

基于PMU的中压配电网精确故障定位方法及关键技术

于力¹, 焦在滨², 王晓鹏², 陈卫³, 邓丰⁴

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东省广州市 510080;

2. 陕西省智能电网重点实验室(西安交通大学电气工程学院), 陕西省西安市 710049;

3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省武汉市 430074;

4. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410114)

摘要: 中压配电网精确故障定位技术对于减少电力系统的停电时间和停电频率, 提高供电可靠性具有重要的意义。同步相量测量技术的广泛应用, 为在配电网中实现故障的精确定位奠定了基础。文中对以配电网同步相量测量装置(D-PMU)为基础的中压配电网精确故障定位方法的研究进行了分析和展望。在对中压配电网故障定位技术现状进行分析的基础上, 阐述了目前配电网精确故障定位面临的机遇与挑战, 提出了实现精确故障定位的前提条件。在此基础上, 围绕着中压配电网精确故障定位研究的主要科学问题, 提出了需要重点关注的研究内容, 并对相关的研究思路和技术路线进行了详细的阐述。

关键词: 同步相量测量装置; 故障定位; 暂态量; 行波; 数据融合

0 引言

根据国家能源局和中国电力企业联合会的数据^[1], 中国2017年全国用户平均停电时间为16.27 h/户, 平均停电频率为3.28次/户, 供电可靠性与新加坡等国家相比仍存在不小的差距和提升空间。精确故障定位技术^[2]在中压配电网中的应用, 一方面对于高电缆化城市配电网, 能够减少故障恢复工作量, 缩短终端用户的停电时间, 另一方面对于架设条件恶劣的城乡及农村配电网, 能够缩小巡线范围、提高巡线效率。在中压配电网中, 精确故障定位技术被认为是提高系统弹性和可靠性的重要手段之一。

中压配电网中, 精确故障定位技术的发展面临着许多挑战, 包括: ①线路结构形式复杂; ②线路参数不对称情况普遍, 且参数误差大; ③量测系统不完善, 互感器精度低, 缺乏支撑精确故障定位技术的时钟同步机制; ④配电自动化系统普及率低, 通信条件较差, 缺乏适用于配电网的数据同步技术; ⑤含分布式电源及电力电子装置的中压配电网故障暂态过程波形复杂, 某些传统的故障定位手段不能适应有源

配电网的要求。

同步相量测量装置(synchrophasor measurement unit, PMU)在输电系统中已经得到了成功的应用^[3], 中压配电网同步相量测量装置(synchrophasor measurement unit for distribution network, D-PMU)在实现小型化、低成本、易安装、免维护等目标之后, 必然会对故障诊断和故障定位技术带来革命性的影响, 主要表现在: ①基于D-PMU的同步相量测量能够实现配电线路参数的在线估计, 为精确故障定位奠定基础; ②D-PMU可以为配电自动化系统提供同步时钟, 实现相量及录波数据的同步; ③D-PMU具有良好的通信条件, 为配电自动化系统及其他特殊/新型传感器的数据传输提供了可能的通道。D-PMU技术的出现为中压配电网精确故障定位技术带来了前所未有的机遇。

本文对基于D-PMU的中压配电网精确故障定位技术的发展前景和关键技术进行了分析与讨论。首先, 对配电网精确故障定位技术进行了综述; 然后, 讨论了新能源高比例接入和PMU等新型量测手段广泛配置的背景下, 配电网精确故障定位面临的机遇与挑战; 最后, 以D-PMU的应用为基础, 提出了中压配电网精确故障定位的方案, 并对可能的研究方向和核心关键技术进行了展望。

收稿日期: 2019-08-19; 修回日期: 2020-02-27。

上网日期: 2020-05-29。

国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902900)。

1 中压配电网故障定位方法

1.1 利用专用附加设备实现的故障定位

在不影响配电网正常运行的情况下,利用附加的辅助设备确定故障点或者故障区段,是目前应用较为广泛的一种配电网故障定位技术。此类技术中较为成熟的有“注入信号法”^[4]、“故障指示器法”^[5]、“分段器-重合器法”^[6]和“智能接地法”^[7]等。

在配电网发生故障之后,基于“注入信号法”的故障定位原理是利用电压互感器(TV)向系统注入特殊频率的电流信号,并通过手持设备或安装在线路分支点处的信号探测器进行信号寻踪,实现故障点或者故障区段的确定。

故障指示器是安装在配电线路上的电流检测装置,在辐射状配电网中利用故障点两端故障指示器测量得到的电流特征差异确定故障区段。传统的故障指示器一般采用“翻牌”的方式向运维检修人员提供故障定位信息,新一代的故障指示器也扩展了自动定位及故障录波等功能,但遗憾的是目前的故障指示器并不具备提供带同步时标的高采样率故障数据的能力,因此无法直接用于配电线路的精确故障定位。

分段器和重合器是配电自动化系统最常见的设备。分段器/重合器与断路器和继电保护装置在时间上的配合是经典的配电网故障隔离方案,也是配电网经典的故障区段定位方法,文献[8]提出的基于终端永久性故障识别算法的故障区段定位方法也属于此类算法,其优点在于通过自适应判据避免了“分段器-重合器法”重合于故障对系统的冲击。

