

配电网故障自动定位技术研究综述

唐金锐^{1,2}, 尹项根^{1,2}, 张 哲^{1,2}, 杨 晨¹, 叶 磊¹, 戚宣威¹, 林 璠¹

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

2. 华中科技大学 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 根据已有的研究成果,对配电网故障自动定位技术研究涉及的主要内容,即故障选线、区段定位、故障测距进行了综述。故障选线是为了识别判断母线多条出线中的故障线路,其主要包括:基于外加注入信号的故障选线,基于故障稳态量、暂态量和综合式故障选线等。区段定位旨在迅速隔离故障并恢复非故障区域供电,主要研究包括:基于现场设备采集的故障实时信息、基于故障投诉电话等定位方法以及故障特征微弱时的故障识别判断。故障测距的目的是直接定位出故障位置,其主要包括:注入法故障测距、基于稳态量故障测距和基于暂态量故障测距。结合配电网故障自动定位技术及最新研究成果,对其发展方向进行了展望。

关键词: 配电网; 故障定位; 故障选线; 区段定位; 故障测距

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.002

0 引言

2011 年,科技部在国家高技术研究发展计划(863 计划)先进能源技术领域部署的智能电网重大项目研究全面展开。智能电网成为电网技术发展的必然趋势和社会经济发展的必然选择。作为智能电网的重要组成部分,智能配电网是推动智能电网发展的源头和动力,也是智能电网建设的关键技术领域。配电网故障自动定位技术的研究是保证智能配电网安全可靠运行的一项基础性工作,具有重要的现实意义。

一般配电系统电压等级为 6~66 kV,网络结构复杂,线路分支多,中性点接地方式多样,相对于传统的输电网故障定位技术,配电网故障自动定位技术的概念更为宽泛,实现上也更为复杂。

长期以来,国内外学者对配电网故障自动定位技术进行了大量的理论和实验研究,这些研究工作主要包括 3 个方面:故障选线,识别判断母线多条出线中的故障线路,以便采取措施防止故障扩大,重点在于小电流接地配电网发生单相接地故障时的选线;区段定位,确定故障点所在故障区段,以便隔离故障并恢复非故障区域的供电;故障测距,即直接定位出故障位置,避免人工巡查故障点。3 个方面的研究本质上均为定位故障,但各自对故障定位的要求不同,目的也有所差异,实现难度上逐渐增加。目前,故障选线已有大量的工业产品应用于现场,但在可靠性与灵敏性方面仍需加强;区段定位有部分产品进入应用阶段,尚不成熟,且小电流接地配电网单相接地故障时的区段定位仍面临诸多问题;配电网故

障测距属于前瞻性研究,目前在配电网中产品应用较少,需要在算法原理和信号采集上开展更加深入和系统的研究。

采用中性点有效接地方式的配电网,故障特征明显,其故障自动定位技术主要解决网络结构复杂、线路分支多带来的问题;而采用中性点非有效接地方式的配电网(国内主要指中性点不接地和经消弧线圈接地,为小电流接地方式)中,还需解决故障电流微弱的单相接地故障自动定位问题。

本文将结合最新的研究成果,对配电网故障自动定位技术研究进行分析,从故障选线、区段定位、故障测距 3 个层面对已取得的研究成果进行论述,分析各方面的研究难点并提出建议。在此基础上,进一步展望配电网故障自动定位技术的未来发展方向。

1 故障选线

故障选线的研究重点是小电流接地配电网发生单相接地故障时故障线路的识别判断,此时故障电流微弱,经消弧线圈接地方式下更是如此。为了确定故障线路,传统的方法是通过检测母线上零序电压的数值来判断是否发生单相接地故障,若发生接地故障,则采用人工逐条线路拉闸的方式选线,此种方法会使正常线路瞬间停电,易产生操作过电压和谐振过电压,且增加了事故的危险性和设备的负担^[1],严重限制了小电流接地方式,特别是经消弧线圈接地方式的应用与发展^[2]。因此,长期以来,国内外学者对于故障自动选线装置开展了大量的研究工作,提出了多种不同原理的故障选线方法。这些方法按照其利用信息的不同大致分为 2 类:一是基于外加注入信号的故障选线方法;二是利用单相接地故障时的电气量变化特征进行故障选线,其又可分为基于

