

中央高校基本科研业务费专项资金资助(项目编号:2014MS136)

Supported by "the Fundamental Research Funds for the Central Universities"

输电线路绝缘子泄漏电流去噪 和特征提取的研究

Transmission line insulator leakage current denoising and feature extraction

黄建才 著 ■



北京交通大学出版社

<http://www.bjtup.com.cn>

中央高校基本科研业务费专项资金资助(项目编号:2014MS136)

Supported by "the Fundamental Research Funds for the Central Universities"

输电线路绝缘子泄漏电流去噪 和特征提取的研究

黄建才 著

北京交通大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

全书共 6 章。第 1 章对研究意义进行了论述。第 2 章和第 3 章讨论了泄漏电流的去噪方法, 其中, 第 2 章给出了采用小波变换去除泄漏电流噪声时存在的问题及其解决方法, 第 3 章改进了固有时间尺度分解方法, 并给出了将其用于去除泄漏电流噪声时的处理策略。第 4 章给出了两个新的特征量。第 5 章和第 6 章研究了泄漏电流的诊断方法, 其中, 第 5 章讨论单分类器识别方法, 第 6 章讨论多分类器集成方法。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

输电线路绝缘子泄漏电流去噪和特征提取的研究 / 黄建才著. —北京: 北京交通大学出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-5121-2317-5

I. ①输… II. ①黄… III. ①输电线路-绝缘子-漏电流-杂散电流-控制 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 159906 号

策划编辑: 刘 辉

责任编辑: 刘 辉

特邀编辑: 刘广钦

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印 刷 者: 北京艺堂印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×230 印张: 8 字数: 184 千字

版 次: 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-2317-5/TM·66

印 数: 1~1 300 册 定价: 20.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

输电线路是电力系统传输电能的途径,是电网不可或缺的组成部分。架空输电线路中的绝缘子使用量非常大,担负着电气、机械和绝缘等多重功能,任何一串绝缘子发生闪络都会造成系统故障,有时还会引发破坏系统稳定的恶性事故。统计表明,绝缘子污闪已经成为威胁电力系统运行的头号杀手。因此,在线监测绝缘子状态具有重要的现实意义。在反映绝缘子状态的多种方法中,泄漏电流法具有监测设备简单、投入成本低、能够有效地反映绝缘子状态、适合在线监测等优点,成为在线监测绝缘子的有效途径。

由于受到强电磁场、采集设备等因素的影响,采集到的绝缘子泄漏电流中容易渗入噪声,为了有效展开对泄漏电流的分析,对其进行去噪成为必不可少的手段。为了分析泄漏电流,虽然有学者已经给出了多种特征量,但是,不同的特征量仅能从某一角度反映泄漏电流的性质。为了能够全面说明泄漏电流的发展规律,发掘新特征量具有重要的应用价值,通过泄漏电流特征量的分析,识别出绝缘子状态是监测系统的最终目的。本书以“泄漏电流去噪—泄漏电流的特征量提取—采用不同特征量进行状态识别”为主线,阐述了输电线路绝缘子泄漏电流处理中的主要问题,通过采用当前先进技术解决了所述问题。

本书包括6章。第1章对研究意义进行了论述。第2章和第3章讨论了泄漏电流的去噪方法,其中,第2章给出了采用小波变换去除泄漏电流噪声时存在的问题及其解决方法;第3章改进了固有时间尺度分解方法,并给出了将其用于去除泄漏电流噪声时的处理策略。之所以讨论了上述两种方法,是由于小波去噪应用场合较多,较为成熟,可用于工程应用,但改进后的固有时间尺度分解的去噪效果优于小波去噪,可在后期大量现场数据验证之后,作为替换小波去噪的选项。第4章给出了两个新的特征量。第5章和第6章研究了泄漏电流的诊断方法,其中,第5章讨论单分类器识别方法,第6章讨论多分类器集成方法。之所以从两个角度讨论诊断方法,是因为多分类器集成方法的精度优于单分类器,但需要更多的硬件和软件资源支撑,单分类器需要的资源远低于多分类器集成方法,可在不同的需求下,采用不同的策略。

本书中各章节的具体内容安排如下。

第1章为绪论部分。阐述了进行输电线路绝缘子泄漏电流在线监测的必要性,以及分析泄漏电流所用的去噪技术、特征量提取方法、分类识别算法等的研究现状和存在问题。

第2章阐述了采用小波变换对泄漏电流去噪时应解决的问题,并给出了相应的解决方法。需要解决的问题包括:选择小波基、确定阈值、计算分解层数。通过对试验和现场采集的泄漏电流的分析,提出了去噪时小波分解层数的定量计算公式,并给出了最佳小波基