智能接地法是通过在配电变压器中性点安装开断设备或电力电子装置,从而在配电网发生单相接地故障时短时改变系统中性点运行方式,采用成熟的输电网故障的定位技术实现对中压配电网单相接地故障的有效识别和精确定位。

实际上,除了以上的基于配电网专用附加设备的故障定位技术之外,以下的2种技术也值得关注:其一,是充分利用配电网中的电力电子设备良好的控制特性,直接向电网中注入故障定位信号,并基于阻抗法等原理实现故障定位^[9];其二,是在配电网中添加“边界元件”,利用故障点和系统“边界”的位置关系,实现配电网故障的区段定位和精确故障定位^[10]。

以上定位方法中,“故障指示器法”和“分段器-重合器法”难以应用于单相接地故障的场景中,其定位精度取决于设备安装的位置,是一种区段故障定位技术。“注入信号法”需要人工巡线的配合,其主要

用于对接地故障的选线和定位,虽然技术成熟,但是自动化程度低,故障定位效率较低。以“智能接地法”为代表的短时改变中性点运行方式的故障定位方法虽然近年来备受关注,但其增加了配电系统的复杂程度,也会对供电可靠性造成一定的影响,需要进一步研究优化。

1.2 基于配电线路量测信息实现的故障定位

基于配电线路量测信息实现的故障定位技术主要包括:利用稳态信息的故障定位技术和利用暂态信息的故障定位技术,充足的量测信息是实现中压配电线路精确故障定位的基础和前提。

基于稳态信息的故障定位技术可以分为基于线路模型的方法和基于预想事故集的方法两大类。基于线路模型的方法通过构建等效电路模型,利用端口电压电流关系建立方程,实现精确定位。该方法最典型的应用是利用测量阻抗与单位长度线路阻抗的比值实现故障定位的阻抗法,其具有原理简单清楚、经济性好的优势,但也存在高度依赖线路参数的准确程度的问题。文献[11]在阻抗法确定故障点的基础上,利用PMU通过测量点电压与故障点计算电压的相位关系排除伪故障点,实现故障的精确定位。文献[12]则首先基于节点阻抗矩阵,采用压缩感知技术求解欠定节点电压方程组,从而确定故障区域,然后利用阻抗法求得精确的故障位置,该方法的重大优势在于利用稳态电气量量测值,对同步性要求低,非常适用于中压配电线路的精确故障定位。文献[13]则考虑配电网结构的多T接特征,在假设故障发生在各线路的前提下,求解各线路端口电压方程,根据解的合理性确定实际的故障位置,该方法的优势主要在于受线路参数不准确的影响较小,能够解决中压配电网精确故障定位面临的问题。

预想事故集匹配法则是采用“事先计算、事后匹配”的方案,利用稳态信息进行配电网的故障定位^[14]。奥地利中压配电网利用该方案实现离线计算各区段故障的电气量信息,在故障发生后在线匹配相关信息,以此为基础确定故障区段。

利用暂态量测信息实现故障精确定位一直是配电网故障定位领域的研究热点^[15-17]。基于行波的配电网故障定位方法的基本原理是利用行波传播速度及其折反射规律来确定故障点的位置^[18-19]。行波定位技术在配电网中应用的主要问题在于:①配电线路的结构和拓扑复杂,行波传输路径及折反射均较为复杂,行波波头的自动识别困难;②高采样率的录波数据是行波故障定位技术成功应用的基础,应用于中压配电网存在技术经济方面的劣势;③行波定位,特别是利用广域信息的行波定位对录波数据的

同步性要求很高,目前在中压配电网中并不具备直接应用的条件。

此外,利用暂态信息实现配电网故障定位的方法还包括:利用暂态波形的相关性实现故障选线或者故障区段定位^[20]、利用暂态信息进行配电线路的参数识别并实现故障精确定位^[21-22],以及通过模型识别(匹配)的方法实现故障选线等。

应该指出的是,目前在配电网中应用的基于量测信息的故障定位方法均来源于输电线路故障定位技术,其更适用于两端安装有量测装置且参数准确的长距离输电线路,如何分析配电网的结构及参数特征,并以此为基础提出适用于配电网的故障定位方法应是未来必须关注的问题。

此外,随着中国城镇化水平的提升,中压配电网电缆化率持续提高,配电变压器中性点运行方式发生了很大的变化。对于中性点经小电阻接地的配电网而言,从运维的角度,高阻接地故障的准确识别与精确定位需求日益迫切。这是因为:一方面,城乡电网大多数人身触电事故的表现形式都是高阻故障,灵敏识别故障对于保证人身安全意义重大;另一方面,配电线路断线接地故障大多数也演变为高阻接地的形式,精确故障定位技术对于及时发现并恢复故障点、减少故障停电时间具有重要的意义。配电网高阻接地故障信息微弱,故障的识别与诊断不是理论问题,而是技术问题,需要引起足够的重视。