收稿日期:2012-01-12;修回日期:2013-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877031,50837002,51177058)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50877031,50837002,51177058)

故障稳态分量的故障选线法、基于故障暂态分量的故障选线法和综合选线方法。

1.1 基于外加注入信号的故障选线

基于外加注入信号的故障选线主要有 S 信号注入法和脉冲注入法等。

S 信号注入法的原理是通过母线电压互感器向接地线的接地相注入 S 信号电流,其频率处于 n 次谐波与 $n+1$ 次谐波的频率之间,一般选择 220 Hz,然后利用专用的信号电流探测器查找故障线路^[3]。脉冲注入法的原理与 S 信号注入法相似,但其注入信号是周期间歇性的,频率更低且可控^[4]。总体而言,基于外加注入信号的故障选线方法需配置专用的注入信号源和辅助检测装置,投资成本高,且注入信号的强度受电压互感器容量限制,同时选线可靠性受导线分布电容、接地电阻等因素的影响较大,如果接地点存在间歇性电弧,注入的信号在线路中将不连续且信号特征将被破坏,给检测带来困难。

1.2 基于故障电气量变化特征的故障选线

1.2.1 基于故障稳态分量的故障选线

基于故障稳态分量的故障选线方法有^[1]:零序电流幅值法、零序电流比相法、零序电流群体比幅比相法、零序无功功率方向法、最大 $I \sin \varphi$ 或 $\Delta(I \sin \varphi)$ 法。

上述方法只适用于中性点不接地系统,对于中性点经消弧线圈接地系统则存在适用性问题。为克服此缺点,提出了零序电流有功分量或有功率法、DESIR 法、5 次谐波法、各次谐波综合法、零序导纳法、残流增量法、负序电流法等。

总体而言,基于故障稳态分量的故障选线方法存在的主要问题是,当故障点电弧不稳定,特别在间歇性接地故障时,由于没有稳定的稳态信息,选线可靠性不高。此外,当采用消弧线圈接地方式时,经补偿后的稳态故障电流值很小,难以满足实际应用要求。

1.2.2 基于故障暂态分量的故障选线

基于故障暂态分量的故障选线方法可以克服稳态分量选线法的灵敏度低、受消弧线圈影响大、间歇性接地故障时可靠性差等缺点,该方法的实施关键是暂态特征分量的提取和选线判据的建立。目前基于故障暂态分量的故障选线方法主要有 2 种。

a. 首半波法。利用接地故障暂态电流与暂态电压首半波相位相反的特点进行故障选线^[5],为提高可靠性,通常分析暂态量在一定频段即所选频带内的相频特性,此时极性相反的特性将保持一段更长的时间。

b. 小波法。利用合适的小波和小波基对暂态零序电流进行小波变换,根据故障线路上暂态电流某分量的幅值包络线高于健全线路的幅值包络线,且二

者极性相反的关系等特征选择故障线路^[6-7]。

由于暂态信号受过渡电阻、故障时刻等多种因素影响,暂态信号呈随机性、局部性和非平稳性特点,有可能出现暂态过程不明显的情况^[8],此时暂态分量方法选线的可靠性与灵敏性将会受到一定的影响。

1.2.3 综合选线

综合选线方法同时利用故障稳态和暂态信息进行故障选线,主要有如下方法。

a. 能量法。定义线路零序电压与零序电流乘积的积分为能量函数,则故障前所有线路的能量为零,故障后故障线路的能量恒小于零,健全线路的能量恒大于零,且故障线路能量幅值等于所有健全线路能量幅值和消弧线圈能量幅值之和,据此可选出故障线路。由于故障电流中有功分量所占比例较小,且积分函数易累积一些固定误差,限制了其检测灵敏度的提高^[9-11]。

b. 基于信息融合技术的选线方法。小电流接地系统单相接地故障情况复杂,单一的选线判据往往不能覆盖所有的接地工况。此种方法多运用智能控制理论来构造每种选线方法的适用域,以实现多种选线方法的综合和判据最优化^[12-14]。

