

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.05.020

基于同步波形的配电网故障诊断技术综述

徐铭铭¹, 冯光¹, 张林林², 王鹏¹, 石访²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450006;

2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:随着分布式电源、柔性负荷等大规模接入,配电网故障诊断面临新的技术挑战,针对录波器故障波形的分析可以提供新的思路。综述了基于波形的配电网故障诊断方法,并根据技术路线的特点,将其分为基于波形相似性直接匹配和基于波形特征辨识的间接方法,对各自的主流算法进行了分析、比较。最终在归纳各算法的优势与不足及不同应用场景下适用算法的基础上,给出对未来发展趋势的展望。新能源发展及量测体系不断完善的背景下,基于波形特征辨识的间接诊断方法应是今后的重点研究方向,积极探索其与基于多节点量测信息的集中式故障诊断技术的融合使用,提高故障检测和定位的准确性,为智能配电网故障诊断技术的深入研究提供有益参考。

关键词:分布式电源;智能配电网;故障录波;故障诊断

中图分类号:TM315

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)05-0138-09

0 引言

电网的安全稳定运行关乎国家经济发展,影响着生活及生产的各个方面^[1-2]。作为电力系统中的重要组成部分,配电网承担着分配电能、连接输电网与用户的关键职能,有统计数据表明,电力系统中约80%~90%的停电损失源自于配电网故障^[3],配电网故障诊断对保证电力系统的安全运行及减少停电损失具有重要意义。

电网故障诊断由最初的故障元件定位^[4-5]发展至面向系统层次^[6]的故障诊断,数据获取方式日趋多样化,从最开始的人工记录数据到数据采集与控制系统(supervisory control and data acquisition,SCADA)^[7]的应用,进而引入故障信息系统^[8]、广域测量系统^[9-10]及多类型故障数据源^[11]的融合,故障诊断的方法也随之进行智能化升级。已有基于开关量的电网故障诊断模型在保护或断路器信息完备时具备较高的诊断精度,但是信息不完备或出现误动、拒动时,诊断结果会受到影响。此外,随着分布式可再生能源的不断开发利用和柔性负荷的增加,配电网已发展成为新一代的智能配电网,其结构、功率流向都变得更加复杂。这对目前所应用各类故障诊断方法都会产生较大影响,随着以现代信息技术为基础的电网量测系统及电力系统调度自动化系统的发展,调度中心能够采集到的精确信息越来越多,这些信息以时间序列的形式刻画出了

系统各变量的实际变化波形,其中蕴含着反映系统运行状态的丰富信息。对电力系统而言,如何充分利用系统故障后所采集到的各电气量的波形,尤其是其中蕴含的时序特性提高故障诊断的准确性,已成为电力系统故障诊断领域有待解决的重要问题。

首先对当前故障诊断中常用的智能方法进行了概述,然后重点介绍基于波形分析的两类诊断方法,接着对各方法的优缺点进行对比分析,对不同扰动场景的适用算法进行总结,最后给出对基于波形分析的诊断及未来配电网故障诊断发展趋势的展望。

1 故障诊断方法概述

依据分析原理的不同,当前研究中电网故障诊断方法可以分为以下几类。

专家系统^[12]是最早用来解决故障诊断问题的人工智能技术。将保护元件、断路器状态同专家经验相融合形成故障诊断的逻辑规则,通过将电网故障时的告警信息与基于逻辑规则的知识库进行匹配以诊断出故障元件,并对推理过程及诊断结果作出解释。专家系统对于确定性信息有很强的推理能力,并且伴随着控制理论和规划技术的加入不断完善,但其要求建立的知识库足够完备,因此很难保证其容错能力,此外诊断速度有待改进。

基于机器学习方法的故障诊断,包括人工神经网络^[13]、支持向量机^[14]。这一类方法以“模型训练+预测”的形式来实现故障诊断,利用大量故障样本训练诊断模型然后对未知样本做出预测。该方法对有限样本下的分类问题具有较强的适用性及

收稿日期:2019-03-13;修回日期:2019-04-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目“基于微型PMU的配电网故障诊断及精确定位技术”(2017YFB0902802)

自学、自组织及容错能力,但这一类方法基于样本学习,有时无法对判断结果给出合理解释,另外需要经常对模型进行更新训练。

基于不确定性知识的故障诊断方法,包括模糊集^[15]、粗糙集^[16]、贝叶斯网络^[17],这一类方法考虑信息的不确定性,利用数学上的不确定性知识模型,实现不完备信息下的良好诊断决策,对解决复杂电网由于不确定因素引起的故障等问题具有明显作用,有较强的容错能力,但大规模电网的不确定性建模较为困难。

基于系统元件之间逻辑关系的方法,包括解析模型(也有学者称为优化技术)^[18]、信息论^[19]、Petri网^[20]。利用继电保护、断路器等动作规则构建逻辑关系模型,再转化为规划、寻优等数学问题,利用相应的数学工具求解。这些方法在实际电力系统中有一些应用,但未充分利用警报信息的时序特征。

