

配电网故障定位技术发展现状及展望

梁睿, 孟祥震, 周鲁天, 彭楠

(江苏省煤矿电气与自动化工程实验室

(中国矿业大学电气与动力工程学院), 江苏 徐州 221116)

摘要:快速准确的故障定位是电网快速自愈的基础,是实现智能配电网的基础关键技术。文中结合近年来国内外学者的研究成果,对现有的配电网故障定位研究进行了综述,归纳总结了利用暂态电气量特征和稳态电气量特征的故障区段定位方法,基于行波法、阻抗法及非行波分析的暂态电气量、非稳态分析的稳态电气量的故障精确定位方法。对各类方法的先进性和存在的问题进行了述评,并结合实际工程应用、国内外研究现状与配电网的发展趋势,对未来配电网故障定位研究进行了展望。

关键词:配电网;故障定位;区段定位;精确定位

中图分类号:TM726

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)06-0020-08

0 引言

配电网是连接输电网与电力用户的纽带,配电网故障定位是提高需求侧供电可靠性的基础性工作,是实现配电网自动化的中心技术环节,同时也是保证整个电力系统安全稳定运行的重要工作之一。由于故障选线只能粗略确定故障所在馈线,近年来的研究多集中于故障区段定位和故障精确定位这两种精度更高的配电网故障定位技术的应用。但相较于输电线路,配电系统的网络结构较为复杂,支路线路较多,运行方式也更多样。这无疑给配电网的故障定位技术研发带来了更多的难题与挑战。

目前应用于现场的工业产品多数仍仅能实现故障所在线路的确定,在灵敏性与可靠性方面不尽人意。而故障区段定位,可以实现故障点所在故障区段的确定,以便隔离故障并恢复非故障区域的供电。故障精确定位,即实现故障位置的直接定位,避免人工巡查检出故障点。采用中性点有效接地方式的配电网故障特征明显,其故障定位技术主要面临网络结构复杂、线路分支多带来的问题,但我国的配电网多采用中性点非有效接地,即小电流接地方式,因此还须克服故障特征信号微弱的难题。

本文将结合国内外最新研究成果,对配电网故障区段定位和故障精确定位两类技术进行归纳论述,概略分析。重点关注在配电网中最为常见的单相接地故障,同时基于目前的研究现状,对配电网

故障定位的发展方向趋势进行展望。

1 故障区段定位

配电网故障区段定位可以及时可靠地确定故障区段,以便隔离该故障区域并恢复非故障区域的供电,尽量缩小巡线范围,为抢修人员排除故障,提供尽可能的帮助。这对于提高需求侧供电可靠性、实现配电网安全运行具有重要意义,同时,区段定位也为线路的自动化保护动作提供了重要依据。现阶段,主要是基于测量得到的电压、电流或其他参数来实现及时可靠的故障区段定位的研究。

1.1 稳态电气量特征的区段定位

配电网区段定位可以通过监测各处区段的故障电流幅值、相角、方向和电压幅值等稳态电气量来实现。故障发生后,故障点周围测量点的电气量会发生明显变化,可利用这种稳态信息差异确定故障区段。

文献[1]利用故障点上游区段相电流突变量与相电压突变量导数正相关而故障点下游区段负相关的性质确定故障区段。该方法克服了现有配电网单相接地故障区段定位通信量大以及零序电气量难以测量的缺点,具有自举性,在不具备通信条件的配电网中通过故障指示器的形式实现,在具备通信条件下上传数据量少,通信系统负担小。文献[2]提出一种基于相电流故障分量的配电网区段定位方法。在单相接地故障期间,非故障相的故障电流分量与故障点后区段电流分量的振幅和波形相同,而在故障点和母线之间的部分有很大不同,所以在部分位置安装故障检测装置,测量和比较不同位置的三相故障电流分量,结合网络拓扑结构,确

收稿日期:2018-07-09;修回日期:2018-08-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51504253);江苏省自然科学基金资助项目(BK20161185)

定故障区段。

随着分布式电源(distribution generation, DG)的发展,对含有 DG 的配电网故障定位也是目前研究的热门。文献[3]通过在某线路段内比较整定值与故障点上下游故障电流幅值比确定故障区段。该方法无须改变原有的过电流检测整定值,简单易行,在 DG 容量低、对电压变化影响不大的系统中适用。文献[4]提出一种比较区段内的克拉克 α 、 β 模电流相角差值与零的关系进行故障定位方法。该方法仅须测量电流,可在故障发生后 10 ms 内检测出故障,且不受由 DG、负载投切变化所引起的非故障状态扰动的影响,能够在微电网并网与孤岛运行状态下实现故障定位方法的统一。

