,但正确率均达到 86%,总的识别率达到 92%;即使发生误判,也是发生在相邻憎水性等级之间,能够满足工程实际要求;克服了人为主观因素的影响,使得检测结果更为客观准确。

(2) 为实现在线检测复合绝缘子憎水性提供了检测平台,缩短了检测时间,提高了工作效率,同时方便了运维检修部门工作人员对检测数据的管理和查询,为后续绝缘子的检修提供数据支持。

(3) 软件操作界面设计合理,功能分区合理,便于操作人员操作和后期升级维护。

参考文献:

[1] 刘贞瑶,谈发力,康宇斌,等. 输电线路树木故障机理分析及试验研究[J]. 电力工程技术,2017,36(6):122-124.
LIU Zhenyao, TAN Fali, KANG Yubin, et al. Mechanism analysis and experimental study of transmission line tree-related failures[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(6): 122-124.

[2] 徐 伟,路永玲,唐梦颖,等. 江苏电网近年雷电活动及输电线路雷击跳闸分析[J]. 电力工程技术,2017,36(6):106

- 108.
- XU Wei, LU Yongling, TANG Mengying, et al. Analysis of lightning activities and transmission line lightning strike tripping in Jiangsu power gride in recent years[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 106-108.
- [3] 屠幼萍, 陈静静, 许卓, 等. 长期运行复合绝缘子憎水性的非均匀变化特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1469-1471.
- TU Youping, CHEN Jingjing, XU Zhuo, et al. Uneven change characteristic of composite insulators hydrophobicity in Long-time service [J]. High Voltage Engineering, 2013, 6(39): 1469-1471.
- [4] 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): 3021-3023.
- 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): 3021-3023.
- [5] 申文伟, 宋伟, 王国利, 等. 复合绝缘子 HTV 硅橡胶材料老化特性的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 1-3.
- SHEN Wenwei, SONG Wei, WANG Guoli, et al. Influence of corona discharge on aging characteristics of HTV silicone rubber material [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 1-3.
- [6] 彭向阳, 汪政, 许志海, 等. 酸碱老化对硅橡胶复合绝缘子憎水性能的影响[J]. 广东电力, 2017, 30(6): 110-114.
- PENG Xiangyang, WANG Zheng, XU Zhihai, et al. Influence of acid and alkali aging on hydrophobicity of silicone rubber composite insulator [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(6): 110-114.
- [7] 闫康, 赵辉, 许庆旺, 等. 基于图像处理与 RBF 神经网络的绝缘子憎水性识别方法的研究[J]. 高压电气, 2015, 51(1): 30-31.
- YAN Kang, ZHAO Hui, XU Qingwang, et al. Identification of insulator hydrophobicity based on image processing and RBF neural network [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 30-31.
- [8] 徐志钮, 律方成, 张翰韬, 等. 影响硅橡胶静态接触角测量结果的相关因素分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 147-149.
- XU Zhiniu, LYU Fangcheng, ZHANG Hantao, et al. Influencing factors of silicone rubber static contact angle measurement [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 147-149.
- [9] 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): 35-37.
- TANG Liangrui, DONG Wenting, SUN Yi. Hydrophobic image edge-detecting algorithm for insulator based on fuzzy mathematics theory [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 35-37.
- [10] 徐志钮, 律方成, 赵丽娟, 等. 憎水性材料接触角算法的选择及在硅橡胶憎水性检测中的应用[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 814-819.
- XU Zhiniu, LYU Fangcheng, ZHAO Lijuan, et al. Contact angle algorithm selection of hydrophobic material and its application in silicone rubber hydrophobicity detection [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 814-819.
- [11] R BARSCH, H JAHN, J LAMBRECHT. Test Methods for Polymeric Insulating Materials for Outdoor HV Insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 668-675.
- [12] 胡寅明, 赵海生, 李云川, 等. 一种基于同态滤波的红外图像增强新方法[J]. 红外技术, 2012, 34(4): 224-226.
- HU Douming, ZHAO Haisheng, LI Yunchuan, et al. A new approach to infrared image enhancement based on homomorphic filter [J]. Infrared Technology, 2012, 34(4): 224-226.
- [13] 吴成茂. 直方图均衡化的数学模型研究[J]. 电子学报, 2012, 41(3): 598-600.
- WU Chengmao. Studies on mathematical model of histogram equalization [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 41(3): 598-600.
- [14] 王佐成, 刘晓冬, 薛丽霞. Canny 算子边缘检测的一种改进方法[J]. 计算机工程应用 2010, 46(34): 202-204.
- WANG Zuo Cheng, LIU Xiaodong, XUE Lixia. Improved method of Canny operator edge detection [J]. Computer Engineering and Application, 2010, 46(34): 202-205.
- [15] 谢凤英, 赵丹培. VC++ 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 312-320.
- XIE Fengying, Zhao danpei. VC++ digital image processing [M]. Beijing: Publishing House of electronics industry, 2008: 312-320.
- [16] 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.
- YU Wenwen. Segmentation algorithm of hydrophobic image based on Snake model [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [17] 王昭辉. 基于图像分析的复合绝缘子憎水性诊断方法研究 [D]. 湖北: 湖北工业大学, 2012.
- WANG Zhaohui. Research on diagnosis of hydrophobicity of composite insulators based on image analysis. Hubei: Hubei University of Technology, 2012.
- [18] TOKORO T, OMOTO Y, KATAYAMA Y, et al. Image analysis of hydrophobicity and dielectric property of polymer insulating material [C] // Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002 Report Conference on IEEE, 2002: 347-350.