虽然本文主要针对中压配电网相间及三相故障的精确故障定位技术展开,但对于不同中性点运行方式的配电网而言,其发生单相接地故障时的故障定位问题虽然研究思路和手段有所不同,但因其对

于提高配电网故障处理的水平和防止故障范围的扩大以及保证人畜安全均具有重要的意义,其同样属于配电网故障定位的范畴,故在此部分一并进行了讨论。实际上,基于上述原理,国内外学者采用了不同的数学工具构建了形式各异的配电网故障定位算法,以小波变换和 Hilbert-Huang 变换(HHT)为代表的时频分析工具、以神经网络和支持向量机为代表的人工智能工具、以数学形态学和相关性分析为代表的图像处理技术等先进的信号处理技术在中压配电网故障识别与故障定位领域得到了广泛应用^[23]。这些成果,一方面推动了理论的进步,另一方面先进的数学工具对采样及同步的要求使其实用性备受质疑。因此,分析配电网故障定位,特别是精确故障定位技术面临的挑战,并抓住智能配电网建设的机遇,认真梳理配电网故障精确定位的本质,凝练科学问题,构建适合中压配电网特点的精确故障定位理论和技术框架具有重要的意义。

2 中压配电网精确故障定位技术的挑战

2.1 配电网故障定位技术面临的挑战

精确故障定位技术成功应用的前提条件包括:①算法的模型准确;②线路的参数准确;③线路两端的信息完善;④数据采样精度足够高且数据同步。从对故障定位的精确要求来看,一般情况下要求输电线路故障定位误差不超过2根杆塔之间的距离,即500~600 m,而这个误差对于配电网精确故障定位而言可能导致巡线范围大大扩大。

表1给出了就故障精确定位而言,输电网和配电网所面临的基础条件的不同。

表1 输电网与配电网精确故障定位的基础条件

Table 1 Basic conditions for accurate fault location of transmission and distribution networks

比较项目	输电网	配电网
网络结构	双电源环网	单电源辐射状+分布式电源
网络复杂程度	长线互联	多分支短线+多T接
线路长度	几十至几百千米	几百米~十几千米
线路参数	实测正序、零序、零序互感	无实测参数,多采用典型参数
线路结构	分裂导线/高压电缆	架空线/电缆/架空线+电缆
量测条件	完善(线路两端配置电压电流传感器)	薄弱(量测有限、缺乏录波、无同步机制)

由表1可见,就精确故障定位技术而言,即使不考虑高渗透率分布式电源带来的影响,其也面临着巨大的挑战。

1)模型不准确。在输电网中,模型不准确主要表现在算法对实际输电线路描述的误差,一般表现为分布电容、频变参数误差等。而对于中压配电网而言,模型不准确表现为对配电线路结构描述的不

准确上,也就是除了分布电容、频变参数误差等影响之外,还需要考虑架空-电缆混联线路、不规则同杆架设的线路等特殊结构的影响。

2)参数不准确。在输电线路故障定位中,参数的不准确主要表现为参数不连续带来的误差,以及季节等因素引起线路结构位置变化对参数的影响等。而对中压配电网而言,参数的不准确则表现为

参数未经测量,直接使用相关载流导体的典型参数,用误差较大的典型参数无法实现精确故障定位。

3)量测不足。量测不足表现为3个方面:互感器误差大、量测点配置不足、数据同步性差。输电线路两端均配置有保护级电流互感器(TA),且变电站具有完备的故障录波数据。配电网仅在馈线首端配置保护级电流互感器和继电保护装置,配电网用户侧及各分支点均不配置保护级电流互感器,且馈线终端装置/配电终端装置/配变终端装置(FTU/DTU/TTU)虽逐步开始配置录波功能,但其数据同步性较差。中压配电网目前的量测系统无法为精确故障定位提供足够的技术支撑。

此外,即使改善配电网的量测条件,也无法达到任何配电线路两端均配置有保护级电流互感器和PMU的条件,因此中压配电网的精确故障定位必然面临算法模型不准、参数偏差大和量测不足这些问题的挑战。

分布式电源,特别是通过电力电子逆变器并网的分布式电源导致配电网故障暂态过程更加复杂,其对行波以外的基于暂态信息的故障精确定位算法存在影响,主要表现为电源非线性特征引入的复杂电磁暂态过程影响暂态量的提取和应用。一般认为,虽然逆变器并网型的分布式电源响应速度快,但其仍存在一定的惯性,而行波以光速在配电网内传播,行波传播的时间尺度小于逆变器响应的的时间尺度,故行波原理的故障定位技术不受分布式电源的影响。

最后,需要指出的是,中压配电网的精确故障定位算法存在互补性。行波法作为目前在输电网故障定位中成功应用的暂态量算法,在应用于配电网时,由于配电网分支多、线路短、波头检测装置配置有限等因素,其可靠性仍存在的问题。当行波定位失效时,基于其他暂态、稳态量的故障定位算法可以提供具有一定精度的故障定位结果,帮助运维检修人员尽快找到故障点并快速恢复供电。