1.3 研究的难点和建议

尽管已有大量故障选线方法被提出并应用到现场,但实际效果并不理想,究其原因,难点在于下面 3 个方面^[1]。

a. 故障特征不明显。小电流接地系统单相接地时故障稳态电流微弱,故障暂态信号虽然幅值比稳态信号大,但持续时间短。

b. 不稳定故障电弧的影响。现场的单相接地故障中,对于弧光接地,特别是间歇性电弧接地,没有一个稳定的接地电流(包括注入的电流)信号。

c. 随机因素的影响。我国配电网运行方式多样,变电站出线长度和数量频繁改变。

针对以上难点并综合已有研究成果^[15-16],故障选线技术应主要从以下方面展开深入研究。

a. 理论与实际的结合。深入研究小电流接地系统单相接地故障产生的原因、发展过程及各种环境因素的影响,特别是绝缘丧失、树木倒塌等引起的弧光间歇接地下的稳态和暂态过程,为提高故障选线方法的灵敏性及可靠性提供理论基础与实践经验。

b. 多判据的信息融合选线。深入研究每种选线方法的有效域,利用信息融合技术实现多种方法的综合与判据最优化,发挥各选线方法的互补性,提高选线准确性。

c. 现代信号处理技术的引入。现代信号处理技术如小波分析、Prony 算法、希尔伯特-黄变换、S 变换、

数学形态学、卡尔曼滤波、分形理论等的提出与应用,将提高对微弱故障信号的辨识及特征提取能力。

d. 微弱故障信号的采集。故障信号的精确可靠采集是选线技术的基础,特别是经消弧线圈接地系统单相接地时故障信息的采集。

2 区段定位

区段定位是为了及时准确地定位故障区段,以便隔离故障区域并尽快恢复非故障区域供电,对于提高供电可靠性具有重要意义。虽然采用重合器和分段器相互配合的方式能够达到目的,但这种方法开关设备配合困难,对开关性能要求高,适用于结构相对简单、运行方式相对固定的配电网,且多次重合对设备及系统冲击大^[17]。因此,新的区段定位方法被提出并应用于现场,这些方法中,故障特征明显的情况下,研究主要集中在判断准确、快速且具有高容错性的定位算法上,故障特征微弱的情况(小电流接地方式单相接地故障)下,还需研究解决故障识别判断的方法。

2.1 区段定位算法

区段定位算法的目的是使定位判断更准确、快速且具有更高的容错性,国内外学者提出了多种不同原理的区段定位方法,按照其利用信息的不同大致分为2类:基于沿线装设的现场设备馈线终端单元 FTU (Feeder Terminal Unit) 或者故障指示器 FI (Fault Indicator) 采集的故障实时信息,实现故障区段定位功能;利用电力用户打来的故障投诉电话 TC (Trouble Call),同时根据相关信息,如用户电话号码、用户代码与终端配电变压器连接的资料、地理信息和设备信息等,最终实现故障区段定位^[18]。

2.1.1 基于现场设备的区段定位

基于现场设备采集的故障信息的区段定位方法主要有以下2种。

a. 矩阵法。文献[19]中提出统一矩阵算法,其基本过程是首先根据配电网的拓扑结构构造一个网络描述矩阵,根据过流信息生成一个故障信息矩阵,由此得出故障判断矩阵,从而准确地判断故障区间。文献[20-21]提出了一系列改进的矩阵区段定位方法来提高矩阵法的计算效率、适用范围以及信息容错能力,通过引入故障过流方向、网络正方向及新的判据等方法解决多电源故障定位问题、多重故障定位问题以及信息不完备或信息畸变时的故障定位问题。文献[22]提出的链表法思想与矩阵法类似,但其通过链表的形式直接建立网络拓扑从而通过基于树枝节点有序集合的2次定位来完成故障区域的搜索,提升了运算效率和畸变数据的纠错能力。

b. 人工智能法^[23-25]。此类方法在网络结构改变、

上传的实时信息出现信息畸变或不完备等情况下依然能够准确地定位故障区段,主要有神经网络、遗传算法、粗糙集理论、数据挖掘、Petri 网、仿电磁学等算法。

基于现场设备采集故障信息的区段定位方法判断快速、准确,具有一定的信息容错能力,但由于矩阵法采用的故障定位信息仅为区段两端设备的过流信息,信息容错能力较弱,而以人工智能为基础的定位方法存在模型构建相对复杂、定位效率不高以及模型不够完善等缺点。