基于高精度故障数据的故障诊断,如故障信息时序属性法^[21]、数值计算分析法^[22],是伴随着可以记录带有精确时标的电网数据的故障录波系统、PMU等装置的发展而出现的。通过计算分析电压、电流等量测量信息及其包含的时序属性对电网故障做出更精确的诊断。

其他方法包括多源信息融合方法^[23]、多智能体(multi-agent system, MAS)技术^[24]等,前者对不同数据源深度综合利用,充分利用数据的冗余性实现故障的准确分析和解释;后者则是将分布式思想与故障诊断相结合,将目标问题转变成多个智能体(Agent),分别解决问题,各Agent之间互通信息从而得出最终结果。

可以发现目前诊断方法主要集中在利用开关量,而实际上电气量对系统运行状态有着更直接的反映。随着高精度量测系统的发展,电气量的波形将更容易获取,因此基于同步波形的故障诊断方法将成为今后的重要发展方向。目前,波形相似性或波形匹配等问题在医学^[25-26]、信号时频分析^[27]、卫星通信^[28]等领域均有诸多研究。综合现有文献,当前故障诊断中相关波形分析方法可分为直接匹配与间接匹配两大类。

2 基于波形相似性直接匹配的故障诊断

直接匹配即直接利用时间序列数据来度量两波形之间的相似性,通常选用某种函数来描述两波形间的相似性值,2个对象越相似,其相似度函数值就越高。

2.1 基于相似系数的故障诊断方法

相似系数的概念来自于统计学中的协方差,表

示的是2个变量总体误差的期望,为更好地反映2个变量之间的相似性,排除信号幅度的影响,通常对变量作归一化处理。如果2个变量的变化趋势相似,协方差为正值;否则为负值。

基于相似系数的研究已在暂态电流差动保护、故障选相、线路行波测距等领域得到大量应用。对于故障诊断,文献[29]提出基于故障时刻各线路零模电流波形相似系数的选线方法,根据各健全线路间相似系数接近、而故障线路与健全线路间相似系数相差大的特点筛选故障线路。文献[30]提出通过计算三相相电流及其组合电流与经相模变换后获得的1模电流之间的波形相似系数实现故障相的识别。文献[31]利用相似系数考察经S变换及模时频矩阵尺度变换后的信号之间的相似程度,将待分类与模板波形进行匹配从而实现电压暂降分类。相似系数的优点在于简单直观,容易计算,能够很好地应用到相似性查询、分类等问题中。但相似系数法要求序列等长且一一对应,不支持时间序列的形变,而且对噪声较敏感,抗干扰能力差。有学者针对这些问题进行了改进,如文献[32]考虑相似系数极性、波形平移、修正相关系数等措施对文献[33-34]的相似系数定位方法做出改进,以解决信号幅值对波形相似性的影响及信号不同步等问题,虽然这在一定程度上解决了振幅形变及漂移等问题,但是对于时间轴的伸缩和弯曲仍然没有很有效的改进。

2.2 基于熵的故障诊断方法

近似熵(approximate entropy, ApEn)算法是从衡量信号序列复杂性的角度提出的,熵值随复杂性的增加而增大,其物理本质是衡量维数变化时信号序列中出现新模式的对数条件概率均值。文献[35]将近似熵算法引入到电力系统故障信号的特征提取中以量化地反映信号序列的复杂程度为电力系统故障诊断提供有效特征参数。

近似熵是对波形数据自身复杂性和规律性的描述,而互近似熵(cross approximate entropy, CApEn)则扩展到2个波形曲线间相似度的描述,互近似熵越大,则说明相似程度越低。文献[36]利用非故障线路零序电流波形相似,而与故障线路电流波形差别明显,通过互近似熵值,判断两零序电流波形的相识度,从而筛选故障线路。

互近似熵以统计学的方法研究2个波形间的差异性,数据窗较短,而且受暂态电流畸变的影响也较小,此外,互近似熵具有良好的抗噪能力,理论上数值小于相似容限的噪声都能够被抑制。但互近

似熵计算方法无法区分在模式相似上的方向性即正向相似和反向相似^[37]。

2.3 基于动态时间弯曲距离的故障诊断方法

动态时间弯曲距离(dynamic time wrapping, DTW)是专门为了解决时间轴形变问题而提出的一种算法。该算法运用动态规划原理寻找参考序列和测试序列2个波形之间扭曲代价最小的弯曲路径。文献[38]采用DTW法将实测的电压暂降波形数据与电压暂降匹配库波形进行匹配分析,实现电压暂降源的辨识。文献[39]采用动态时间弯曲算法计算待评估质量指标序列与理想指标序列之间的匹配程度以实现电能质量的综合评估与分级评估。文献[40]基于编辑距离和动态时间弯曲距离提出一种衡量电力系统警报信息相似度的距离概念,得到可疑故障元件的故障置信度。文献[41]通过DTW算法得出各疑似故障线路的横向差异度值,再利用人工鱼群聚类算法将其分为故障类和正常类。

DTW距离的优势在于不要求序列等长且一一对应,很好地解决了时间序列发生时间轴伸缩和弯曲后的相似性度量问题。但DTW的逐点搜索使其算法复杂度较高并易受噪音、孤立点干扰,而且DTW不满足距离三角不等式,这都限制了此种方法的广泛应用。