通常情况下,依据故障后稳态信息差异性的区段定位不需要大量的数学计算,并且通信量较少,通过少量信息即可确定故障区段。

1.2 暂态电气量特征的区段定位

除了稳态之外,故障区段定位也经常选取暂态电气量。利用零序电压、电流的特征差异区分健康线路与故障线路。

文献[5]提出一种利用变电站出线端和非出线端故障线路分支的零序电流确定故障区段的方法。该方法在故障分支上测量消弧线圈参数改变前后零序电流、电压的突变量来确定故障区段,但在配电网结构及运行特征复杂的情况下将降低定位准确率。文献[6]提出构造基波零序电流故障方向测度和暂态相电流故障方向测度,指示单个测量点馈线终端设备(feeder terminal unit, FTU)的故障方向,定量评价故障特征的明显程度,并根据多个测量点的故障方向测度构建故障定位多目标函数。该方法只需 FTU 测量一相电压和三相电流,降低了设备投入成本,采用优化求解思想提高了故障定位的容错性能,对故障初始角、过渡电阻及噪声影响呈现较强耐受性。文献[7]提出利用故障上下游区段具有不同的谐振频率,并使用 K -means 聚类算法提取线路测量点暂态重心频率,结合重心频率的幅值特征以确定故障区段。该方法能克服信息畸变引起的误判,容错性能较好,但上传信息为单一的方向标识,未区分信号的可靠程度,对特征信息的利用不够充分。文献[8]提出一种利用上下游间暂态电流相似性和极性关系的不同以确定故障区段的方法,该方法消除了定位盲区,提高了暂态定位原理的可靠性和适应性。

在 DG 接入的配电网中,通过暂态量与故障区段的数学关系推导来定位也是未来有源配电网发

展的重点。文献[9]利用故障点处由各电源共同作用产生的零序故障电流与由各 DG 测量点处的零序故障电流相等的关系来确定故障区段。该方法在 DG 较少时准确率较高,且不受系统拓扑结构、运行方式、故障时间和接地电阻的影响。

相较于稳态电气量特征的故障区段定位,暂态电气量不易监测,所以暂态电气量特征的区段定位多以对比故障点附近暂态信息的差异来确定。在接入 DG 的配电网中,还须考虑 DG 对配电网电气特征的影响,在限制一定 DG 渗透率的情况下,基于稳态的故障区段定位依然可以使用。在暂态中,基于在 DG 处产生的零序故障电流与故障点零序故障电流相等的关系,提出了一系列故障精确定位的方法。

2 故障精确定位

配电网故障精确定位目的在于快速定位出准确的故障位置,避免人工巡查故障点,迅速及时地排除故障,修复线路和恢复供电。这对保证配电系统的安全稳定和经济运行意义重大。

目前关于配电网故障精确定位的研究多致力于解决分支线路较为繁多或故障特征较为微弱的问题。配电网故障精确定位主要有阻抗法、非阻抗分析的稳态故障精确定位方法、行波法和非行波分析的暂态故障精确定位方法 4 种分类。

2.1 阻抗法定位

阻抗法是一种经典的精确定位方法,基本原理是根据故障回路阻抗与故障距离成正比实现定位。但阻抗法定位精度高度依赖准确线路参数获知,相关人员对传统阻抗法进行了改进研究,使其可以适应配电网支路端口多、负荷影响大的状况,并已取得了一定成果。

阻抗法多利用线路的单端电气量进行故障距离的计算,方法简单,但是误差较大。为解决该问题,文献[10]基于传统的解微分方程算法进行改进,解决了高阻接地故障时测距误差过大的问题。该方法简单实用,仅需单端数据。文献[11]提出一种适用于配电网的广义单端阻抗故障定位方法,利用单端线路数据,建立新的电流分配因数表达式,并定义了误差指数来衡量多重估算的误差的影响。该方法定位速度较快,精度可靠。文献[12]提出基于节点阻抗矩阵的配电网故障精确定位改进算法,采用静态电压特性的负荷模型代替恒阻抗负荷模型,模拟配电网中存在的中间负荷及分支,并提出将精确定位与配电网的馈线自动化功能结合以减

少伪故障点的个数,实现故障定位。该方法仅利用变电站出线电压和电流值,就能确定故障精确位置,可以较好适应负荷变动。文献[13]提出一种基于阻抗的不平衡功率定位的方法,通过在变电站测量电压和电流值,推导出适用于多种故障类型的故障定位方程,克服了现有阻抗法需要故障识别的弊端。该方法也综合考虑了多种配电网的不平衡条件,具有良好的适应性与可靠性。