2.1.2 基于故障投诉电话的区段定位

基于现场设备采集的故障信息的区段定位方法投资较大,需要高质量的通信通道与大量的现场设备,目前一般只在负荷密集地区采用此种方法。对于不满足条件的地区,可通过故障投诉电话定位故障区段,主要有如下5种方法。

a. 人工神经网络^[26]。利用人工神经网络的模式识别能力对故障投诉电话进行分析来定位故障区段。

b. 专家系统^[27]。其通过专家知识库及推理来模拟人类专家进行区段定位。

c. 模糊集^[28]。使用模糊集理论,按照隶属度函数确定各个设备隶属于故障的隶属度,找到隶属度大于某个阈值的可开断设备,从而定位故障区段。

d. 粗糙集理论^[29]。利用粗糙集方法对故障定位决策表进行化简并导出区段定位的最小约简形式,从而快速准确地进行定位。

e. 贝叶斯算法^[30]。利用贝叶斯不精确推理方法排除故障投诉中错误信息的不利影响,从而实现区段的高效定位。

2.2 故障识别判断

故障特征微弱情况(小电流接地方式单相接地故障)下,为使现场设备能够采集并上传故障信息,区段定位还需解决好现场设备对故障的识别判断问题。此时可借鉴故障选线的诸多方法,但为便于现场实现,故障识别判断算法应尽量基于本地信息。目前提出的方法有基于注入法,稳态量方法中的残流增量法、零序电流相位法、故障电阻测量法、负序电流法、谐波法,暂态量方法中的小波法等。基于注入法在发生接地故障时,向故障线路发出具有明显特征的电流信号,现场设备对检测到的电流信号解码,判断是否为信号源注入的特征电流信号以确定故障区段。残流增量法在故障发生后调节消弧线圈的补偿电流,利用调节前后现场设备或移动式设备测量到的零序电流变化量信息确定故障区段。零序电流相位法一般利用零序电流与电压在故障路径与非故障路径的不同,通过磁场检测及现代通信等技

术定位故障区段。故障电阻测量法通过测量接地故障电阻来保护高阻接地,可用于现场设备的故障识别判断以进行区段定位。以上方法面临的问题在故障选线中已多有讨论,不再赘述。

2.3 研究的难点和建议

目前区段定位已有部分产品应用于现场,但尚不成熟,其难点在于:故障特征微弱、不稳定故障电弧以及随机因素的干扰给现场设备对故障的识别判断带来诸多问题;配电网接线方式复杂、结构改变频繁等给区段定位算法带来了适用性等问题;现场设备上传的故障信息出现信息畸变时造成的定位问题。

针对以上难点并综合已有研究成果^[18],本文认为区段定位技术应主要从以下方面展开深入研究。

a. 借鉴故障选线技术,研究小电流接地方式单相接地故障时,现场设备对故障的识别判断方法,应尽量基于本地信息,必要时可使用本线路相邻现场设备的信息,但应尽量避免使用其他线路上的现场设备信息。

b. 融合矩阵法和各智能算法,提高区段定位的综合性能。矩阵法和各智能算法有各自的优缺点,将它们有选择地组合运用,有望在故障区段判断准确迅速的前提下具备较高的容错能力。

c. 结合基于现场设备采集的故障信息和基于故障投诉电话的区段定位方法,提高定位的容错能力、适用范围等。基于现场设备采集的故障信息区段定位方法对通信通道及现场设备要求高,在硬件设施不充分的情况下,可结合基于故障投诉电话的区段定位方法定位故障区段。

d. 研究适应分布式电源接入下的配电网区段定位方法。随着智能电网的发展,配电网中分布式电源的比重将逐步增加,故障情况下的电流分布将发生变化,对故障区段定位方法提出了新的要求。