和最佳阈值。

第3章对固有时间尺度分解算法进行了改进,并给出了基于改进算法的泄漏电流去噪方法。通过引入距离尺度解决了固有时间尺度分解算法的旋转混叠问题,提出了采用改进算法对泄漏电流去噪时分解次数的计算公式;在借鉴小波阈值合理性的基础上,结合改进算法的特殊性,给出了去除泄漏电流噪声时的阈值和去噪过程。

第4章提出了时域熵和频域熵作为输电线路绝缘子泄漏电流的新特征量。在采样频率和数据长度一定的情况下,泄漏电流绝对值在不同范围内分布点数不同。据此,提出了分布密度的概念,并根据熵能反映变量分布规律的特点,提出采用时域熵作为泄漏电流时域新特征量,并给出了计算时域熵的过程。泄漏电流除了在基波和谐波处的幅值特征明显外,在其他频率成分处的幅值也可能剧烈波动。为了自适应反映现场泄漏电流不同频域成分的变化规律,提出采用频域熵作为泄漏电流新的频域特征量,并给出了计算频域熵的过程。

第5章采用多分类相关向量机作为识别输电线路绝缘子泄漏电流波形类别的方法。确定了多分类相关向量机的输入向量、输出向量和核函数,并给出了识别绝缘子泄漏电流所属类别的过程。将时域熵和频域熵作为输入,对多分类相关向量机的效果进行了验证。

第6章为了增加分类识别的效果,采用多分类器集成的方法,通过整合多个基分类器的识别结果得出最终的诊断。为了实现分类器的多样性以提高整合效果,集成方法采用不同类别的基分类器,且向各个基分类器输入不同的特征量。给出了集成过程的框架图,阐述了各个部分的功能、算法配置和处理流程,并展望了使用云平台作为运行环境时的解决方案。

本书阐述的内容既考虑到了技术成熟度,又考虑到了技术的发展趋势,取得了一定的研究成果,可作为工程应用和理论研究的参考资料。

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,敬请读者给予批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 背景及意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.2.1 绝缘子泄漏电流去噪的研究现状	(3)
1.2.2 泄漏电流特征提取方法的研究现状	(5)
1.2.3 用模式识别对泄漏电流分析的现状	(7)
1.3 本书的主要研究内容和章节安排	(8)
参考文献	(9)
第 2 章 绝缘子泄漏电流的小波去噪研究	(20)
2.1 引言	(20)
2.2 小波变换和去噪原理	(20)
2.2.1 小波变换的原理	(20)
2.2.2 小波去噪的原理	(25)
2.3 去除泄漏电流噪声时小波基的选择	(28)
2.3.1 小波基选择的评价标准	(29)
2.3.2 试验设置	(30)
2.3.3 试验验证	(33)
2.4 泄漏电流去噪时小波阈值的选择	(37)
2.4.1 试验泄漏电流的去噪效果	(37)
2.4.2 现场泄漏电流的去噪效果	(39)
2.5 泄漏电流去噪时计算小波分解层数	(41)
2.5.1 分解层数的定量计算	(42)
2.5.2 试验验证	(43)
2.5.3 计算分解层数时应注意的问题	(46)
2.6 本章小结	(47)
参考文献	(47)

第 3 章 基于改进 ITD 的泄漏电流去噪研究	(50)
3.1 引言	(50)
3.2 ITD 方法简介	(51)
3.3 对 ITD 方法的改进	(55)
3.3.1 ITD 方法存在的问题	(55)
3.3.2 旋转混叠的解决	(57)
3.3.3 端点效应的解决	(58)
3.3.4 改进后的 ITD 分解过程	(59)
3.4 基于改进 ITD 的泄漏电流去噪研究	(60)
3.4.1 分解次数的计算	(60)
3.4.2 阈值的设置	(61)
3.4.3 去噪过程	(62)
3.5 基于改进 ITD 的分解和去噪效果验证	(62)
3.6 计算分解次数时应注意的问题	(65)
3.7 小波去噪和改进 ITD 去噪的比较	(65)
3.8 本章小结	(67)
参考文献	(68)
第 4 章 基于熵的绝缘子泄漏电流特征提取	(70)
4.1 引言	(70)
4.2 信息熵简介	(71)
4.3 基于时域熵的特征提取的研究	(71)
4.4 基于频域熵的特征提取的研究	(74)
4.5 熵特征的验证	(77)
4.5.1 泄漏电流波形	(77)
4.5.2 时域熵的验证	(78)
4.5.3 频域熵的验证	(79)
4.6 本章小结	(80)
参考文献	(80)
第 5 章 基于 m-RVM 的泄漏电流分类	(82)
5.1 引言	(82)
5.2 m-RVM 简介	(83)
5.2.1 m-RVM 模型的构建	(83)