通常情况下,阻抗法故障精确定位的经济成本相对较低,适合在大规模配电网中应用。但其易受线路阻抗、线路负荷和电源参数的影响,且在分支数多、结构复杂的配电网中的可靠性仍需进一步验证。

2.2 非阻抗分析的稳态故障精确定位

在故障精确定位中,非阻抗分析的稳态故障精确定位方法众多。在稳态电气量特征中,部分方法通过寻找稳态电气量特征与故障距离的数学关系确定故障距离。

文献[14]基于遗传算法建立了改进的配电网故障定位数学模型,根据故障诊断理论中最小集的概念建立了环网开环运行配电网的故障定位统一数学模型,并运用广义分级的处理思想提高了故障定位的效率。文献[15]提出一种基于脉冲响应(图像)的时域故障定位方法,在正常运行下捕获电力系统的电子图像,在故障检测之后,获取更新的电子图像并与其进行差异比较,以此估计故障距离。文献[16]提出了一种基于分支电流状态的故障位置的方法,首先使用基于迭代状态估计算法来查找到距离故障位置最近的节点,然后检测连接到选定节点的所有线路并定位故障。该方法在不同故障类型中均具有良好的准确性和鲁棒性。

如今,随着配电网中智能设备安装量的增加、配电网自动化程度的提高与通信技术的发展,涌现出使用智能测量设备的故障定位方法。常见的智能化设备有:故障指示器、同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)、智能电表、智能终端馈线仪表、分段器等设备。

文献[17]提出了一种在配电网中多端非均匀传输线的精确定位方法,在架空线路与电缆的混合线路中,使用PMU获得电压和电流值。首先,通过故障选线缩小可疑的故障区域,再通过计算每个测量单元的归一化程度,推算故障精确位置。文献[18]提出一种利用具有电压暂降监视功能的智能终端馈线仪表确定故障精确位置的方法,通过监测在配电网不同节点的电压来估算故障位置。基于

不同的故障点节点阻抗矩阵,将不同节点仪表测量的电压暂降与故障电流相关联。为了提高准确性,将负载用恒定阻抗模型表示,并纳入阻抗矩阵,确定故障位置。文献[19]提出一种通过稀疏表示矢量,模糊集理论和机器学习实现的配电网故障精确定位方法,须沿主要馈线安装智能电表监测线路故障前和故障时的电压。由测得电压下沿值产生一个矢量,其维数小于系统中的节点数量。通过故障电流矢量,用模糊集均值理论,分析非零值来估计可能的故障位置。

在DG接入的配电网系统中,利用DG端的电气量与故障点电气量的关系确定故障距离是目前含DG式配电网故障精确定位的热点。

文献[20]提出了一种通过测量主变电站和DG的电压和电流值,从而获得故障节点的距离的方法。此方法不必识别故障类型,并且消除了多识别算法导致的误差。文献[21]也提出了一种使用主变电站和DG端记录的测量值来确定精确距离的方法。基于迭代潮流算法,提出了一种故障定位方程,将同步角度视为未知变量进行估算,因此无须同步测量。此法适用于多种故障类型及不同的DG,且通过简单算法修正,即可在任何分布式潮流条件下实现故障精确定位。文献[22]提出最小故障电抗概念,该方法于网络单元监测相电流,使用斐波那契阶梯搜索技术,估算每个网络单元对故障点的影响,确定故障位置。此方法不必建立各个参数模型,且适用于含有DG的配电网类型。

通过稳态电气量特征确定故障距离是比较常见的方式,特别是智能化测量设备以及配电自动化的广泛应用为基于稳态电气量特征的定位提供了广阔的发展空间,在含有DG的情况下,可在DG侧加装测量设备。稳态电气量特征的故障精确定位在未来大有可为。

2.3 行波法定位

根据行波理论,线路发生故障时,会产生向系统其他部分传播的行波信号,因此可以通过在线上检测故障行波实现故障精确定位。其基本原理有通过测量故障行波在故障点和测量端往返时间精确定位(单端法)和行波到达不同测量端的时间差精确定位(双端法)。行波精确定位受故障类型、负荷变化及系统运行方式的影响较小,但要求对行波信号的准确检测。近年来,相关人员基于扩展的双端精确定位原理,结合行波传输的各个变电站的数据进行故障定位的广域行波定位成为趋势。