2.4 基于Hausdorff距离的故障诊断方法

Hausdorff距离来源于图像匹配,是一种可以应用在边缘匹配算法中的距离,通过两序列间最小单向距离中的最大值来度量两序列的最大不匹配程度^[42]。文献[42]通过Hausdorff距离算法对包括故障暂态时刻在内的任意时刻信号进行相似度比较,实现故障的快速识别和切除。文献[43]以整流侧线模电压前行波与逆变侧线模电压反行波间的Hausdorff距离作为保护判据,在不需要双端通信精确对时情况下即可快速地辨识区内和区外故障。Hausdorff距离不要求序列点之间一一对应,但对个别干扰点很敏感。针对这一问题,文献[42]分析了异常数据产生机理,提出通过对单向距离降序排列后的序列进行差异比较的方法绕过异常数据点,对该缺陷做出了一定程度的改进。

2.5 基于时间序列shapelet方法的故障诊断方法

Shapelet本意为时间序列中最能刻画样本类别特征的小形状或子片段,是一种针对不等长序列的匹配方法。以欧氏距离为基础,利用滑动窗口方式从待测波形中获得候选子片段,计算子片段与模板波形的距离,从而提取出最能反映原始序列关键变

化的片段。

文献[44]针对文献[45]在暂态电压稳定评估中未考虑误判与漏判两者代价不同的问题,利用时间序列shapelet方法匹配PMU动态时序数据中与系统失稳密切相关的各电气量的关键演化趋势,实现对系统扰动情况的有效监测与评估。由于需要对所有可能的候选子片段逐个进行计算和比较,该方法计算复杂度极高。有学者提出了多种提高搜索效率的对策,如抽样搜索和自适应变步长搜索^[45]、子序列距离计算的冗余删减和基于信息增益的早期剪枝^[46],以存储空间换取计算时间^[47]、并行计算^[44]等。

常见的时间序列距离还有欧式距离、编辑距离、曼哈顿距离、夹角余弦距离等,这些距离具有简单、易于计算的特点,但是作为静态距离,无法反映时间序列的动态特性,对于不同步的时间序列分析能力较差,容易受到干扰,因此一般作为基础距离度量方式嵌入到其他方法中。

3 基于波形特征提取的间接故障诊断

除了直接利用波形时间序列数据外,有学者研究利用一个或若干特征量表征波形数据,实现时间序列的降阶或空间转换,通过对特征量的处理,如利用空间距离或机器学习方法等实现对原波形的相似性度量。

3.1 基于小波变换的故障诊断

小波变换继承和发展了短时傅立叶变换局部化的思想,同时又克服了窗口大小不随频率变化等缺点,本质是将基波函数做位移后,在不同尺度下与待分析信号做内积,实际中常用Mallat快速算法实现小波变换。文献[48]提出对输电线路电流波形进行小波变换构造时频特征向量,再结合相似系数反映电流波形时频特征在故障前后的变化来实现线路故障的检测。文献[49]对馈线首端的各相电流波形进行小波变换并重构为特征矩阵,利用矩阵的最大小波奇异值的突变程度检测故障并划分故障类型。文献[50]选取故障暂态零序电流波形进行小波包分解提取特征求得各线路的时频谱图及时频谱矩阵,利用相似系数构造综合相似系数,进而选出接地线路。

小波变换具有多分辨率(多尺度)的特点,有利于观察波形的局部特性并检测出信号的瞬态或奇异点,但不足之处是没有一种自适应的以原数据作为基础的分解方式,需要提前选择合适的母小波及分解层数。

3.2 基于直方图的故障诊断

直方图分解是一种常用的数字图像处理方法,用于表现像素点在各灰度区间的分布情况。文献[51]对各线路故障后首半个周期的零序电流波形进行直方图分解,统计不同幅值区间内的采样点数,并由相对熵表征采样点分布的差异,最后利用模糊核聚类对线路分类选出故障线路。可以看出直方图方法是通过统计各分割区间内波形所占据像素点数的分布情况反映波形所代表的系统运行情况,具有简洁直观的特点,但是故障情况下量测波形中存在的畸变及谐波等干扰容易改变像素点原本分布规律,从而导致误诊断或无法诊断。

3.3 基于相空间重构的故障诊断

相空间重构起源于统计学,后被引入动力系统科学,是一种根据有限数据来重构吸引子以研究系统动力行为的方法,它可以把时间序列分量重建成为低阶非线性动力系统,是分析非线性时间序列的重要方法^[52]。文献[52]利用相空间重构理论对各类电气负载的串联电弧故障电流波形时间序列进行相空间重构,以相空间轨迹表征电流波形特征,最终构造出“信息维数-电流零休时间”二维特征空间并利用支持向量机进行分类。

该方法通过一组时间序列量测值提取系统定性信息重构相空间来观察系统状态演化情况。系统发生故障后相空间轨迹会出现明显变化,结果较直观,但延迟时间与嵌入维数这2个重要参数的合适取值较难确定,且学术界对这一问题的两观点相互对立,一方认为2个参数相互独立,而另一方认为两参数互相关联,实际应用中并没有具体的取值规则,限制了该方法的应用。