3 故障测距

配电网故障测距是为了迅速准确地定位故障位置,避免人工巡查故障点,对及时修复线路和保证可靠供电、保证系统的安全稳定和经济运行都有重要作用。现有的故障测距方法中,对于故障特征明显的情况,研究主要集中于解决多分支下基于有限测量点的精确定位问题;对于故障特征微弱的情况,测距中基于故障稳态量方法将基本失效,研究主要集中于暂态量方法和注入法测距等。

3.1 注入法故障测距

注入法是在系统故障后通过电压互感器等向系统注入某种特殊信号,利用检测到的信号定位故障位置,主要有 S 注入法、单端注入行波法、端口故障诊断法和加信传递函数法等。S 注入法是利用故障时

暂时闲置的电压互感器注入特殊信号,通过寻踪注入的信号定位故障的准确位置^[3]。单端注入行波法是在线路始端注入检测信号,通过注入信号时刻与故障点返回信号时刻的时差来确定故障位置,同时从录波波形中分析提取线路特殊点的特殊波形,分析出正常情况和故障情况下的网络拓扑结构,从而判定故障分支^[31]。

目前只有 S 注入法测距有部分产品应用,总体而言,注入法测距需配置专用注入信号源和辅助检测装置,投资成本高,且注入信号的强度受电压互感器容量限制,测距精度受导线分布电容、接地电阻等因素的影响较大,如果接地点存在间歇性电弧,注入的信号在线路中将不连续且信号特征将被破坏,给测距带来困难。

3.2 基于故障稳态量的测距法

基于故障稳态量的测距法目前主要针对故障特征明显情况下的测距^[32-35]。其基本原理是先假设故障前后负荷电流没有变化,由此得出故障电流,然后结合待分析配电网独有的特性,如多分支、不对称线路、不平衡运行及时变的负荷,迭代计算出故障实际位置。这种方法受路径阻抗、终端负荷和电源参数等因素影响较大,且不适用于小电流接地配电网单相接地故障时的测距,因此国内研究较少。

3.3 基于故障暂态量的测距法

配电网基于故障暂态量的测距法主要指以测量故障产生的行波为基础的行波测距法。基于行波的故障测距受电流互感器饱和、故障电阻、故障类型及系统运行方式影响小,定位精度高,在输电网获得了成功的应用。近年来,大量的研究工作集中于行波在配电网中应用的可能性。文献[36]分析了单相接地故障时的行波传输特性;文献[37]论证了利用配电变压器传变行波的可行性并给出了利用故障初始电流、电压行波线模分量实现配电线路两端故障测距的方法;文献[38]在对配电线路结构进行具体分析的基础上,利用单端行波法对带有分支的线路进行故障定位,其对故障产生的暂态行波进行检测,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,在确定了故障区段的基础上,找到与故障点相关的 2 个反射波,并由这 2 个反射波的最大相关时间计算得到故障点到检测端的距离;文献[39]提出了利用零模行波分量和线模行波分量速度差的配电网故障测距新算法,其只需判断行波的初始波头的到达时刻,故不受分支的影响,同时该文献利用零模波头的李氏指数来估算零模波速度;文献[40-42]提出了特征频率这一概念,利用小波变换提取暂态行波的频率,结合配电网拓扑结构以确定故障位置;文献[43-44]引入了神经网络等工具,利用暂态行波的

波头、频率、能量等特征作为输入量进行故障测距。

总体而言,基于故障暂态量的测距法适用范围广、测距精度高,对实现配电网故障测距具有重要意义,但需在信号获取、有限测量点定位故障位置和复杂结构下定位算法适用性等实用化方向展开深入研究。

3.4 研究的难点和建议

配电网的故障测距属于前瞻性研究,目前仍处于理论研究阶段。多分支的配电网故障测距对测量误差及伪根的识别要求更高,故障信号微弱下的故障测距更是难点,同时从实用方面考虑,配电网故障测距需提供易大面积推广的低成本故障测距技术。针对以上难点并综合已有研究成果^[45],提出了3点建议:基于故障暂态量的行波测距法定位精确,且能适应小电流接地单相接地故障情况,满足智能电网的发展需求;行波测距法应研究有限测量点下的配电网精确定位技术,需重点研究利用暂态数据的突变点(波头)、频率值、零模线模时间差等特征量进行故障测距;需研究配电网暂态数据的获取方式,考虑各种抗干扰措施以适应现场故障随机与多变的特性(如间歇性接地等)的实用化测距方案。