5.2.2	m-RVM ₁	(84)
5.2.3	m-RVM ₂	(86)
5.3	基于 m-RVM 的泄漏电流分类研究	(87)
5.3.1	选择模型的输入向量	(87)
5.3.2	确定模型的输出量	(87)
5.3.3	选取模型的核函数	(90)
5.3.4	模型的选择	(90)
5.3.5	基于 m-RVM ₂ 的泄漏电流分类过程	(91)
5.3.6	试验数据验证	(91)
5.4	本章小结	(95)
	参考文献	(96)
第 6 章	基于多分类器集成的泄漏电流识别	(98)
6.1	多分类器集成简介	(98)
6.2	基于多分类器集成的泄漏电流识别简介	(99)
6.2.1	泄漏电流样本的分析	(99)
6.2.2	绝缘子泄漏电流多分类器诊断	(102)
6.3	试验结果	(112)
6.4	分类器集成的运行环境前瞻	(113)
6.5	小结	(116)
	参考文献	(116)

第1章

绪论

1.1 背景及意义

输电线路是电力系统传输电能的途径,是电网不可或缺的组成部分。随着建设现代电网体系的推进,对输电线路可靠性的要求越来越高。

架空输电线路中绝缘子的使用量非常大,担负着电气、机械和绝缘等多重作用。虽然输电线路绝缘子结构简单,但任何一串绝缘子闪络都会造成系统故障,有时还会引发破坏系统稳定的恶性事故。输电线路绝缘子长年暴露于大气中,空气中的尘土、盐碱、工业烟尘等各种微粒都可能附着在绝缘子表面,形成污秽层。污秽层在雾、露、毛毛雨等气象条件下会成为导电层,致使绝缘子的电气强度大大降低,从而发生放电,严重时 would 发展成污闪。污闪事故发生后,难以实现重合闸,从而造成大范围、长时间停电。近几年我国大气污染呈上升趋势,绝缘子的工作条件恶化,再加上老化因素,绝缘子污闪已经成为威胁电力系统运行的头号杀手^[1]。

清除输电线路绝缘子上的污秽是预防污闪发生的重要途径,但绝缘子污秽聚集到何种程度时进行清扫需要技术支持。文献[2]说明了当前常用的预防绝缘子污秽的措施主要包括4种,分别是:使用防污型绝缘子、定期清扫绝缘子、将防污涂料涂于绝缘子上、给绝缘子调爬增距。这些方法虽然能够清除污秽,但都是比较被动的策略,无法按照绝缘子的实时污秽信息执行去污工作,具有较大的盲目性,消耗的资源也比较大,甚至无法及时发现和杜绝污闪的发生。文献[3-7]也得出了与文献[2]类似的结论。目前,人们已经认识到:输电线路绝缘子的积污过程需要经历一定的阶段,若想实现有效、可靠预防污闪

的发生,需及时、准确掌握绝缘子的受污状态^[8]。绝缘子污秽在线监测已成为电业部门广泛采用的方法,可以科学指导绝缘子清污工作。

虽然当前存在多种表示输电线路绝缘子污秽的方法,但是,从这些方法是否适合在线监测、所用设备是否设计简单且价格便宜、处理结果是否有效等角度分析,泄漏电流法成为在线监测输电线路绝缘子状态的较好选择。已存在的输电线路绝缘子污秽表示方法主要包括:①国际大电网会议第33委员会推荐的等值附盐密度法、积分表面污层电导率法、绝缘子污闪梯度法、最大泄漏电流法和泄漏电流脉冲计数法;②其他学者提出的污秽日沉降密度法、盐浓度法、1%污液浓度电导率法、饱和盐密、大气质量指数、绝缘子电压分布和电场特性法、基于声发射技术的绝缘污秽放电检测、紫外线测试方法、红外线测试方法、基于图像的测试方法等^[1,9-20]。上述方法中,等值附盐密度法、积分表面污层电导率法、污秽的日沉降密度法、盐浓度法、1%污液浓度电导率法、饱和盐密法等需要人工参与^[1],不适合在线监测;大气质量指数法的实用性还需进一步研究^[1],才能得出确切答案。绝缘子污闪梯度法、基于声发射技术的绝缘污秽放电检测、紫外线测试方法、红外线测试方法和基于图像的测试方法等虽然可作为在线监测绝缘子状态的手段,但所用设备具有如下两方面的缺点:第一,设计较为复杂,增加了实现和维护的难度;第二,造价比较高,不适合大规模推广。泄漏电流是输电线路绝缘子上污秽、作用电压以及气象条件联合作用的结果,是一个动态参数,其实用性已得到了广大学者的承认。此外,泄漏电流、气象条件、作用电压可在线测得,且相关信号的采集设备设计较为简单、准确度较高、经济性较强、现场安装较为方便^[1]。架空输电线路绝缘子使用量大的特点决定了在线监测装置应具有经济、有效的特性。综上分析,泄漏电流法是在线监测输电线路绝缘子状态的较好选择。