文献[23]利用迭代算法提取出更为准确的零

模波速度,再基于模量行波传输时间差实现故障的双端定位。该方法可以有效定位主线路或支路线路上的故障点,且无须时间同步。文献[24]提出通过识别来自故障点和不连续点的反射波来确定故障区段,从而找出与故障点相关的两个反射波,并由这两个波的最大相关时间计算得到故障点到测量点的距离。该方法主要与故障位置和线路结构有关,具有良好的精度。文献[25]分别建立故障前行波到达节点的时间差矩阵,再通过比较两个矩阵的差异值实现故障定位。该方法不受线路结构、分支数量的影响,且在行波到达时间误差较大的情况下也能实现定位。文献[26]构建配电网关联矩阵和距离矩阵,利用末端的行波到达精确时间信息和配电网拓扑结构矩阵,剔除无效的波头时间信息,再基于有效的波头时间信息实现故障定位。该方法仅利用配电网末端时间信息进行故障定位,不需要使用行波其他特征量,不受配电网参数变化带来的影响。文献[27]依据线模行波突变与传播特性,主动从线路首端三相同时注入高压脉冲,测得各相返回的行波数据,实现故障精确定位。该方法消除了配电网中不平衡负载的影响,降低误动率。

文献[28]首先通过故障信号频域分析,得到故障点的特征频率,根据频域分析得到故障初步位置,然后结合故障信号时域分析,利用初始波头与反射波头时间差实现故障精确定位。该方法能精确地辨别反映故障距离的对端母线反射波头,提高行波频域分析的精度与时域分析的可行性,通过对故障暂态信号的时频域综合分析,实现故障精确定位。文献[29]基于经验模态分解和维格纳维尔分布瞬时能量曲线,确定故障初始波头的到达时刻,并且提出了一种监测电缆两端电压波形过零点的电缆双端故障定位算法,解决了双端数据不同步的问题。本文提出的双端故障定位算法与需同步的双端算法相比,具有较高的定位精度。

现阶段,行波法故障精确定位实验效果达标,方法理论上具备较高的可行性。但由于配电网规模庞大,支路众多,混合线路中波阻抗可变,行波折反射情况复杂,保证波信号的准确获取仍存在问题。

2.4 非行波分析的暂态故障精确定位

除了暂态行波信号,近年来涌现出大量基于其他暂态电气量特征的故障精确定位的研究。由于故障精确定位要求高,所以应用暂态电气量特征的精确定位多集中于电气量与故障距离的数学关系。行波法是通过寻找行波的传播过程中,故障距离与行波传播时间的数学关系来进行精确定位。在暂

态电气量特征的精确定位里,还有很多类似的方法。

文献[30]利用母线电压暂降和相位跳变与线路区段的距离关系进行区段定位,所需测量装置少,使用的数据容易获得。该方法适用于各种类型故障,可估算出故障电阻,能准确地确定故障区段和故障距离,解决了辐射状配电网中故障定位不准确和伪故障点问题。但是电压暂降受故障位置、系统元件故障率、气候环境以及保护可靠性等因素影响,具有不确定性。文献[31]提出了一种基于特征根的单端测距方法。由暂态零序电压、电流象函数的特征方程,得到了象函数测距方程,同时,利用特征频段的性质,采用搜索法求解超越方程,实现故障精确定位。文献[32]提出一种基于故障后实时分布参数线路零序特征的精确定位的方法,通过分析故障后零序电压、零序电流的沿线分布特征,利用非故障线路采样信息,辨识故障线路零序参数。该方法定位精度高,适用范围广。文献[33]提出基于故障暂态信号及其衰减特征的单相接地故障精确定位方法,利用故障时非故障相电压升高引起的线路电容充电暂态信号及其衰减特征,确定暂态信号有效区段,并利用S变换准确计算故障距离。该方法只需单端测量,不受故障状况,负荷系统不平衡等干扰,但对特征信息提取的准确性要求较高。

文献[34]提出了一种基于小波变换的分析电压暂态波形故障精确定位方法,该方法包括两个主要阶段。首先,使用离散小波变换算法分析行波到达不同测量单元的时间差来确定故障区段,再通过分析电压暂态频率确定故障准确位置。此方法具有良好的准确性,且能适应多种故障状态。文献[35]提出了一种基于阻抗和暂态量的综合配电网故障定位方法,该方法一方面使用扩展的视在阻抗分析法来计算故障距离,同时考虑到线路的不平衡运行、中间负载、时变负荷曲线等影响因素;另一方面,通过分析故障产生的暂态行波的频谱,从而识别其需要的特征频率成分,结合故障距离信息与可能故障位置的特征频率实现定位。文献[36]利用行波所走路径不同导致母线测量点的自然频率和幅值不同的性质确定精确位置,使用人工神经网络(ANN)算法拟合行波传播路径与自然频率及其幅值分布之间存在着映射关系。该方法中分层分布式ANN故障定位模型学习效率高、收敛快、测试效果好,但是此方法主要针对强故障模态下稳定型故障进行故障定位,而对于弱故障模态下的故障分支识别及电弧性故障有待进一步研究。