4 研究展望

对于目前的配电网故障定位技术而言:故障选线技术相对较成熟,但仍需在实际应用中提高其可靠性及灵敏性;适用于故障特征明显时的区段定位算法研究较多,但仍需在容错性、适用性等方面进一步研究,故障特征微弱时的区段定位是难点;故障测距属于前瞻性研究,需在算法及信号获取上开展更加广泛而深入的研究;状态监测技术可用于配电网的故障自动定位,如文献^[46]提出的高压电缆用分布式光纤传感检测系统即可用于电缆故障定位;由于配电网自身特点,配电网故障自动定位技术中的故障选线与继电保护功能相似,一般也可称为接地保护,区段定位与配电系统自动化技术结合紧密,是馈线自动化实施的基础;现有配电网故障自动定位技术往往脱离实际配电网结构来讨论,需研究放射式与树型、拉手式与环式等各自结构特性对区段定位和故障测距带来的影响;随着分布式电源的接入,需研究其对配电网故障自动定位技术的影响;在配电网系统中,还需特别针对架空线路与电力电缆混合线路^[47]、铁路供电线路^[48]的故障定位技术展开研究。

参考文献:

[1] 庞清乐. 小电流接地故障选线与定位技术[M]. 北京:电子工业出版社,2010:1-10.

- [2] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2009:204-216.
- [3] 桑在中,潘贞存,丁磊,等. “S注入法”选线定位原理及应用[J]. 中国电力,1997,30(6):44-45.
SANG Zaizhong,PAN Zhencun,DING Lei,et al. The principle and application of “S injection method” for faulty line selection[J]. Electric Power,1997,30(6):44-45.
- [4] 王凤,康怡. 基于脉冲信号注入法的小电流接地选线技术[J]. 电网技术,2008,32(15):90-93.
WANG Feng,KANG Yi. Pulse signal injection based faulty line detection for small current neutral grounding system[J]. Power System Technology,2008,32(15):90-93.
- [5] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠,等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(9):48-53.
XUE Yongduan,FENG Zuren,XU Bingyin,et al. Earth fault protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(9):48-53.
- [6] 张帆,潘贞存,张惠芬,等. 基于方向行波的小电流接地系统故障选线[J]. 中国电机工程学报,2007,27(34):70-75.
ZHANG Fan,PAN Zhencun,ZHANG Huifen,et al. Fault line selection in non-solidly earthed network based on direction traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(34):70-75.
- [7] 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.
- [8] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等. 应用小波检测故障突变特性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.
- [9] 朱丹,贾雅君,蔡旭. 暂态能量法原理选线[J]. 电力自动化设备,2004,24(3):75-78.
ZHU Dan,JIA Yajun,CAI Xu. Transient energy to detect single-phase earthing fault[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(3):75-78.
- [10] 束洪春,彭仕欣. 基于短窗数据S变换能量的缆-线混合配电网故障选线方法[J]. 电工技术学报,2009,24(10):152-159.
SHU Hongchun,PENG Shixin. A fault line detection algorithm for distribution network of overhead line and underground cable mixed lines using S-transform energy from short window data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(10):152-159.
- [11] 张艳霞,王清亮. 应用故障暂态特性实现配电网故障选线的新方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(16):76-80.
ZHANG Yanxia,WANG Qingliang. New method for single-phase-to-ground fault feeder selection based on analysis of fault transient characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(16):76-80.
- [12] 李景禄,曾祥君,杨廷方,等. 配电网接地选线方式的研究与探讨[J]. 高电压技术,2004,30(2):22-23.
LI Jinglu,ZENG Xiangjun,YANG Tingfang,et al. Analysis and