3.4 基于相平面法的故障诊断

相平面法是一种求解一、二阶常微分方程的图解法,将系统的运动过程转化为相平面上的轨迹,是一种时域波形特征提取的有效方法,在故障分类、电弧故障检测、电能质量评估等方面有所应用。文献[53]采用相平面法对暂时性接地故障波形进行处理,结合接地故障持续时间、故障间隔构成三维输入参数,利用神经网络进行分类判断绝缘劣化情况。文献[54]采用相平面轨迹法分析单相接地故障波形,并利用类间均值距离量度的分层聚类法实现单相接地故障分类。文献[55]对暂态零序电流波形作分段相平面变换,利用欧氏距离构造特征矩阵,最后利用模糊 K 均值聚类寻找故障线路。

相平面轨迹可以较好地提取波形全局特性,且不受波形的幅值、相位影响,区分度高,但该方法在

处理实际数据时过于保守和僵化,抗干扰能力不足,容错性低,有些明显属于同类的故障样本因局部数据不满足时间推移分布规律而不能被划分为同类。

3.5 基于多特征属性的故障诊断

多特征属性法通过选取多个特征构造反映波形对象分布情况的多维特征空间,通过特征空间中波形对象之间的距离实现相似性匹配。文献[56]选用首波峰占比、Hu氏不变矩 $M1$ 和近似熵 En 作为波形特征属性量化波形的形态特征,再利用整体相似度函数进行最近邻匹配实现故障分类,其效果随历史故障样本的积累而提升。

该方法可以从多个方面提取波形特征,全面地反映波形性质,但诊断结果与特征量类型有很大关联,而特征量基本依赖研究人员选取,对不同系统不具有普适性。

4 基于波形的故障诊断方法比较与分析

基于波形的诊断方法由于直接面对与故障和扰动有直接关联的电气量波形,在诊断准确性上有较大优势,但囿于其计算原理限制,各类方法也存在一定的不足,对上文所述各方法的简单总结如表1所示。

可以看出基于波形直接匹配的各方法直接对波形数据点进行处理,普遍具有简单直观、容易实现的优点。其中相似系数可以较好地描述稳态波形之间的相似性,相比另一常用距离欧氏距离,它对绝对数值不敏感,处理不规范数据时性能更好,在暂态电流差动保护、小电流故障选线与定位、行波测距及电压暂降相识别和暂降源分类等场景下的应用较多。对于变形或扭曲波形,DTW和Hausdorff距离具有更好的表现,但均易受异常点的影响,前者通过设置路径限制窗口,后者通过集合数据排序比较可在一定程度上弥补该不足。DTW在电压暂降源识别、电能质量评估、输电网故障元件查找及谐振接地系统故障分析等场景的应用较多,而Hausdorff算法在输电线路主保护及快速纵连保护方面已有一些研究。互近似熵算法通过合理的相似容限取值可以规避掉主要噪声的影响,主要应用于小电流接地故障选线方面的研究,当诊断场景不考虑模式相似方向性时,该方法是一个不错选择。相比之下,Shapelet方法更侧重于波形的局部片段,对于以瞬态变化波形为关键特征量的诊断场景,Shapelet方法可以给出较准确的结果,在暂态电压稳定监测与评估中有较好的表现。

表 1 基于波形的故障诊断方法

Table 1 Fault diagnosis method based on waveform

技术路线	实现方法	优势	不足
基于波形直接匹配	相似系数	简单直观,容易计算	要求序列等长且一一对应,不支持时间序列的形变
	互近似熵	数据窗较短,抗噪能力强	无法区分模式相似的方向性
	动态时间弯曲距离	不要求序列等长和一一对应,允许时间轴伸缩和弯曲	复杂度较高,易受噪音干扰
	Hausdorff 距离	不要求序列点之间一一对应	对个别干扰点很敏感
	Shapelet 方法	表征能力强,能可靠提取波形关键变化片段	数据维数高或数据量大时搜索效率低
基于特征间接诊断	小波变换	多尺度观察局部特性,能检测奇异点	无自适应分解方式,需提前选择母小波及分解层数
	直方图分解	简单直观	抗干扰能力差,无法应对复杂波形
	相空间重构	结果直观有效,易于观察	参数的合适取值较难确定
	相平面法	可提取波形全局特性,不受幅值、相位影响	处理过程保守,容错性低
	多特征法	从多方面选取特征全面反映波形性质	描述波形的特征量基本依赖人工选取

基于特征提取的间接诊断方法以从波形中提取的特征量为计算对象,在实现上要比直接法复杂一些,但以特征量代替波形数据点,在应对海量数据时的实时性、准确性上都有较大的保证。相平面法和相空间重构通过将一维波形变换至二维平面和多维空间得到原波形中较难提取或分析的特征量,从而提高诊断准确性,但两者分别面临参数取值困难和处理过程保守的问题。前者在配网瞬时故障诊断、单相接地故障分类及故障选线,后者在不同负载的电弧故障分类等场景中有较多研究。小波变换与直方图分解直接对原波形提取特征量,前者在小波基和分解层数选取合适的前提下可实现对波形的高分辨率观察,后者将分割区间内像素点数的分布作为特征量,虽然简洁直观,但是易受波形畸变及谐波的干扰,小波变换在配电线路故障诊断、输电线路故障检测与选线方面研究较多,而直方图分解在配电网谐振接地系统故障选线方面有一些研究。多特征法以自定义的若干特征刻画一条波形,其性能主要依赖于人为选取的特征量能否体现波形的实际性质,当特征量选取恰当时,其诊断性能比较优异,当诊断场景较复杂或研究人员经验不足时容易出现诊断结果不理想的情况。