综上所述,配电网故障定位技术发展见图1。

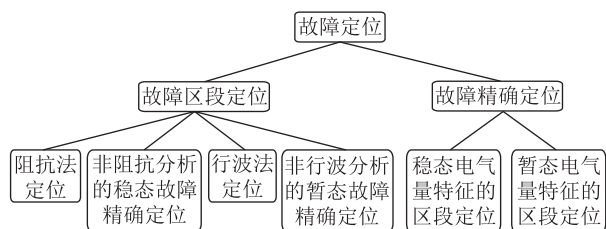


图1 方法类别框架

Fig.1 Method classification framework

3 配电网故障定位工程应用与现状

现阶段,部分配电网区段定位技术已应用于实际工程中:

主动信号注入设备在工程中已经得到了运用,但间歇性电弧会导致注入信号不连续、特征被破坏,因此实际效果并不理想。

基于故障电流、零序电流检测的接地/短路故障指示器已实现产品化,并在配电系统中广泛应用。但从实际效果看,故障指示器在处理接地故障时效果一般,因此部分厂家又提出故障指示器与主动信号注入装置的结合以提高接地故障的可靠性。

FTU 在配网工程中也得到了一定的应用,效果良好,但装置单价偏高,对线路运行环境与自动化程度要求也较高,难以大面积推广。且 FTU 与故障指示器均需要设备布置密度来确保精度。

配电网精确定位应是区段定位信息共享,互为补充的技术方法。现阶段,行波法的应用可行性相对较高,但整体仍处于研究实验阶段。

此外,为实现配电系统在非健全故障信息情况下的容错故障处理,文献[37]提出一种基于贝叶斯分析,利用多相故障信息的相关性进行容错故障定位的方法,针对永久性故障下的架空配电网,将重合闸过程中的故障信息进行融合得出更加准确的故障定位结果。在故障定位与隔离有误的情况下,融合恢复供电过程中的故障信息再次进行故障定位,并对故障处理结果进行修正控制,提出完整的容错故障处理流程。

文献[38—39]利用来自各个位置的单相接地定位信息之间的相互关联性,以及多种定位原理上报的定位信息的冗余性,实现容错故障定位。所提方法无须改变已有配电自动化系统主站,也不用传送波形信息。在增设基于暂态参数识别和相电流突变原理的配电终端后,该方法已在实际工程中应用。实际效果表明,在单相接地定位终端数量较多且单台终端采用多个定位原理的情况下,容错效果较为理想。但在为达到理想的容错效果需要在单

台终端上配置的定位原理数量,以及在单条馈线上至少需配置的单相接地定位终端数量方面仍需后续研究。

4 配电网故障定位技术展望

为了保障社会经济的不断发展和人民生活水平的提高,配电网的故障定位的要求也越来越高。在输电网上,故障定位技术已经成功应用,但配电网具有电压等级多、支路数量多、运行方式多样、运行环境复杂、馈线投切频繁、线路拓扑具有可变性等特点,大多数故障定位方法在适用范围上存在局限性。同时由于现阶段三遥功能在配网现场的应用并不理想、配电网参数测量精度不够,导致部分高度依赖主站、子站、及馈线间的流畅通信或单一故障参数精确测量的定位方法在实际中很难达到理论效果。

结合配电网故障定位的研究现状与存在问题,对其进行了展望。

4.1 集中式与分布式故障定位的充分配合

多篇文献均有提及分布式接地故障定位技术,相关学者从系统结构,动态拓扑识别,通信水平等方面进行了验证,并提出一些适合分布式故障定位的新算法。考虑到智能电网及智能二次侧变电站技术的发展,未来研究应重点关注基于沿线智能测(intelligent electronic devices, IEDs)的分布式故障定位^[40-43]。

集中式定位与分布式定位的互补结合,共同构成配网故障定位架构将成为一种趋势。通过分布式故障定位的分层计算,各变电站对上传计算结果进行状态分析,可以大幅加快数据处理速度,提高配电网故障定位效率;通过合理的测量点配置方案,也可灵活适应配电网的复杂性。这种结构符合智能电网的发展趋势,成为未来研究重点方向之一。