2.2 配电网故障定位技术发展面临的机遇

如前所述,中压配电线路的参数准确性、PMU的配置以及采样率和数据质量是影响中压配电网故障定位精度提升的重要因素。近年来,智能配电网的建设为故障定位技术的进一步发展带来了难得的机遇,主要表现在以下几个方面。

1)传感和测试技术的飞速发展

传感和测试技术是推动配电自动化技术发展的关键因素。大量程、宽带宽、高精度、小型化、非直接接触式的传感器已经开始逐步在配电系统中获得应用,低成本的传感器网络引入的多源电气量和非电

量测试数据为实现中压配电网的精确故障定位创造了良好的条件。

2)配电系统信息化水平的提升

配电系统信息化水平的提升不仅包括数据采集能力的提升,而且包括数据质量的提升,以及信息共享能力的提升。

数据质量除了数据本身的采样率之外,还包括数据同步能力的提升。将工业控制网络中使用的信息同步技术应用于具有广域特征的中压配电系统中,提升数据同步的能力,对于以行波时差信息为代表的暂态量故障精确定位技术具有重要的意义。

打破信息孤岛,实现数据共享是信息化水平提升的重要特征。由于中压配电网自身的特点,在输电系统中成功应用的精确故障定位技术极易出现“水土不服”的情况,这种情况很难通过修修补补来彻底解决。利用中压配电网不同数据的冗余性,通过数据融合技术来提升故障定位方案的性能是一个可行的发展方向,不同系统间数据的一致性和可共享性是实现多源信息融合的基础。

3)数据融合与人工智能技术的发展

多源数据融合技术和人工智能技术的发展为实现基于包括D-PMU信息在内的多源信息的精确故障定位技术的应用提供了技术基础。随着Dempster/Shافر证据理论(D-S证据理论)、人工神经网络、支持向量机、决策树等数据与智能技术的发展和成熟,其中压配电网精确故障定位中的应用已成为可能。特别是对包括高阻接地故障在内的微弱故障的准确识别与精确故障定位而言,综合利用不同原理方法的结果,利用同构或异构数据融合技术实现故障定位,能够真正做到“取长补短”,提升故障定位的精度。

实际上,数据可视化、高级信号处理等技术也推动着中压配电网精确故障定位技术的发展,但是传感与测试技术、信息技术和数据与人工智能技术在本质上为新型配电网故障定位技术的发展提供了支撑,利用这些技术有望实现全新的中压配电网精确故障定位理论与应用体系。

3 基于D-PMU的配电网精确故障定位方案和关键技术

配电网精确故障定位本身是一门技术,为实现精确的故障定位,一种可行的方案是跳出现有的来源于输电系统的故障定位方法与方案的限制,分析配电网的特点和实现精确故障定位的必要条件,解决在模型欠准确、参数不精确、量测不充分、系统非线性条件下的配电网故障精确定位问题。

3.1 基于D-PMU的配电网精确故障定位方案

目前,输/配电线路精确故障定位的前提是已知故障线路双端量信息且信息同步可用,或者能够通过已知信息推算出可用的故障线路准确双端量信息。虽然通过D-PMU获取配电线路同步双端量信息是可行的,但由于故障定位精度受制于线路参数的准确性、算法模型的准确性以及数据采集系统的性能,加之需要考虑分布式电源及柔性负荷等非线性装置引入的复杂故障过程,作为电力系统故障处理的经典问题,配电网故障精确定位问题仍然面临较大的挑战。

由表2中输/配电线路精确故障定位算法的比较情况可见,基于相量估计的频域方法无法适应电力电子装置复杂的电磁暂态特征,时域方法因其需要通过参数辨识等方法进行测距,仍在一定程度上受到分布式电源及柔性负荷非线性故障特征的影响,而由于故障行波的产生与传输响应时间小于电力电子装置对故障的响应时间,故其能够更好地适应含高比例新能源及柔性负荷的配电网条件,从而实现精确故障定位。

进一步地,基于频域电压分布和基于时域电压分布的精确故障定位方法采用真实、精确的线路模型,没有原理性误差,定位精度高,但其高度依赖于线路参数的准确性,虽然参数辨识技术能够显著提高配电网线路参数的准确性,但不完全的量测配置无法保证线路参数的绝对正确,对基于时、频域网络电压分布的故障定位方法影响较大。虽然基于行波时差特性的配电网故障定位方法定位精度高,但由于配电网拓扑连接关系复杂,且线路较短,行波波头与故障类型和故障时刻关系密切,存在可靠性问题,

并且,行波波头的提取对采样率和信号识别算法的要求较高,其在配电网中的应用需要权衡技术、经济的合理性。不依赖于准确参数的基于模阻抗特征的故障定位方法,基于配电线路1模参数和2模参数的特定关系构建测距方程实现配电线路的精确故障定位,但由于使用了2模网络,因此无法涵盖配电网中的全部故障类型。

表2 常用输/配电线路故障定位方法比较
Table 2 Comparison of common fault location methods for transmission and distribution lines

常用故障定位方法	优势	劣势
频域电压分布法	定位精度高	参数敏感 对电力电子装置适应性差
时域电压分布法	定位精度高 对电力电子装置适应性强	计算量大 参数敏感
模阻抗特征法	不受参数误差影响 对电力电子装置适应性强	适用范围有限
行波时差网络法	定位精度高 对电力电子装置适应性极强	可靠性问题 经济性较差