- study on grounding method of medium voltage network[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(2): 22-23.
- [13] 齐郑, 艾欣, 王炳革, 等. 基于粗糙集理论的小电流接地系统故障选线方法的有效域[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 43-46.
- QI Zheng, AI Xin, WANG Bingge, et al. Effective domain of faulty line detection in small current grounding system based on rough set theory[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 43-46.
- [14] 张慧芬, 潘贞存, 张帆. 一种配电网单相接地故障综合选线方法[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 788-793.
- ZHANG Huifen, PAN Zhencun, ZHANG Fan. Earth fault line selection in distribution system by the rough set theory[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 788-793.
- [15] 程路, 陈乔夫. 小电流接地系统单相接地选线技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 219-224.
- CHENG Lu, CHEN Qiaofu. A survey on faulty line selection technology for single-phase grounded transmission line in small current neutral grounded system[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 219-224.
- [16] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.
- GUO Qingtao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 146-152.
- [17] 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: 39-45.
- [18] 卫志农, 孙国强, 于峰. 配电网故障区段定位[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2010, 24(1): 71-76.
- WEI Zhinong, SUN Guoqiang, YU Feng. Summary of fault section location in distribution network[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 24(1): 71-76.
- [19] 刘健, 倪建立, 杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 31-33.
- LIU Jian, NI Jianli, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33.
- [20] 王飞, 孙莹. 配电网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 45-46, 49.
- WANG Fei, SUN Ying. An important matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 45-46, 49.
- [21] 梅念, 石东源, 杨增力, 等. 一种实用的复杂配电网故障定位的矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 66-70.
- MEI Nian, SHI Dongyuan, YANG Zengli, et al. A practical matrix-based fault location algorithm for complex distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 66-70.
- [22] 翁蓝天, 刘开培, 刘晓莉, 等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 190-196.
- WENG Lantian, LIU Kaipei, LIU Xiaoli, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 190-196.
- [23] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 基于粗糙集理论的配电网故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 73-77.
- SHU Hongchun, SUN Xiangfei, SI Dajun. A study of fault diagnosis in distribution line based on rough set theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 73-77.
- [24] 孙雅明, 吕航. Petri 网和冗余纠错技术结合的配网故障区段定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 61-67.
- SUN Yaming, LÜ Hang. A new approach of the fault section locating for distribution systems based on Petri nets combination with redundant correcting technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 61-67.
- [25] 郭壮志, 吴杰康. 配电网故障区间定位的仿电磁学算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 34-40.
- GUO Zhuangzhi, WU Jiekang. Electromagnetism-like mechanism based fault section diagnosis for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 34-40.
- [26] LU C N, TSAY M T, HWANG Y J, et al. An artificial neural network based trouble call analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1663-1668.
- [27] YUAN Y H, LU F C, CHIEN Y, et al. An expert system for locating distribution system faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 366-372.
- [28] 束洪春, 王晶, 葛耀中. 基于故障投诉电话信息的配电网故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(11): 39-41.
- SHU Hongchun, WANG Jing, GE Yaozhong. Study of fault location based on trouble calls for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(11): 39-41.
- [29] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 基于故障投诉电话信息的配电网故障定位粗糙集方法[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 64-66.
- SHU Hongchun, SUN Xiangfei, SI Dajun. A rough set approach to distribution network fault location based on fault complain call information[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 64-66.
- [30] 蔡建新, 刘健. 基于故障投诉的配电网故障定位不精确推理系统[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 57-61.
- CAI Jianxin, LIU Jian. An uncertainty reasoning system based on trouble call information for locating faults on distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 57-61.
- [31] 于盛楠, 鲍海, 杨以涵. 配电线路故障定位的实用方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 86-90.
- YU Shengnan, BAO Hai, YANG Yihan. Practicalization of fault location in distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 86-90.
- [32] CHOI M S, LEE S J, LEE D S, et al. A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 35-41.
- [33] LEE S J, CHOI M S, KANG S H, et al. An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 524-532.
- [34] CHOI M S, LEE S J, LIM S I, et al. A direct three-phase circuit analysis-based fault location for line-to-line fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2541-2547.
- [35] SALIM R H, RESENER M, FILOMENA A D, et al. Extended fault-location formulation for power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 508-516.
- [36] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 29-32.