在线监测输电线路绝缘子泄漏电流时,关于传输方式的选择既要考虑传输的有效性又要考虑成本的低廉性。若在采集端配置高端处理设备,以实现将信号处理之后的结果发到相关电业部门的目的,则造价太高(输电线路绝缘子数量大,若单个绝缘子上安装的处理设备价格较高,则势必造成整条输电线路投入的飙升)。将采集到的原始泄漏电流传输到处理中心之后再进行分析成为较好的选择。因此,如何传输原始泄漏电流信号成为一个需解决的重要问题。传统的在线监测输电线路绝缘子泄漏电流的方法主要通过GSM方式、RF和GSM结合的方式、GPRS和GSM结合的方式、3G CDMA方式等实现信号的传输^[21-24]。但由于绝缘子数量很大,若直接在每个绝缘子上安置这样一个通信模块,则投入成本较高。无线传感器网络的出现为在线监测绝缘子泄漏电流提供了一个经济、适用的解决途径^[25-31]。但传感器网络本身传输距离较短,难以将数据传输到远端的处理中心。采用无线传感器网络和GPRS相结合的方法既能有效降低成本,又能保证数据的远距离传输。

虽然泄漏电流法适合在线监测绝缘子状态,但是采集的泄漏电流中往往含有大量噪声。通过文献[1,32-45]可得出结论:在线监测绝缘子泄漏电流的系统往往工作在强电

磁场环境下,再加上其他因素的影响(比如采集设备本身的影响),采集到的泄漏电流信号容易渗入噪声,单靠有限的硬件滤波技术很难将泄漏电流中的大量噪声有效去除,只有增加有效的软件去噪方法,才能达到最佳的去噪效果。文献[46]报告称:电力载波、广播电波和输电线路会产生电晕脉冲,这些电晕脉冲会影响泄漏电流波形,从而产生干扰信号。文献[47]报告称:高压、电磁干扰和机械噪声会降低采集泄漏电流所用设备的灵敏度,从而严重影响泄漏电流的波形。对采集到的泄漏电流进行初步硬件滤波后,泄漏电流往往还含有大量的白噪声信号、连续周期性干扰信号,以及脉冲型干扰信号。其中,白噪声干扰的结果远大于其他两种干扰的结果,是去噪时应重点研究的对象。可见,由于泄漏电流中存在噪声,直接分析原始泄漏电流可能导致较大的误差,所以,对泄漏电流去噪显得尤为重要。文献[48-58]对泄漏电流的干扰源和泄漏电流中的有用信号进行了分析,为去除泄漏电流中的噪声提供了依据。

输电线路绝缘子泄漏电流波形多样,提取有效特征量是对泄漏电流分析的前提。虽然文献[1, 33-34, 59-104]提出了多种表征泄漏电流特征量的方法,但这些方法只描述了泄漏电流某些方面的特征,自身都有一定的不足^[105]。此外,文献[34]报告称:仅靠单一的特征量对绝缘子状态进行预测,其结果是不可靠的,需要综合多种特征量才能实现准确、有效预测。文献[106]也强调了寻找更多特征量的必要性。可见,挖掘泄漏电流更多特征量可弥补原有特征量的不足,有利于提高对泄漏电流分析的准确性。

随着信号处理技术的发展,采用模式识别方法分析泄漏电流,实现对泄漏电流波形分类和绝缘子状态预测成为近年来的研究热点之一^[105]。例如,文献[107-111]采用神经网络、模糊逻辑、支持向量机等对泄漏电流波形、绝缘子污秽度等进行了分析,但是这些方法有其自身的不足,例如,模糊逻辑不宜在工程中实际采用^[112];神经网络计算复杂度高^[113];支持向量机确定规范化系数时比较困难,且其核函数必须满足 Mercer 条件^[114-124]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 绝缘子泄漏电流去噪的研究现状

当前,国内外学者已提出了多种去除输电线路绝缘子泄漏电流噪声的方法,这些方法主要包括基于经验模式分解^[125](Empirical Mode Decomposition, EMD)的去噪方法、基于自适应对消的去噪方法和基于小波变换的去噪方法。

(1) 基于 EMD 的绝缘子泄漏电流去噪。文献[38-39]采用 EMD 方法对泄漏电流进行了去噪;文献[40]采用 EMD 的改进算法——集合经验模式分解^[126](Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)对泄漏电流进行了去噪。然而,EMD 方法会产

生虚假信号成分^[127],且产生的端点效应问题会向固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)内部传递^[127],从而导致问题范围的扩大化。此外,EMD的处理速度与数据相关^[127],该特性使得采用这种方法去除泄漏电流噪声时效率很低。

(2) 基于自适应对消的泄漏电流去噪。文献[41]采用自适应对消的方法去除泄漏电流噪声。其原理如下:同时采集含噪声的泄漏电流信号和环境噪声信号,并以二者作为处理对象,通过自适应对消算法去除泄漏电流中的噪声。该方法需要同时采集两种信号,使得采集设备在硬件设计和实现上较为复杂,并增加了安装时的难度。