对于传统的时、频域故障定位方法,因为任何一种单一算法均无法满足配电网精确故障定位的要求,如图1所示,基于D-PMU的配电网精确故障定位方案采用数据融合算法实现“取长补短”,通过数据融合技术全面提升故障定位精度。首先利用满足最小配置要求的D-PMU提供的同步相量信息、同步波形信息以及行波时差信息,具有互补性的各故障定位算法独立地计算故障位置,生成故障距离矩阵,然后采用回归性融合方法对非行波原理的故障定位结果进行融合,最后采用选择性融合机制“取长补短”地输出精确故障定位的结果。

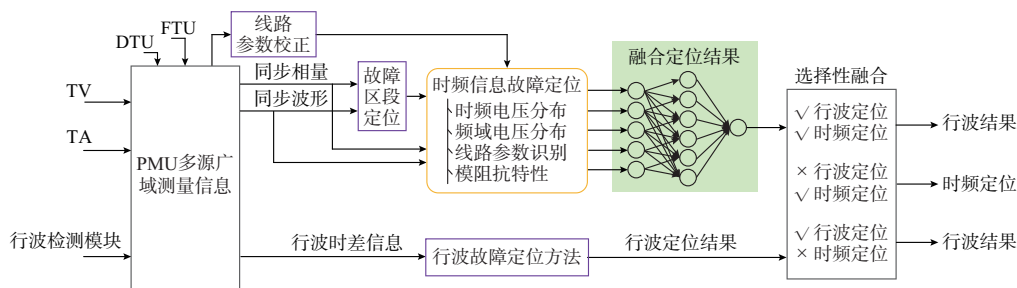


图1 基于D-PMU的配电网故障精确定位方案
Fig. 1 D-PMU based accurate fault location scheme of distribution network

3.2 基于D-PMU的配电网精确故障定位的关键技术

1) D-PMU的安装与配置

D-PMU能够提供带有同步时标的相量和录波数据信息,同时也可以作为其他新型传感器信息同

步和传输的重要途径,是实现中压配电网故障精确定位最重要的信息来源。由于中压配电网结构的特点和必须考虑的经济因素,D-PMU在配电网中无法实现足额配置。就精确故障定位算法而言,其本质上都是采用双端量故障定位的原理,因此,

D-PMU的配置需满足定位区域内任何一条线路的双端电压电流均可以由D-PMU数据经推算得来,也就是说,D-PMU的配置需能够保证区域内任一母线电压和支路电流的计算要求,以如下白兔变电站为例,若实现白F9馈线区域精确定位功能全覆盖,其最小D-PMU配置如图2所示。

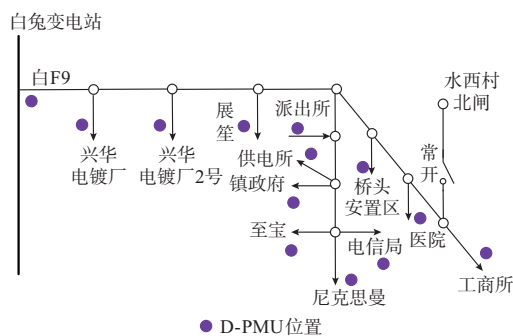


图2 白兔变电站最小D-PMU配置方案
Fig. 2 The minimum D-PMU configuration scheme for Baitu substation

2) 配电网参数辨识技术

如前所述,实现中压配电网故障精确定位的前提条件是已知精确的线路参数,而现阶段配电网运行的实际情况又无法满足参数的准确性要求。因此,研究利用D-PMU稳态运行数据和暂态扰动数据,对配电网进行参数辨识,修正参数误差,才能够保证实现中压配电网的精确故障定位。

根据D-PMU最小配置方案,在系统正常运行时,对于任一配电线路段,基于分布式参数模型可以通过D-PMU量测数据计算出双端电气量,本文称之为“虚拟量测量”。因此可以通过构建求解如下优化问题,并经迭代实现对该配电线路段的 π 形等效电路参数的准确辨识。

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n F_{li}^2 + F_{2i}^2 \\ \text{s.t. } \frac{R_m}{R_r}, \frac{L_m}{L_r}, \frac{C_m}{C_r} \in [0.7, 1.3] \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_{li} 为由对端数据推算的本端电流相量与本端“虚拟量测”电流相量差的实部; F_{2i} 为由对端数据推算的本端电流相量与本端“虚拟量测”电流相量差的虚部; R_m, L_m, C_m 为配电线路参数的已知值(有误差的参数); R_r, L_r, C_r 为配电线路参数的真实值(优化问题的解); n 为配电段内线路的条数。