作者简介:



闫康

闫康(1987—),男,硕士,工程师,从事配网工程工作(E-mail: kanglove@126.com)。

The Development of Composite Insulators Hydrophobicity Analysis Software Based on MATLAB Platform

YAN Kang

(State Grid Luquan Power Supply Company, Shijiazhuang 050200, China)

Abstract: The hydrophobic condition of composite insulators has an important influence on the security and stability of power system. In order to identify hydrophobicity of composite insulators accurately, fast and conveniently, with the tools of MATLAB image processing and GUI developing composite insulators hydrophobicity analysis software. The software was developed using a modular thinking, the establishment of image processing, the amount of drops of water feature extraction, hydrophobicity detection methods and database management modules. The improved Canny operator was used for image segmentation, extraction characteristics of water drop (or water stains), finally the improved RBF neural network was used to analyse the insulators hydrophobicity grade. The results of experiment show that the software was able to identify insulators hydrophobicity grade accurately and objectively and its accurate recognition rate is as high as 92%. The software can avoid the influence of artificial factors, improve the work efficiency and provide data support and reference for field operation personnel.

Key words: composite insulators; hydrophobicity; MATLAB; software development

(编辑 方 晶)

(上接第 125 页)

Circuit Breaker Protection of 500 kV Transmission Line with UPFC

ZHU Xiaotong, ZHAO Qingchun, XIE Hua, LIU Kui, PAN Lei

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: As a powerful flexible AC transmission equipment, Unified Power Flow Controller (UPFC) has been further extended in the domestic power system and gradually applied in the 500 kV level system, circuit breaker protection in the 3/2 connecting mode of transmission line with UPFC will face new application problems. Based on the Southern SuZhou power grid 500 kV UPFC demonstration project, this paper analysis the circuit breaker protection device's special functional requirements in power system with UPFC. According to different connecting modes, the adaptability of circuit breaker protection and the combination strategy of circuit breaker protection and UPFC control protection in three phase inconsistent operation are proposed. All of this can effectively avoid the reclosing of circuit breaker protection with UPFC. The research improves operation reliability of UPFC system.

Key words: unified power flow controller(UPFC); circuit breaker protection; automatic reclosing; pole discrepancy

(编辑 钱 悦)