4.2 监测设备性能与配置方案的双重优化

未来通过对测量点的暂态、稳态电压、电流等配网线路多种数据的监测,各类故障定位技术可实现互相配合,配电网故障定位将不再是仅对于某一故障数据的简单分析处理,而是基于多维故障数据融合的分析定位,特别是在非健全故障信息下的容错定位技术具有较高的研究价值。同时,面对种类更多、更加复杂的测量数据,配电网数据处理技术也要逐步完善。很多依靠智能算法的故障定位过于注重数学方法的应用,忽略了故障特征本身,近年来已不再是研究的热点方向,因此在沿线设备(主要有故障指示器、智能电表、FTU、PMU等)的设

备性能(包括数据处理能力、设备现场取电技术、成本造价等)和配置方案上进行双重优化十分必要。

4.3 定位方案与精度的差异化选择

从综述中不难发现,现有的配网故障定位方法均有其各自的技术特点和适用范围,因此在实际工程中,应综合考虑当地的配网结构、负荷分布、现场干扰、地理环境等因素,设计合理的定位方案。

同时,配电网的网格化建设趋势与自动化程度的提高,使得配网并不一味地苛求对故障的精确定位,而依据区域负荷的密集程度与重要程度,合理选择与其相匹配的定位精度在实际工程中更为现实可行。

5 结语

本文分别介绍了国内外关于配电网故障定位技术在理论研究和示范工程应用中的基本现状,对不同类型的技术方法的基本原理、技术特点、适用范围及存在问题进行了阐述,分析提出了配电网故障定位技术在下一阶段研究与应用的侧重范围与发展趋势。

参考文献:

- [1] 常仲学,宋国兵,黄炜,等. 基于相电压电流突变量特征的配电网单相接地故障区段定位方法[J]. 电网技术,2017,41(7):2363-2370.
CHANG Zhongxue, SONG Guobing, HUANG Wei, et al. Phase voltage and current fault components based fault segment location method under single-phase earth fault in distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2363-2370.
- [2] SONG Guobing, MA Zhibin, LI Guang, et al. Phase current fault component based single-phase earth fault segment location in non-solidly earthed distribution networks[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 25: 2713-2730.
- [3] 高孟友,徐丙垠,张新慧. 基于故障电流幅值比较的有源配电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):21-25.
GAO Mengyou, XU Bingyin, ZHANG Xinhui. Fault location based on for active fault current amplitude comparison distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 21-25.
- [4] 牛耕,周龙,裴玮,等. 基于克拉克电流相角差值的低压有源配电网故障定位方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(S1):15-24.
NIU Geng, ZHOU Long, PEI Wei, et al. Fault location method for low voltage active distribution network based phase-angle differences of the clark currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 15-24.
- [5] 鲍海,杨以涵,张利,等. 基于零序电流突变量的配电网单相故障带电定位判据[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):118-122.
BAO Hai, YANG Yihan, ZHANG Li, et al. Criterion based on the fault component of zero sequence current for online fault location of single-phase fault in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 118-122.
- [6] 贾清泉,王宁,刘楚,等. 基于故障方向测度的配电网故障区段定位方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20):5933-5941.
JIA Qingquan, WANG Ning, LIU Chu, et al. A method of fault section location in distribution networks based on fault direction measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5933-5941.
- [7] 张姝,何正友,李小鹏,等. 基于线路暂态重心频率的配电网故障区段定位[J]. 中国电机工程学报,2015,35(10):2463-2470.
ZHANG Shu, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. Fault section location of the distribution network based on transient center frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2463-2470.
- [8] 薛永端,李天友,徐丙垠,等. 小电流接地故障暂态分析及区段定位新方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(23):101-107.
XUE Yongrui, LI Tianyou, XU Bingyin, et al. A novel method of transient analysis and faulty section location for single-phase earth fault in non-effectively earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 101-107.
- [9] 康忠健,田爱娜,冯艳艳,等. 基于零序阻抗模型故障特征的含DG配电网故障区间定位方法[J]. 电工技术学报,2016,31(10):214-221.
KANG Zhongjian, TIAN Aina, FENG Yanyan, et al. Fault section locating method based on zero sequence impedance model fault feature in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 214-221.
- [10] 李欣唐,负志皓. 一种适于高阻接地短路的故障测距新算法[J]. 电力自动化设备,2000,20(4):15-18.
LI Xintang, FU Zhihao. A new algorithm of fault allocation for high impedance grounding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(4): 15-18.
- [11] KRISHNATHEVAR R, NGU E E. Generalized impedance-based fault location for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 27(1): 449-451.
- [12] 王增平,郑涛,潘玉美,等. 基于节点阻抗矩阵的配电网故障测距算法[J]. 电网技术,2013,37(11):3233-3240.
WANG Zengping, ZHENG Tao, PAN Yumei, et al. A nodal impedance matrix based fault location algorithm for distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3233-3240.
- [13] ALWASH S F, RAMACHANDARAMURTHY V K. New impedance-based fault location method for unbalanced power distribution systems[J]. International Transactions on Electrical