3) 行波波头信号直接获取技术

探究经济、可靠的行波波头获取方案,改善行波定位方案应用中的技术经济条件制约是实现实用化的配电网精确故障定位目标的关键。

对于基于行波时差网络的故障定位原理而言,灵敏检测微弱的波头到达时刻是正确定位的前提。隧道磁阻(tunnel magnetoresistance, TMR)传感器利用磁场变化引起磁电阻变化的原理实现对微弱电气信号引起的磁场变化的高灵敏度检测,对于电流传感器而言,其检测精度可以达到纳安级别,并且可以通过非接触的方式安装在变压器外壳等能够感知零序磁场变化的位置。TMR传感器可以利用D-PMU的同步信号标定行波波头到达时刻,并利用D-PMU的数据通道以较高的优先级与主站通信,从而实现精确的故障定位。实际应用中,TMR传感器以及相应的波头处理模块嵌入D-PMU中,避免了采用复杂的高速信号采样及信号传输技术,通过一体化设计实现非采样方式检测行波波头的革命性变革,以较好的技术经济性能在配电网中实现了基于行波原理的精确故障定位。

TMR传感器与D-PMU的关系,以及相关信息和信号路径如图3所示。

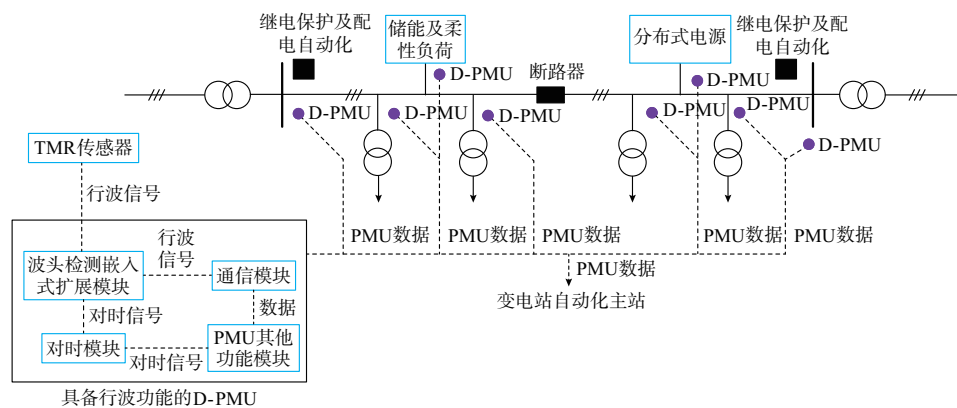


图3 TMR传感器与D-PMU的关系示意图
Fig. 3 Schematic diagram of relationship between TMR sensor and D-PMU

4) 多故障定位结果的融合技术

如前所述,对于各时、频域定位方法而言,各方法之间具有一定的互补关系,对多种定位结果进行“回归性”融合,以期得到更为精确的故障定位结果。对于基于行波时差网络的故障定位结果,其主要问题仍然是可靠性问题,对于行波法与传统时、频域之间的融合则为“选择性”融合。

时、频域定位结果的“回归性”融合有2种实现方式:其一,是利用机器学习的方法,采用常用的机器学习算法,利用仿真数据构成训练集,对机器学习算法进行训练,得到其“回归”模型,在配电网故障时,基于训练好的智能算法实现多判据融合;其二,是利用集成学习(ensemble learning)方法,构建多故障定位结果的选择模型,以仿真数据作为训练集,对集成学习模型进行训练,在配电网故障时,该模型在多故障定位结果中选择一个误差最小的结果作为该部分的输出。实际上,时、频域故障定位结果的“回归性”融合效果,取决于仿真生成训练集数据的通用性,其泛化能力的强弱取决于对机器学习及集成学习网络输入层的设计、调参情况以及训练集对场景覆盖的普遍性。

对于时、频域定位结果与行波定位结果的“选择性”融合机制,其目的在于保证行波定位失败或结果不可靠的情况下故障精确定位程序的整体性能。鉴于行波定位算法的高精度特点以及TMR传感器对行波波头获取方式的创新,时、频域定位结果与行波定位结果的“选择性”融合机制设计如下:①当行波定位程序与时、频域定位程序均输出有效定位结果时,故障定位程序选择行波定位结果输出;②当行波定位结果自检错误或行波定位程序未启动的情况下,故障定位程序选择时、频域定位结果输出。该融合机制的实质在于给予行波定位程序更高的优先级和可信赖度,时、频域定位结果作为辅助方案保证中压配电网故障精确定位模块的整体可靠性。

3.3 基于人工短路试验的方案验证

为验证上述方案的可行性及定位精度,2019年7月12日在某供电局10 kV架空线路上通过无人机进行了2次人工短路试验,并利用配电网实际装设的D-PMU成功实现了故障的精确定位,简化的故障位置与D-PMU安装位置如图4所示。图中:3号装置安装于1号杆塔,2号装置安装于18号开关房,其与44号杆塔通过51 m同轴电缆相连接,围垦线为10 kV架空配电线路,导线类型为LGJ-240。其中,25号杆塔、33号杆塔、36号杆塔、37号杆塔均有分支线路(简化未画出)。无人机人工短路试验现场如附录A图A1所示,共进行2次试验:第1次试验