(3) 基于小波变换的泄漏电流去噪。文献[42-44]提议采用小波变换去除泄漏电流中的噪声,且文献[45]更进一步指出:泄漏电流中的噪声主要体现在安全区($< 50\text{ mA}$),并比较了采用小波变换去除泄漏电流噪声时4种阈值的去噪效果。影响小波去噪效果的因素主要有小波基的选择、阈值的选择和分解层数的选择。仅解决阈值的选择问题是无法保证泄漏电流去噪达到最佳效果的。

①小波基的选择。当前,关于输电线路绝缘子泄漏电流去噪时小波基的选择问题还未见公开报道。多篇文献给出了其他领域中选择最优小波基的方法^[128-138],但是,小波基的选择应根据信号的特征和处理目的来确定^[139],其他领域确定的最优小波基不一定适合于输电线路绝缘子泄漏电流的去噪。例如,文献[128-130]采用相关函数的方法选择小波基,但若小波基的尺度发生变化,该相关值会发生变化。因此,采用这种方法判断小波基的选择是有缺陷的。文献[131]给出了分析稀疏信号时小波基的选择方法,但泄漏电流信号不适用于该方法中提到的稀疏信号的定义。因此,该文献给出的方法不能用于泄漏电流去噪时的小波基的选择。文献[132]给出了图像压缩中用到选择小波基的方法,但压缩图像与分析泄漏电流研究的侧重点不同,评价小波基优劣的方法也不同。因此,不能照搬该方法。文献[133]在压缩不同的图像时采用神经网络选择小波基,一方面,该方法需要大量的样本数据进行训练;另一方面,该方法应用的领域是对不同图像进行压缩,这与泄漏电流的去噪目的有很大不同。文献[134-135]强调选择的小波基应该能够精确地重构信号,然而,该文献没有给出精确重构信号和最佳去噪是等效的结论。对于泄漏电流来说,精确地重构信号并不一定保证该小波基就能够最佳去噪的同时,最大限度保留泄漏电流的周期分量和放电分量。即二者实现的目标并不一样,也就无法将该文献提出的方法直接用于泄漏电流去噪时小波基的选择问题。文献[136]提出采用模糊测量的方法进行小波基选择,但本书作者通过大量试验证明该方法不适合提取泄漏电流的陡脉冲值。文献[137]提出了用于判断选择小波基的一种方法,其思路如下:选择小波分解之后的细节,将细节中特征成分的能量和该细节的总能量的比值作为判断选择小波基的依据。但是,同一信号经不同小波基分解之后,得到的同一层细节的总能量并不相同,所以,该文献提出的方法在判断小波基选择方面具有不稳定性。文献[138]用目视的方法对小波分解的效果进行判断,缺少了评价的标准。可见,这些其他领域选择小波基的方法不同程度地存在一定的缺陷,将其用于绝缘子泄漏电流去噪是不妥的。

②小波分解层数的选择。当前,关于输电线路绝缘子泄漏电流去噪时小波分解层数的选择问题还未见公开报道。其他领域的多篇文献给出了处理相关领域信号时选择最佳小波分解层数的方法,但不一定适用于泄漏电流去噪。文献[139]指出:当信号的信噪比低时采用“最大分解层数”可以有效去噪,但绝缘子泄漏电流在某些工况下信噪比高,在某些工况下信噪比低,该文献只讨论了信噪比低时分解层数的选择问题,并没有讨论信噪比高时的情况。因此,该文献所提方法不适用于泄漏电流的去噪。文献[140]指出了小波基的选择和分解层数的选择非常重要,但是并没有给出获得这些量的最佳值的方法。文献[141]指出分解层数对去噪结果影响巨大,但也没有给出确定分解层数的方法。文献[142]给出了一种计算小波分解层数的方法,其思想如下:白噪声是纯随机过程,可以通过自相关序列来判断一个信号是否为白噪声;白噪声经小波分解后仍然是白噪声,可以通过计算分解后细节的自相关序列来判断该细节是否为白噪声,进而确定分解层数。但泄漏电流在发展过程中表现为非平稳性,某些成分的出现具有随机性,用该文献中所述的方法,可能会将有用成分错当成白噪声处理;另外,根据小波分解的原理,不同系数对应的频率区间存在交叉情况,确定小波分解层数,进而进行去噪,要充分认识这种交叉情况对去噪效果的影响,而该文献给出的方法没有考虑这方面的因素,在实际泄漏电流去噪中表现不佳。文献[143]指出:虽然在理论上小波可以无限分解,但应根据信号的自然特性或合适的标准选择分解层数,任何更多的分解层次都会造成有用频率成分的丢失,此文献没有提供分解层数的计算方法。可见,在众多讨论小波去噪的文献中,要么单一关注小波阈值对去噪的影响,而忽略小波分解层数的作用;要么只是定性给出小波分解层数对去噪影响巨大,而没有给出定量计算方法;要么虽然给出了定量的计算方法,但不适用于绝缘子泄漏电流的去噪。