基于现有研究工作,针对不同应用场景的诊断方法整理归纳如表 2 所示。

5 基于波形的故障诊断方法发展趋势展望

随着分布式电源、柔性负荷等的大规模接入,配电网的动态行为、故障特征等更加复杂、多变,对配电网故障诊断产生了较大影响。配电网由传统的辐射型单电源网络变为分散式多电源网络,潮流

表 2 不同应用场景的诊断方法

Table 2 Diagnosis method for different application scenarios

应用场景	诊断方法
小电流接地故障选线	相似系数、互近似熵、动态时间弯曲距离、小波变换、直方图分解、相平面法、多特征法
电压暂降分析	相似系数、动态时间弯曲距离
暂态电压稳定评估	Shapelet 方法
电能质量评估	动态时间弯曲距离
谐振接地系统故障分析	动态时间弯曲距离、多特征法
电弧故障分析	相空间重构、多特征法
输电网故障诊断	动态时间弯曲距离、Hausdorff 距离、小波变换、多特征法
行波测距	相似系数、多特征法

也由单向流动变为双向流动并存在多样化的电流回路,导致故障电流特征变化频繁。同时,分布式电源馈入电网的故障电流暂态分量、衰减特性等相比于交流同步电机存在较大差异,导致原有故障电气量特征发生显著变化。另外分布式设备并网引入的谐波与噪声会使电流畸变及故障信号微弱,提取困难。以交流同步发电机运行特性为基础的短路电流分析理论难以满足分布式电源接入后故障分析的要求。基于波形的故障诊断方法,利用故障波形的精细化特征进行全方位故障诊断,是下一步发展的方向。综合分析后文中有以下研究结果:

(1) 随着电网高精度量测系统的建设与完善,海量量测数据将涌入主站中心。波形相似性匹配直接法由于直接利用波形数据点运算,必然会出现诊断效率不理想的结果。反观基于波形特征提取

间接诊断方法,由于先对波形数据进行特征提取,起到了降阶或降维的作用,有诊断效率上的优势。同时特征提取隔断了数据源与诊断结果的直接联系,可以降低错误数据的干扰。故基于波形特征提取的间接故障诊断应是今后的重点研究方向。

(2) 进行多种特征提取方法融合使用的研究。间接法中特征提取环节不同的方法有各自的优势与不足,仅使用某一种方法无法全面的提取波形特征,通过各方法的结合实现优势互补,解决单一方法在特征提取环节的不足。

(3) 基于波形分析的电网故障预警技术的研究。故障前某些系统指标已经偏离了允许范围,这种情况的不断恶化会导致故障的发生。随着高精度录波装置的普及,以前无法捕捉到的异常变化,尤其是波形的变化,将反馈到电网监控中心。针对这类波形异常变化的精细化分析将成为预防及诊断故障过程中的重要环节。

暂态录波型故障指示器和配电网 PMU 技术的发展为应对分布式电源、柔性负荷接入带来的挑战提供了新的思路。基于多节点量测信息的集中式故障诊断技术可弥补传统诊断方法显现出的不足,系统中多个测量节点的波形数据构成了反映系统网络拓扑及运行状态随时间变化规律的时空数据源,通过基于波形的间接诊断方法从多源波形数据中提取反映时空特性的波形特征量形成多源特征量,利用关联规则、机器学习以及聚类等方法挖掘其中蕴含的规则或者分布规律,可以有效地改善分布式电源大规模接入背景下配电网故障诊断所面临的困难,实现对系统整体运行状态深入的监测和强有力的掌控,精准地判断故障类型并进行定位。

6 结语

电网故障诊断及处理是电力系统研究的重要组成部分。文中重点从电气量波形处理的角度论述,对不同的诊断和处理方法进行了框架性的综述,通过对比分析,阐明了基于波形特征提取的间接故障诊断更符合实际应用场景这一观点。未来智能配电网的运行动态、故障特征等更加复杂,上述诊断方法需要在实际工程应用中不断完善,互相借鉴处理方法上的优势或实现多种方法融合使用。

未来工作的重点在于有源配电网故障波形特征研究,即形成一套行之有效的特征量集合及提取方法,以正确反映电气量波形性质,提升电网故障诊断的智能化水平。配电网故障录波系统和轻型 PMU 技术的发展,为基于多节点同步量测波形的集