成功实施了相间短路故障;第2次试验成功实施了三相短路故障。数据经由D-PMU采集并上传,同时现场配置了完备的临时性故障录波装置采集故障信息并进行分析。

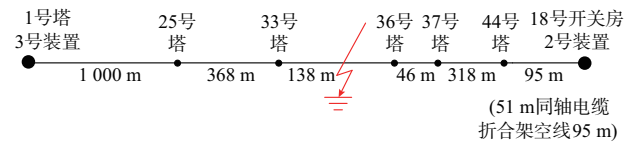


图4 人工短路试验系统示意图
Fig. 4 Schematic diagram of artificial short-circuit test system

2次人工短路试验中,行波保护均可启动并给出故障定位结果,根据“选择性”融合机制,输出行波定位结果如表3所示。需要特别说明的是,因为采用无人机进行人工短路试验过程中实际故障位置难以精确确定,在分析误差的过程中采用了估计故障位置的方法。由表3可见,本次人工短路试验中,本方案的2次故障定位误差分别为117.38 m和105.92 m,定位精度均小于150 m,能够满足人工巡线及故障恢复对故障定位精度的影响。

表3 人工短路试验故障定位结果
Table 3 Fault location results of artificial short-circuit test

故障时刻	故障位置/m	定位结果/m	误差/m
2019-07-12T11:08:21.392	1 368+134	1 368+16.62	117.38
2019-07-12T12:42:19.395	1 368+133	1 368+27.08	105.92

4 结语

中压配电网精确故障定位技术对于提升配电网供电可靠性具有重要的意义。本文在对广泛采用的配电网故障定位技术进行综述的基础上,分析了影响配电网相间故障定位准确性的决定性因素,指出虽然配电网精确故障定位技术的实施面临着较大的困难,但智能电网技术也为实现配电网精确故障定位的目标带来了机遇。

在模型欠准确、参数不精确、量测不充分、故障特征微弱、系统非线性的条件下实现配电网故障的准确识别和精确故障定位具有很大的难度。事实已经证明,照搬输电系统中的故障定位理论与技术体系,并不能解决配电网精确故障定位的问题。充分分析配电网的结构及参数特征,充分利用智能电网条件下多源的信息和高质量的量测数据,构建独立的配电网故障定位算法体系,并通过数据融合技术对结果进行融合提升,可能是实现配电网精确故障定位的一个有效途径。

随着配电网的发展,大型城市配电网开始大面

积采用中性点有效接地方式运行,绝缘导线也开始逐渐推广应用,中性点有效接地配电系统的极高过渡电阻接地威胁着人身和设备的安全,配电网微弱故障处理问题也逐渐引起重视,研究高阻接地故障的特征,并充分利用测量与传感技术、信号处理技术和故障处理技术的最新研究成果,可靠识别高阻接地故障并实施有效隔离和精确定位,对于保证配电网的安全运行具有重要的意义。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 国家能源局,中国电力企业联合会.2017年全国电力可靠性年度报告[EB/OL].[2019-07-01].<http://www.nea.gov.cn/down/kekaoxingbaogao2017.pdf>. National Energy Administration, China Electricity Council. Annual report of national power reliability (2017) [EB/OL]. [2019-07-01]. <http://www.nea.gov.cn/down/kekaoxingbaogao2017.pdf>.
- [2] 唐金锐,尹项根,张哲,等.配电网故障自动定位技术研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(5):7-13. TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Survey of fault location technology for distribution networks [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 7-13.
- [3] PHADKE A G, THORP J S, ADAMIAK M G. A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency and rate of change of frequency [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(5): 1026-1038.
- [4] 张慧芬,潘贞存,桑在中.基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J].电力系统自动化,2004,28(3):64-66. ZHANG Huifen, PAN Zhencun, SANG Zaizhong. Injecting current based method for fault location in neutral isolated power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 64-66.
- [5] 刘健,张小庆,同向前,等.含分布式电源配电网的故障定位[J].电力系统自动化,2013,37(2):36-48. LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, TONG Xiangqian, et al. Fault location for distribution systems with distributed generations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 36-48.
- [6] 陈堂,赵祖康,陈星莺,等.配电系统及其自动化技术[M].北京:中国电力出版社,2003. CHEN Tang, ZHAO Zukang, CHEN Xingying, et al. Power distribution system and its automation technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [7] 刘健,王玉庆,芮骏,等.智能接地配电系统关键参数设计[J].电力系统自动化,2018,42(16):180-186. LIU Jian, WANG Yuqing, RUI Jun, et al. Key parameter design of smart grounding distribution systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 180-186.
- [8] 张维,宋国兵,豆敏娜,等.基于自适应重合闸的配电网快速故障定位与隔离方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(18):60-67. ZHANG Wei, SONG Guobing, DOU Minna, et al. A quick fault location and isolation method in distribution network based on adaptive reclosure [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 60-67.
- [9] WANG T, SONG G, WU L, et al. Novel reclosure scheme of MMC-HVDC system based on characteristic signal injection [C]// The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, June 28-30, 2018, Chengdu, China: 1-5.
- [10] 宋国兵,黄炜,王晓卫,等.一种配电线路单端全线速动保护方案[J].电网技术,2018,42(1):338-345. SONG Guobing, HUANG Wei, WANG Xiaowei, et al. A whole-line quick-action protection scheme for distribution lines based on single-end electrical parameters [J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 338-345.
- [11] 周治国,高文焘,刘文亮.基于 μ PMU的主动配电网故障定位方法研究[J].电网与清洁能源,2016,32(3):72-77. ZHOU Zhiguo, GAO Wentao, LIU Wenliang. Research on fault location based on μ PMU for active distribution network [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(3): 72-77.
- [12] 贾科,董雄鹰,李论,等.基于稀疏电压幅值量测的配网故障测距[J].电网技术,2020,44(3):835-844. JIA Ke, DONG Xiongying, LI Lun, et al. Fault location for distribution network based on transient sparse voltage amplitude [J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 835-844.
- [13] 王成斌,臧志皓,张恒旭,等.基于微型PMU的配电网多分支架空线路参数无关故障定位算法[J].电网技术,2019,43(9):3202-3209. WANG Chengbin, YUN Zhihao, ZHANG Hengxu, et al. Parameter-free fault location algorithm for multi-terminal overhead transmission line of distribution network based on μ PMU [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3202-3209.
- [14] 马士聪,高厚磊,徐丙垠,等.配电网故障定位技术综述[J].电力系统保护与控制,2009,37(11):119-124. MA Shicong, GAO Houlei, XU Bingyin, et al. A survey of fault location methods in distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 119-124.
- [15] 孙波,孙同景,薛永端,等.基于暂态信息的小电流接地故障区段定位[J].电力系统自动化,2008,32(3):52-55. SUN Bo, SUN Tongjing, XUE Yongduan, et al. Single phase to ground fault section location based on transient signals in non-solidly earthed network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 52-55.
- [16] 张伟刚,张保会,胡海松,等.应用小波包分析实现配电网单相接地故障选线[J].电力系统自动化,2009,33(23):60-64. ZHANG Weigang, ZHANG Baohui, HU Haisong, et al. Application of wavelet packet analysis in phase-to-ground fault detection of distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 60-64.
- [17] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等.应用小波检测故障突变量特征实现配电网小电流故障选线保护[J].中国电机工程学报,2001,21(10):78-82. JIA Qingquan, LIU Lianguang, YANG Yihan, et al. Abrupt