由此可见,采用小波变换去除输电线路绝缘子泄漏电流噪声时,既能确定最优小波基和最佳阈值,又能给出分解层数的科学计算方法,对实现泄漏电流的最佳去噪具有重要的现实意义。

综上所述,虽然已有公开发表的文献讨论了输电线路绝缘子泄漏电流的去噪问题,但自身都有一定的不足,甚至有许多问题亟须解决。

1.2.2 泄漏电流特征提取方法的研究现状

用于提取输电线路绝缘子泄漏电流特征量的方法主要有基于时域的方法和基于频率的方法^[1,33-34,59-104]。

(1) 基于时域的绝缘子泄漏电流特征提取方法。基于时域的方法中用得最多、最有效的是临闪前最大泄漏电流法、超过一定幅值的泄漏电流脉冲计数法和有效值法^[1]。虽然这3种方法有一定的优势,但也存在一定的不足:①虽然可以通过临闪前最大泄漏电流预测闪络电压(二者之间存在一定的对应关系),但该值需要在湿润条件下才能获得,即临闪前最大泄漏电流法受环境影响比较大,适合那些经常湿润的地区,而干燥少雨的地区则

不宜采用该方法^[1]。此外,即使在湿润环境下,当湿润程度和绝缘子材料不同时,所设置的最大泄漏电流值有可能发生变化^[1]。因此,临闪前最大泄漏电流法的可靠性、科学性需要展开更加深入的研究^[1]。②虽然有某些文献采用超过一定幅值的泄漏电流脉冲计数法分析泄漏电流,比如文献[65-69]就以此方法表征泄漏电流的特征,且采用该方法能够粗略获得泄漏电流的描述信息,但绝缘子上产生的局部电弧时燃时灭,使得泄漏电流时大时小,导致难以确定超过一定幅值泄漏电流脉冲数与其他量(比如污秽度)之间的确切关系^[1]。此外,该方法无法从局部描述泄漏电流的特性,无法反映泄漏电流的波形特征。③虽然也经常有文献用有效值分析泄漏电流,比如文献[65, 70-71]采用有效值分析了泄漏电流的特征,文献[62]给出“有效值可较好的描述泄漏电流的整体特性”的结论,但该方法无法描述泄漏电流的局部特征^[1],比如泄漏电流波形的起伏程度信息就无法通过有效值观测得到。除了上述方法之外,还有其他时域分析技术被广大学者研究使用,例如,累积电荷法^[74-75]、均值法^[68, 71, 76]、标准差法^[77]、伏安图法^[78-79]、差分法^[80]、自相关函数法^[81]、相似性函数法^[82]、滑动均值技术^[82-83]、包络法^[85-87]等,但 these 方法都存在一定的不足^[105]。

(2) 基于频率的绝缘子泄漏电流特征提取方法。由于频率成分不仅与泄漏电流幅值有关,而且与泄漏电流波形有关,所以,基于频率的特征量提取方法得到了广泛应用^[105]。频率分析方法主要包括:①基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的分析方法。比如,日本电力工业中心研究所的 T. Suda 教授就采用 FFT 方法分别对实验室和现场泄漏电流进行了测量研究^[63-64]。首先,他将泄漏电流信号变换到频域;其次,提取 50 Hz、150 Hz、250 Hz 这 3 种频率成分的幅值;最后,研究了随着泄漏电流的发展这几个幅值的变化规律,从而得出可以将频率分量作为泄漏电流预警依据的重要结论。此外,文献[63-65, 67, 70-71, 90-95]调查了泄漏电流在各个阶段发展过程中频率成分的变化过程。文献[63-64, 81, 83, 86, 92-93, 96-99]调查了泄漏电流中的各谐波成分的变换规律。文献[94, 96]调查了泄漏电流所在的频带分布。不同谐波成分之间的比值也作为泄漏电流的特征被提了出来,例如,文献[93]以 3 次谐波和 5 次谐波的比值作为泄漏电流的特征;文献[97]以 5 次谐波和 3 次谐波的比值作为泄漏电流的特征;文献[62]以 3 次谐波和基波的比值作为泄漏电流的特征;文献[93, 100]以总谐波畸变率作为泄漏电流的特征。②基于功率谱的分析方法。例如,文献[144]采用现代功率谱方法对泄漏电流进行了分析,并得出了泄漏电流不同时功率谱的变化规律。③其他方法。小波变换、Hilbert-Huang 变换等方法在提取泄漏电流特征方面也得到应用。例如,文献[83, 102]采用小波变换对泄漏电流进行分解,得到多个细节,然后计算各个细节的标准差作为刻画泄漏电流的特征量;文献[103-104]将泄漏电流变换到边际谱,将边际谱分成不同的区段,进而计算泄漏电流的熵值,并以此作为泄漏电流的特征量。