- SHI Shenxing,DONG Xinzhou,ZHOU Shuangxi. Analysis of single-phase-to-ground fault generated traveling waves[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(23):29-32.
- [37] 季涛,孙同景,徐丙垠,等. 利用配电变压器获取行波信号[J]. 电力系统自动化,2006,30(16):66-71.
- JI Tao,SUN Tongjing,XU Bingyin,et al. Traveling waves measurement with distribution transformers[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(16):66-71.
- [38] 严风,杨奇逊,齐郑,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.
- YAN Feng,YANG Qixun,QI Zheng,et al. Study on fault location scheme for distribution network based on traveling wave theory[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):37-43.
- [39] 张帆,潘贞存,张慧芬,等. 树型配电网单相接地故障行波测距新算法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(34):70-75.
- ZHANG Fan,PAN Zhencun,ZHANG Huifen,et al. Fault line selection in non-solidly earthed network based on direction traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(34):70-75.
- [40] BORGHETTI A,CORSI S,NUCCI C A,et al. On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems[J]. Electrical Power and Energy Systems,2006,28(9):608-617.
- [41] BORGHETTI A,BOSETTI M,SILVESTRO M D,et al. Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks;definition of mother wavelets inferred from fault originated transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(2):380-388.
- [42] BORGHETTI A,BOSETTI M,NUCCI C A,et al. Integrated use of time-frequency wavelet decompositions for fault location in distribution networks;theory and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4):3139-3146.
- [43] 范春菊,张兆宁,郁惟镛. 小波模糊神经网络应用于配电网输电线的故障测距[J]. 电网技术,2002,26(9):13-17.
- FAN Chunju,ZHANG Zhaoning,YU Weiyong. Application of wavelet fuzzy neural network to fault location of single line grounding in distribution lines[J]. Power System Technology,2002,26(9):13-17.
- [44] MEISAM P N,ALI A S. Path characteristic frequency-based fault locating in radial distribution systems using wavelets and neural networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(2):772-781.
- [45] 季涛,孙同景,薛永端,等. 配电网故障定位技术现状与展望[J]. 继电器,2005,33(24):32-37.
- JI Tao,SUN Tongjing,XUE Yongduan,et al. Current status and development of fault location technique for distribution network[J]. Relay,2005,33(24):32-37.
- [46] 李荣伟,李永倩. 高压电缆用分布式光纤传感检测系统[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2010(1):38-41.
- LI Rongwei,LI Yongqian. High-voltage cable detection system based on distributed fiber optic sensing[J]. Optical Fiber & Electric Cable,2010(1):38-41.
- [47] 黄家栋,智秀霞. 配电网混合线路单端行波测距法[J]. 电力系统自动化,2009,33(7):93-96.
- HUANG Jiadong,ZHI Xiuxia. Single terminal method of traveling wave fault location in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(7):93-96.
- [48] HE Zhengyou,ZHANG Jun,LI Weihua,et al. Improved fault-location system for railway distribution system using superimposed signal[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(3):1899-1911.

作者简介:

唐金锐(1986-),男,湖北黄冈人,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护与配电网故障定位(E-mail:tangjinrui001@126.com);

尹项根(1954-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统继电保护、变电站自动化及安全稳定控制。

Survey of fault location technology for distribution networks

TANG Jinrui^{1,2},YIN Xianggen^{1,2},ZHANG Zhe^{1,2},YANG Chen¹,YE Lei¹,QI Xuanwei¹,LIN Jin¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China;2. Electric Power Security and High Efficiency Laboratory, Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: A survey of fault location technology for distribution networks is introduced based on existing research results,including faulty line selection,faulty section location and fault distance detection. The faulty line selection is used to distinguish the faulty one among multiple feeders and it is mainly based on the additional signal injection,the fault fundamental component,the fault transient component or the synthetic signals. The faulty section location is used to quickly isolate the faulty area for power recovery and it is mainly based on the real-time fault information uploaded from field devices,the trouble call or the weak fault characteristic detection. The fault distance detection is used to directly determine the fault location and it is mainly based on the signal injection,the fault fundamental component or the fault transient component. Combined with the key technologies of automatic fault location and its latest research achievements,its development trend is prospected.

Key words: distribution network; electric fault location; faulty line selection; faulty section location; fault distance detection