- change detection with wavelet for small current fault relaying [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.
- [18] 刘晓琴, 王大志, 江雪晨, 等. 利用行波到达时差关系的配电网故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4109-4115.
LIU Xiaoqin, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. Fault location algorithm for distribution power network based on relationship in time difference of arrival of travelling wave [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4109-4115.
- [19] 张健, 王奕, 曾祥君, 等. 基于多端行波到达时差的电网故障选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 51-57.
ZHANG Jian, WANG Yi, ZENG Xiangjun, et al. A novel fault line detection method with the time difference of multi-terminal detected travelling waves for distribution networks [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 51-57.
- [20] 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): 48-52.
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): 48-52.
- [21] 索南加乐, 李宗朋, 王莉, 等. 基于频域参数识别方法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 93-97.
SUONAN Jiale, LI Zongpeng, WANG Li, et al. Fault line selection in distribution networks based on parameter identification method in frequency domain [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 93-97.
- [22] 索南加乐, 张超, 王树刚. 基于模型参数识别法的小电流接地故障选线研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 65-70.
SUONAN Jiale, ZHANG Chao, WANG Shugang. Fault line selection in the non-solid earthed network based on the model identification method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 65-70.
- [23] GHADERI A, GINN H L, MOHAMMADPOUR H A. High impedance fault detection: a review [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 376-388.
- 于力(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 配电自动化. E-mail: yuli@csg.cn
焦在滨(1976—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统继电保护、配电网故障定位. E-mail: jiaozhaibin@mail.xjtu.edu.cn
王晓鹏(1996—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 主动配电网的故障诊断. E-mail: 932563439@qq.com

(编辑 章黎)

Accurate Fault Location Scheme and Key Technology of Medium-voltage Distribution Network with Synchrophasor Measurement Units

YU Li¹, JIAO Zaibin², WANG Xiaopeng², CHEN Wei³, DENG Feng⁴

- (1. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510080, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid (School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China;
4. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The technology of accurate fault location in medium-voltage distribution network has great significance for reducing power outage time and interruption frequency in power system, and improving power supply reliability. The wide application of synchrophasor measurement technology has laid the foundation for accurate location of faults in distribution networks. The studies of the accurate fault location methods in medium-voltage distribution network based on synchrophasor measurement unit for distribution network (D-PMU) are analyzed and prospected. Based on analyzing the current situation of fault location technology of medium-voltage distribution network, the opportunities and challenges faced by the current accurate fault location of the distribution network are expounded, and the preconditions for realizing accurate fault location are put forward. On this basis, aiming at the main scientific issues of the research on accurate fault location of medium-voltage distribution network, the research contents to be focused on are proposed, and the relevant research ideas and technical paths are elaborated.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0902900).

Key words: synchrophasor measurement unit; fault location; transient component; traveling wave; data fusion