中式故障诊断技术提供了信息支撑,进一步可形成基于多源波形特征的综合故障诊断方案,有助于提高有源配电网故障检测和区段定位的准确性。

本文得到国网河南省电力公司科技项目“基于配电终端录波数据分析的配电网接地故障研判技术研究”资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 朱克东. 智能电网环境下电力数据挖掘研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
ZHU Kedong. Research on power data mining in the smart grid [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [2] 国家能源局. 2016 年全社会用电[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2017-01/16/c_135986964.htm.
National Energy Administration. Social electricity consumption in 2016 [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2017-01/16/c_135986964.htm.
- [3] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [4] RAMSAY F R F, NETHERCOT W. Engine ignition faults and a new method of diagnosis and location during running[J]. Power Engineering, Journal of the institution of Electrical Engineers, 1946, 93(36): 629-635.
- [5] CAMERON A W W. Diagnoses of A-C generator insulation condition by nondestructive tests [J]. Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1952, 71(1): 263-174.
- [6] DY LIACCO T E, KRAYNAK T J. Processing by logic programming of circuit-breaker and protective-relaying information [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, PAS-88(2): 171-175.
- [7] RUSSELL J C, MASIELLO R D, BOSE A. Power system control center concepts [C]// Power Industry Computer Applications Conference. IEEE, 2002.
- [8] 冀有党, 李伟. 电网故障信息处理系统的实用化研究[J]. 电力自动化设备, 1994(3): 10-14.
JI Youdang, LI Wei. The practical research on power grid fault information processing system [J]. Electric Power Automation Equipment, 1994(3): 10-14.
- [9] 周子冠, 白晓民, 李文锋, 等. 基于广域测量系统的电网故障在线智能化诊断与分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 1-7.
ZHOU Ziguan, BAI Xiaomin, LI Wenfeng, et al. A novel smart on-line fault diagnosis and analysis approach of power grid based on WAMS [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 1-7.
- [10] 徐岩, 宋艳争, 张亚刚, 等. 基于广域测量系统的改进电网拓扑结构识别[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 88-93.
XU Yan, SONG Yanzheng, ZHANG Yagang, et al. An improved method for power network topology identification based

- on wide area measurement system [J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 88-93.
- [11] 郭创新, 彭明伟, 刘毅. 多数据源信息融合的电网故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 1-6.
GUO Chuangxin, PENG Mingwei, LIU Yi. Novel approach for fault diagnosis of the power grid with information fusion of multi-data resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 1-6.
- [12] FUKUI, KAWAKAMI. An expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers [J]. Power Delivery IEEE Transactions on, 1986, 1(4): 83-90.
- [13] FLORES A, QUILES E, GARCIA E, et al. Fault diagnosis of electric transmission lines using modular neural networks [J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(8): 3663-3668.
- [14] 袁柳杨. 基于支持向量机的电网故障诊断研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
YUAN Liuyang. Research on power grid fault diagnosis based on support vector machine [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [15] CHEN Wenhui. Online fault diagnosis for power transmission networks using fuzzy digraph models [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 688-698.
- [16] 栗然, 张烈勇, 顾雪平, 等. 采用粗糙集联合规则挖掘算法的分布式电网故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 28-34.
LI Ran, ZHANG Lieyong, GU Xueping, et al. Distributed fault diagnosis of power networks applying the united rules mining algorithm based on rough set theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 28-34.
- [17] 韩迎春, 童晓阳. 基于动态推理链的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1315-1324.
HAN Yingchun, TONG Xiaoyang. Power system fault diagnosis based on dynamic reasoning chain [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1315-1324.
- [18] ZHANG Y, CHUNG C Y, WEN F S, et al. An analytic model for fault diagnosis in power systems utilizing redundancy and temporal information of alarm messages [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2016, 31(6): 4877-4886.
- [19] 张海波, 贾凯, 施蔚锦, 等. 信息论与专家系统相结合的电网故障诊断[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(8): 111-118.
ZHANG Haibo, JIA Kai, SHI Weijin, et al. Power grid fault diagnosis based on information theory and expert system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(8): 111-118.
- [20] 贾学涵, 杨东升, 郑薇, 等. 多因素分级 Petri 网配电网故障诊断方法 [J]. 电网技术, 2017, 41(3): 1015-1021.
JIA Xuehan, YANG Dongsheng, ZHENG Wei, et al. Distribution network fault diagnosis method based on multi-factor hierarchical Petri net [J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 1015-1021.
- [21] 童晓阳, 谢红涛, 孙明蔚. 计及时序信息检查的分层模糊 Petri 网电网故障诊断模型 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 63-68.
TONG Xiaoyang, XIE Hongtao, SUN Mingwei. Power system fault diagnosis model based on layered fuzzy Petri net considering temporal constraint checking [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 63-68.
- [22] 李乃永, 梁军, 李磊, 等. 基于广域故障录波信息的调度端电网故障诊断系统 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 100-104.
LI Naiyong, LIANG Jun, LI Lei, et al. Fault diagnosis system based on wide-area fault wave recording information at dispatching center [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 100-104.
- [23] 闪鑫, 戴则梅, 张哲, 等. 智能电网调度控制系统综合智能告警研究及应用 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 65-72.
SHAN Xin, DAI Zemei, ZHANG Zhe, et al. Research and application of integrated smart alarm based on smart grid dispatching and control systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 65-72.
- [24] 陈铁军, 宁美凤. 电网自愈控制中故障实时监测及诊断研究 [J]. 自动化仪表, 2013, 34(1): 14-17.
CHEN Tiejun, NING Meifeng. Study on real time fault monitoring and diagnostic in self-healing control of power grid [J]. Process Automation Instrumentation, 2013, 34(1): 14-17.
- [25] 刘彤彤. 生物医学信号相似性分析方法的研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
LIU Tongtong. Research on similarity analysis for biomedical signal [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2013.
- [26] 练仕榴, 郑刚, 牟善玲. 用于心电波形分析的相似性度量策略 [J]. 计算机工程, 2011, 37(9): 263-265.
LIAN Shiliu, ZHENG Gang, MOU Shanling. Similarity measurement strategie for ECG waveform analysis [J]. Computer Engineering, 2011, 37(9): 263-265.
- [27] 王婷. EMD 算法研究及其在信号去噪中的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
WANG Ting. Research on EMD algorithm and its application in signal denoising [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [28] 郝敬松, 马社祥, 孟鑫. 基于波形匹配的星载 AIS 信号检测 [J]. 计算机仿真, 2015, 32(3): 73-76.
HAO Jingsong, MA Shexiang, MENG Xin. Detection of satellite-based AIS signals based on waveform matching [J]. Computer Simulation, 2015, 32(3): 73-76.
- [29] 俞晨昊, 王春衢, 陈中颖, 等. 基于波形相似度的配电网故障选线新方法 [J]. 浙江电力, 2018, 37(7): 79-82.
YU Chenhao, WANG Chunheng, CHEN Zhongying, et al. A new method of fault line selection in distribution network based on waveform similarity [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(7): 79-82.
- [30] 邵文权, 吉玥, 张志华. 利用单一电流模量波形互相关系数的故障选相方案 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7):