虽然上述特征提取方法能够从多个方面对泄漏电流的特征进行分析,但是这些方法描述的方面仍然不够全面^[105],寻找更多的特征量以便更加全面地刻画泄漏电流的特征是非

常有必要的^[106]。正是出于上述原因,广大学者一直没有停止挖掘泄漏电流新特征量的工作。

1.2.3 用模式识别对泄漏电流分析的现状

近几年采用模式识别方法识别绝缘子泄漏电流波形、预测绝缘子状态得到广大学者的普遍重视,成为一种新的、有前途的分析方法。

(1) 绝缘子泄漏电流的聚类。文献[80]调查绝缘子表面的变化,以泄漏电流的均值和最大值为输入数据、以最近邻算法作为聚类技术,对泄漏电流数据进行了聚类。然而,最近邻算法的聚类结果依赖于初始选择的聚类中心,且结果容易陷入局部最优。

(2) 采用递归图分析泄漏电流。文献[94, 96]采用递归图分析方法从泄漏电流的频率成分中提取了波形发展的规律。这些文献将泄漏电流分为3个阶段:初始阶段、中间阶段和临闪前阶段,并认为高频成分的递归图可以用于识别各个阶段,尤其利于最后一个阶段的识别。但是,递归图只能进行定性分析,不能自动识别类别^[145]。

(3) 采用神经网络分析泄漏电流。文献[71]采用神经网络,以波形的均值作为输入数据,对泄漏电流波形进行了识别;文献[86]采用神经网络,以泄漏电流与运行电压之间的相位偏移、3次谐波、5次谐波为输入值,对覆冰绝缘子泄漏电流波形进行了监测;文献[92]采用神经网络,以每10 min的泄漏电流的初始值和斜度为输入值,对老化绝缘子的泄漏电流值进行了预测;文献[93]采用神经网络,以1~7奇次谐波、总谐波畸变率和3次与5次谐波比值为输入量,对绝缘子的老化状态进行了预测;文献[98]采用神经网络,以泄漏电流经FFT变换之后的前60个频率成分为输入值,对绝缘子表面活动进行了预测;文献[100]采用神经网络,以泄漏电流峰值、泄漏电流和运行电压之间的相位差、总谐波畸变率为输入值,对绝缘子的安全状态进行了预测;文献[101]采用神经网络,以均值、最大值、标准差、相对湿度和运行电压为输入值,预测了绝缘子的等值附盐密度;文献[108]采用神经网络,以泄漏电流最大值、运行电压、总的泄漏距离和运行电压梯度为输入值,对绝缘子闪络电压进行了预测。神经网络虽然能够较好地处理不确定性问题,但训练时需要大量的样本数据,导致该方法具有较高的计算复杂度^[113]。

(4) 采用模糊逻辑分析泄漏电流。文献[109]采用模糊逻辑,以泄漏电流有效值、环境湿度、温度、泄漏电流峰值、泄漏电流脉冲频度为输入,对绝缘子污秽进行了预测;文献[110]采用模糊逻辑,以电晕电流概率、泄漏电流有效值、泄漏电流峰值和泄漏电流脉冲频度为输入量,对绝缘子的绝缘状况进行了预测。虽然模糊逻辑能直接表达人类习惯上使用的逻辑含义,但是,该模型的输入量、输出量均是模糊集合,不易在工程中实际采用^[112]。

(5) 采用支持向量机分析泄漏电流。文献[111]采用最小二乘支持向量机,以泄漏电流有效值、泄漏电流脉冲峰值、泄漏电流脉冲频度、环境湿度、温度为输入量,对绝缘子的污秽度进行了预测。支持向量机虽然具有训练所需样本少、泛化能力强的优点,但在

确定规范化系数时比较困难,且要求支持向量机的核函数必须满足 Mercer 条件^[114-124];此外,支持向量机的输出为类别标识,而不是样本所属类别的概率值,在处理不确定问题时存在不足。

从单分类器角度来说,2008 年 Damoulasy 等人提出了多分类相关向量机 (Multiclass Relevance Vector Machine, m-RVM),该算法基于贝叶斯统计学习^[146-147],具有神经网络和支持向量机的双重优点,并克服了二者的缺陷。