- Energy Systems, 2015, 25(6):1008-1021.
- [14] 郭壮志, 陈波, 刘灿萍, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2007, 37(11): 88-92.
GUO Zhuangzhi, CHEN Bo, LIU Canping, et al. Fault location of distribution network based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 37(11): 88-92.
- [15] ABAD M, GARCIA-GRACIA M, HALABI N E, et al. Network impulse response based-on fault location method for fault location in power distribution systems [J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(15):3962-3970.
- [16] JAMALI S, BAHMANYAR A. A new fault location method for distribution networks using sparse measurements[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2016, 81(1):459-468.
- [17] WU T, CHUNG C Y, KAMWA I, et al. Synchrophasor measurement-based fault location technique for multi-terminal multi-section non-homogeneous transmission lines[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(8): 1815-1824.
- [18] TRINDADE F C L, FREITAS W, VIEIRA J C M. Fault location in distribution systems based on smart feeder meters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 251-260.
- [19] MAJIDI M, ETEZADI-AMOLI M, FADALI M S. A novel method for single and simultaneous fault location in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6):3368-3376.
- [20] GRAJALES-ESPINAL C, MORA-FLOREZ J, PEREZ-LONDONO S. Advanced fault location strategy for modern power distribution systems based on phase and sequence components and the minimum fault reactance concept[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 140:933-941.
- [21] BAHMANYAR A, JAMALI S. Fault location in active distribution networks using non-synchronized measurements[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2017, 9(1)451-458.
- [22] OROZCO-HENAO C, BRETAS A S, CHOUHY-LEBORGNE R, et al. Active distribution network fault location methodology: a minimum fault reactance and Fibonacci search approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 84:232-241.
- [23] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 零模检测波速度的迭代提取及其在配电网单相接地故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4):202-211.
TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Iterative extraction of detected zero-mode wave velocity and its application in single phase-to-ground fault location in distribution networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4):202-211.
- [24] 杨奇逊, 齐郑, 杨以涵, 等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9):37-43.
YANG Qixun, QI Zheng, YANG Yihan, et al. Study on fault location scheme for distribution network based on travelling wave theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9):37-43.
- [25] 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 Xuchen, et al. Fault location algorithm for distribution power network based on relationship in time difference of arrival of traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14):4109-4115.
- [26] 王阳, 曾祥君, 黎锐烽, 等. 基于图论的配电网故障行波定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18):143-147.
WANG Yang, ZENG Xiangjun, LI Ruifeng, et al. A traveling wave fault location algorithm for distribution network based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18):143-147.
- [27] 周聪聪, 舒勤, 韩晓言. 基于线模行波突变的配电网单相接地故障测距方法[J]. 电网技术, 2014, 38(7):1973-1978.
ZHOU Congcong, SHU Qin, HAN Xiaoyan. A single-phase earth fault location scheme for distribution network based on mutation of line mode traveling wave[J]. Power System Technology, 2014, 38(7):1973-1978.
- [28] 梁睿, 靳征, 王崇林, 等. 行波时频复合分析的配电网故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28):130-136.
LIANG Rui, JIN Zheng, WANG Chonglin, et al. Research of fault location in distribution networks based on integration of travelling wave time and frequency analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28):130-136.
- [29] 刘洋, 曹云东, 侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威尔分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16):4086-4093.
LIU Yang, CAO Yundong, HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16):4086-4093.
- [30] 郑天文, 杨洪耕, 肖先勇, 等. 考虑母线电压暂降非线性分布特征的配电网故障定位[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11):115-120.
ZHENG Tianwen, YANG Honggeng, XIAO Xianyong, et al. Fault location considering nonlinear profile of bus voltage sag for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11):115-120.
- [31] 唐昆明, 唐辰旭, 罗建. 一种基于特征根的配电网单端故障测距的新方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3):762-767.
TANG Kunming, TANG Chenxun, LUO Jian. A new method based on eigenvalue for single-ended fault location in distribution network [J]. Power System Technology, 2014, 38(3):762-767.
- [32] 梁睿, 杨学君, 薛雪, 等. 零序分布参数的单相接地故障精确定位研究[J]. 电工技术学报, 2016, 30(12):472-479.
LIANG Rui, YANG Xuejun, XUE Xue, et al. Research on the precise positioning of single phase grounding fault with zero se-