- 90-96.
SHAO Wenquan, JI Yue, ZHANG Zhihua. A faulted phase selection scheme using waveform cross-correlation coefficient of single-mode current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 90-96.
- [31] 李康瑞,杨洪耕. 基于 S 变换标准模板相似度的电压暂降分类[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 139-146, 153.
LI Kangrui, YANG Honggeng. S-transform based classification for voltage dips according to standard template similarity [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 139-146, 153.
- [32] 张林利. 小电流接地故障定位方法及其应用研究[D]. 山东:山东大学, 2013.
ZHANG Linli. Study on fault location method in non-effectively grounded network and its application [D]. Shandong:Shandong University, 2013.
- [33] 马士聪,徐丙垠,高厚磊,等. 检测暂态零模电流相关性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化,2008, 32(7):45-51.
MA Shicong, XU Bingyin, GAO Houlei, et al. An earth fault locating method in feeder automation system by examining correlation of transient zero mode currents [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7):45-51.
- [34] 薛永端,徐丙垠,马世聪,等. 基于暂态电流相似性的馈线自动化系统接地故障分段技术[C]//中国国际供电会议, 2008: 1-4.
XUE Yongduan, XU Bingyin, MA Shicong. Ground fault segmentation technique for feeder automation system based on transient current similarity [C]// CIGRE, 2008: 1-4.
- [35] 符玲,何正友,麦瑞坤,等. 近似熵算法在电力系统故障信号分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 29(28): 68-73.
FU Ling, HE Zhengyou, MA Ruikun, et al. Application of approximate entropy to fault signal analysis in electric power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 29(28): 68-73.
- [36] 刘柱揆,曹敏,董涛. 基于波形相似度的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 89-95.
LIU Zhukui, CAO Min, DONG Tao. Fault line selection of neutral indirectly grounding system based on waveform similarity [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 89-95.
- [37] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等. 基于广义支路能量时空分布熵测度的线路脆弱度评估[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):187-196.
LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Assessment of vulnerable lines in power grid based on entropy of generalized branch energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(34): 187-196.
- [38] 邱海峰,陈兵,袁晓冬,等. 基于动态时间弯曲距离的电压暂降源辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 7-13.
QIU Haifeng, CHEN Bing, YUAN Xiaodong, et al. Identification of voltage sag sources based on DTW [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 7-13.
- [39] 林德清,顾伟,王元凯,等. 基于动态时间弯曲空间距离量的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 562-567.
LIN Deqing, GU Wei, WANG Yuankai, et al. Synthetic evaluation of power quality based on dynamic time warping spatial distance measurement [J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 562-567.
- [40] 钟锦源,张岩,文福拴,等. 基于时间序列相似性匹配的输电系统故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 60-67.
ZHONG Jinyuan, ZHANG Yan, WEN Fushuan, et al. A fault diagnosing method in power transmission systems based on time series similarity matching [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 60-67.
- [41] 梁晨. 基于 DTW 和改进人工鱼群算法的电网故障诊断方法[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
LIANG Chen. The power system fault diagnosis based on DTW and modified artificial fish swarm algorithm [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [42] 陈乐,薄志谦,林湘宁,等. 基于波形相似度比较的线路快速纵联保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5018-5027, 5221.
CHEN Le, BO Zhiqian, LIN Xiangning, et al. Waveform similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018-5027, 5221.
- [43] 赵航,林湘宁,喻锴,等. 基于模量 Hausdorff 距离波形比较的直流输电线路选择性快速保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6888-6900, 7079.
ZHAO Hang, LIN Xiangning, YU Kun, et al. A high-speed protection scheme for HVDC transmission line based on Hausdorff distance comparison [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6888-6900, 7079.
- [44] 朱利鹏,陆超,黄河,等. 基于广域时序数据挖掘策略的暂态电压稳定评估[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 180-185.
ZHU Lipeng, LU Chao, HUANG He, et al. Wide-area time series data mining based transient voltage stability assessment [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 180-185.
- [45] ZHU L, LU C, SUN Y. Time series shapelet classification based online short-term voltage stability assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2):1430-1439.
- [46] YE L, KEOGH E. Time series shapelet: a new primitive for data mining[C]//Proceeding of ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2009: 947-956.
- [47] MUEEN A, KEOGH E, YOUNG N. Logical-shapelet: an expressive primitive for time series classification[C]//Proceedings of the 17th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Diego, CA, USA:

- ACM, 2011: 1154-1162.
- [48] 林圣,梅俊涛,陈双,等. 基于暂态行波时频特征的输电线路故障检测与选相方法[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 48-53.
- LIN Sheng, MEI Juntao, CHEN Shuang, et al. Fault detection and faulty phase determination of transmission lines based on time-frequency characteristics of transient travelling waves [J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 48-53.
- [49] 韩国正. 基于小波变换和奇异值分解的配电网故障检测方法[D]. 山东:山东科技大学, 2017.
- HAN Guozheng. Distribution network fault detection based on wavelet transform and singular value decomposition [D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [50] 郭谋发,刘世丹,杨耿杰. 利用时频谱相似度识别的配电网线路接地选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 4, 183-190.
- GUO Moufa, LIU Shidan, YANG Gengjie. A novel approach to detect fault lines in distribution network using similarity recognition based on time-frequency spectrum [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 4, 183-190.
- [51] 郭谋发,严敏,陈彬,等. 基于波形时域特征聚类法的谐振接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 59-66, 81.
- GUO Moufa, YAN Min, CHEN Bin, et al. Faulty line selection based on waveform feature clustering in time domain for resonance grounding system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 59-66, 81.
- [52] 鲍洁秋. 单相串联电弧故障识别方法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2016.
- BAO Jieqiu. Research on identification method of single-phase series arc fault [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [53] 林仁杰,李天友,蔡金锭. 基于相平面和遗传BP神经网络的配电网线路绝缘预警[J]. 电气技术, 2015, 191(9): 47-51.
- LIN Renjie, LI Tianyou, CAI Jinding. The warning of insulation deterioration based on the state phase and genetic BP neural network in distribution network [J]. Electrical Engineering, 2015, 191(9): 47-51.
- [54] 贾清泉,陈丽,袁野. 应用相平面和分层聚类的配电网单相接地故障特征分类[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 68-71.
- JIA Qingquan, CHEN Li, YUAN Ye. Classification of single phase to ground fault based on phase-plane and hierarchical clustering for neutral high impedance earthed distribution networks [J]. Automation Of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 68-71.
- [55] 郑新桃. 基于波形伸缩变换和模糊K均值聚类的配电网单相接地选线研究[D]. 福州:福州大学, 2014.
- ZHENG Xintao. A research of single-phase-to ground fault line selection in distribution system based on waveform stretching transform and fuzzy K-means clustering [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014.
- [56] 张广斌,束洪春,于继来. 案例推理式输电线路单端电流行波故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1379-1389.
- ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai. Single-ended traveling wave fault location for transmission lines via case-based reasoning [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1379-1389.

作者简介:



徐铭铭

徐铭铭(1985),男,博士,高级工程师,从事智能配电网方面的研究工作(E-mail: 13525098550@139.com);

冯光(1984),男,硕士,高级工程师,从事智能配用电技术、供电可靠性技术相关工作;

张林林(1994),男,硕士在读,研究方向为配电网故障诊断。

Distribution network fault diagnosis technology based on synchronous waveforms

XU Mingming¹, FENG Guang¹, ZHANG Linlin², WANG Peng¹, SHI Fang²

(1. State Grid Henan Power Company Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450006, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: With the large-scale intergration of the distributed generators and the flexible load, the dynamic behavior and fault characteristics of the distribution network are more complex and variable. The fault diagnosis in distribution networks faces new technical challenges. The waveforms-based fault diagnosis method is reviewed, which can be divided into direct matching method based on waveform similarity and indirect method based on waveform feature identification. The popular algorithms are analyzed and compared with each other. Then the advantages and disadvantages of each kind of algorithm are analyzed. Diagnosis methods for different application scenarios are summarized. Then, the future development and technical route of synchronous waveforms-based diagnosis methods are analyzed. The advantages and disadvantages of the algorithm are analyzed, and the diagnostic methods under different application scenarios are summarized. Finally, the development trend and technical roadmap of the fault diagnosis based on synchronous waveform are discussed. This review provides a useful reference for the futher study on smart distribution network fault diagnosis technology.

Keywords: distributed power; intelligent distribution network; fault recording; fault diagnosis

(编辑 钱悦)