从多分类器角度来说,多分类器集成算法是提高分类精度的有效途径,成为当前的研究热点之一^[148]。

综合 1.2.1 节、1.2.2 节、1.2.3 节的分析,课题的研究意义主要体现在:①研究有效去除输电线路绝缘子泄漏电流噪声的方法,为后续的分析工作提供良好的数据支持;②提取泄漏电流的新特征量,弥补已有特征量的不足,以实现泄漏电流更加全面的分析;③研究更加实用的模式识别方法,实现对绝缘子泄漏电流更加准确的分类,为输电线路运行和管理人员提供有用的决策信息。

1.3 本书的主要研究内容和章节安排

虽然不少学者对采用泄漏电流法在线监测输电线路绝缘子状态的课题进行了广泛研究,但仍然存在如下一些很关键的问题需要解决:泄漏电流的去噪问题有待进行更深入的研究;为了更全面地描述泄漏电流,有待进一步挖掘泄漏电流的新特征量;模式识别技术的发展为泄漏电流分析开辟了新的途径,但采用更加适用于泄漏电流分析的模式识别方法有待深入研究。

本书对输电线路绝缘子泄漏电流的去噪问题、新特征量提取问题以及应用新模式识别方法进行泄漏电流波形分类等问题展开研究,具体内容如下:

(1) 针对输电线路绝缘子泄漏电流存在大量噪声的问题,对采用小波去噪时需解决的关键问题进行深入研究。根据小波去噪的原理和泄漏电流能量的分布特征,给出判定小波停止分解的依据,并提出计算小波分解层数的公式。根据对试验和现场泄漏电流波形的分析,给出最优小波基和最佳阈值。通过对高压试验数据和现场数据进行去噪,验证所提方法的有效性。

(2) 针对输电线路绝缘子泄漏电流波形多样、噪声普遍存在的特点,为实现泄漏电流的自适应去噪,对固有时间尺度分解方法进行改进,并就基于改进固有时间尺度分解的去噪方法进行深入研究。固有时间尺度分解存在旋转混叠和端点效应的问题,通过在分解过程中引入距离尺度,有效解决旋转混叠的问题;通过引入两端延拓,有效解决端点效应。根据改进的固有时间尺度分解的特征,给出采用此方法对泄漏电流去噪时的阈值和分解次

数的计算方法。对基于改进固有尺度分解的泄漏电流去噪方法进行验证。

(3) 在采样频率和数据长度一定的前提下,绝缘子泄漏电流离散数据在不同范围内点数的分布不同。针对此特点,对泄漏电流离散采样点的分布规律进行深入研究。通过分析泄漏电流的分布情况,提出分布密度的概念。根据熵能够反映变量的分布规律的特性,提出采用时域熵描述泄漏电流离散数据分布规律的方法。对采用时域熵作为泄漏电流特征量的效果进行试验验证。

(4) 虽然绝缘子泄漏电流在频域的基波和谐波成分处具有明显的特征,但现场数据表明:许多其他频率处的值也非常明显,甚至超出谐波处的值。针对此特点,对如何自适应分析泄漏电流频域成分进行深入研究。提出采用频域熵作为泄漏电流频域的新特征量,并对其有效性进行了验证。

(5) 针对当前分析泄漏电流的模式识别方法存在不足,对采用优点更加明显的多分类相关向量机对泄漏电流波形进行分类时的关键问题展开研究。确定采用多分类相关向量机识别泄漏电流类别时的输入向量、输出向量、核函数,并给出识别过程。以交流人工污秽绝缘子在雾室试验中采集到的泄漏电流为对象,对应用多分类相关向量机的效果进行验证。

(6) 为了在复杂、未知环境下仍能保持较高的分类精度,对采用多分类器集成方法对泄漏电流进行识别展开了研究。给出了采用多分类器集成方法时的框架图。为了提高分类器的错误独立性,以期提高分类精度,将不同的特征量分别输入不同的基分类器;将各个基分类器的识别结果通过多数投票的方法得到最终的集成结果。

参考文献

- [1] 李璟延. 污秽绝缘子泄漏电流特性与污秽预警方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [2] 贺博, 林辉. 基于泄漏电流的污秽绝缘子闪络风险预测 [J]. 高电压技术, 2006, 36 (11): 22-25.
- [3] 王黎明, 李治, 陈永明. 基于泄漏电流的绝缘子染污状态在线监测技术的发展 [J]. 电力设备, 2003, 4 (6): 14-17.
- [4] 杨敏, 邓雨荣, 吴荣. 绝缘子泄漏电流在线监测装置在广西电网的应用 [J]. 广西电力, 2009 (5): 8-11.
- [5] 雷成华. 便携式输电线路绝缘子清扫装置的研制 [J]. 机电信息, 2015 (9): 58-59.
- [6] 黄新波, 程荣贵, 王小敬, 等. 绝缘子泄漏电流在线监测系统的联网方案与实施 [J]. 广东电力, 2007, 20 (4): 65-67.
- [7] 石岩, 蒋兴良, 黄欢. 污秽瓷绝缘子泄漏电流的估算方法 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (6): 1350-1355.