- quence parameter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 30(12):472-479.
- [33] 张文海,肖先勇,汪颖. 基于故障暂态信号及其衰减特征的配网单相接地故障测距[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3):46-52.
ZHANG Wenhai, XIAO Xianyong, WANG Ying. Single phase grounding fault location in distribution network based on fault transient signal and its attenuation characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):46-52.
- [34] GOUDARZI M, VAHIDI B, NAGHIZADEH R A, et al. Improved fault location algorithm for radial distribution systems with discrete and continuous wavelet analysis [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 67(1):423-430.
- [35] GAZZANAA D S, FERRIRAA G D, BRETAS A S, et al. An integrated technique for fault location and section identification in distribution systems [J]. Electric Power Systems Research, 2014, 115(1):65-73.
- [36] 束洪春,段锐敏,朱梦梦,等. 基于自然频率的辐射状配电网分层分布式 ANN 故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5):83-89.
SHU Hongchun, DUAN Ruimin, ZHU Mengmeng, et al. Layered distributed ANN fault location method for radial distribution network based on natural frequency [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5):83-89.
- [37] 刘健,董新洲,陈星莺,等. 配电网容错故障处理关键技术研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1):253-257.
LIU Jian, DONG Xinzhou, CHEN Xingying, et al. Robust fault isolation and restoration for distribution systems [J]. Power System Technology, 2012, 36(1):253-257.
- [38] 李志,余绍峰,劳增江,等. 基于本质安全的配电网设备质检中心建设[J]. 浙江电力, 2018, 37(2):22-26.
LI Zhi, YU Shaofeng, LAO Zhenjiang, et al. Construction of distribution network equipment quality inspection center based on intrinsic safety [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(2):22-26.
- [39] 刘健,张志华,张小庆,等. 基于配电自动化系统的单相接地定位[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1):145-149.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Single phase to ground fault location based on distribution automation systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1):145-149.
- [40] 王博,谷昌瑞,吉晓筱,等. 基于多点故障行波检测的改进分布式故障测距方法研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5):120-127.
WANG Bo, GU Changrui, JI Xiaoxiao, et al. Research on improved distributed fault location method based on multi-point fault's traveling wave detection [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5):120-127.
- [41] FARUGHIAN A, KUMPULAINEN L, KAUHANIEMI K. Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks [J]. Electric Power Systems Research, 2018, 15(4):373-380.
- [42] 宋伊宁,李天友,徐丙垠,等. 基于配电自动化系统的分布式小电流接地故障定位法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4):102-109.
SONG Yining, LI Tianyou, XU Bingyin, et al. Distributed small-current grounding fault locating method based on power distribution network automation system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4):102-109.
- [43] 陈兵,赵肖旭,施伟成,等. 配电网网格化自动成图的实现[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6):100-105.
CHEN Bing, ZHAO Xiaoxu, SHI Weicheng, et al. Realization of automatic grid generation in distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6):100-105.

作者简介:



梁睿

梁睿(1981—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统自动化、供配电安全与保护(E-mail:liangrui@cumt.edu.cn);

孟祥震(1994—),男,硕士研究生,研究方向为配电网故障定位及处理(E-mail:974776496@qq.com);

周鲁天(1993—),男,硕士研究生,研究方向为小电流接地选线及保护。

Status Quo and Prospect of Distribution Network Fault Location

LIANG Rui, MENG Xiangzhen, ZHOU Lutian, PENG Nan

(Jiangsu Provincial Laboratory of Electrical and Automation Engineering for Coal Mining

(School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology), Xuzhou 221116, China)

Abstract: Fast and accurate fault location is the basis of fast self-healing of power grid and the basic key technology to realize intelligent power distribution network. In recent years, many scholars at home and abroad have conducted in-depth research on fault location and achieved fruitful results. The existing research on fault location of distribution network is reviewed. The fault zone positioning method using transient electrical characteristics and unsteady electrical characteristics, the fault location method based on traveling wave method, impedance method and other related parameter identification. The superiority and existing problems of all kinds of methods are reviewed. Combined with the research status at home and abroad, the development trend and the research on the future of distribution network fault location is prospected.

Key words: distribution network; fault location; section positioning; precise positioning

(编辑 钱悦)