

多级串带电力电缆线路故障测距技术研究

首先针对架空线路、电缆线路和架空—电缆混合线路三种情况,对当前国内外的故障定位技术和分段技术进行了全面的汇总和梳理,并针对每一种方法给出了其特点和适用范围。并以此为基础,对主要的几种方法进行对比,由此提出针对多级串带电缆线路的故障分段加准确定位的测距方式。针对准确定位方法,对比研究双端行波、双端阻抗法各自优缺点,最终给出了适用于电缆多级串带线路的故障定位方法。

赵 洋 张 成 黄鹤鸣/国网北京检修公司
朱晓彤 沈 军/南京南瑞继保工程技术有限公司



赵 洋/工程师

随着城市输电网络规模的不断扩大,电缆设备的需求不断增长,随之而生的高压电缆串带线路、架空—电缆混合线路的情况也越发增多,给故障测距带来了困难和挑战。传统的基于人工的故障查询方式效率低,成本高。加之目前针对多级串带电缆、架空—电缆混合线路尚未出现行之有效的故障测距技术,使得目前上述两种故障查询方式依然采用传统的主要依靠人员巡视的方法来实现。

对此,当前大多数研究主要集中在单纯电缆线路、架空线路或者架空—电缆混合线路,对于电缆多级串带线路的故障分段和定位技术关注的非常少。随着城市地下电缆线路的不断增多,电缆多级串带的数量必然随之增高,由此而引发的故障分段和定位问题引起了生产和科研单位的重视。本文立足于在汇总分析现有故障分段和定位技术的基础上,深入对比分析了双端阻抗法和双端行波法的特点,并由此提出适合于电缆多级串带线路的故障分段和定位技术。

关键词/Keywords

多级串带·
混合线路·
故障分段·
故障定位·

输电线路的故障测距

关于多级串带高压电缆线路及电缆—架空线混合线路的故障测距研究,可分为两个方面,一是故障区段的确定,二是故障位置的确定。故障区段的确定主要是要区分故障发生在哪一区段,多级串带电缆线路的故障究竟位于哪一条电缆线路,以及对于混合线路的故障位于架空线路还是电缆线路,从而确定是否可以重合闸;故障位置的确定是要尽可能准确地测出故障点的位置,从而在电缆发生故障时,指导运行、检修人员迅速找到故障点,排除故障。

解决这两个问题,一种思路是直接测量故障距离,如果能准确地测出故障点距离,则故障区段确定,即上述两方面问题都得到了解决。由于电力电缆的电气参数不像架空线那样稳定,以及由于电容电流非常大,且受负荷电流的影响,直接测距法有可能导致较大误差。

如果能够首先实现故障区段的判断,那么对于架空—电缆混合线路来说则非常有利于架空线路瞬时故障的清除;对于多级串带电缆线路,则可缩小故障排查范围,若能在确定故障分段后进一步获得较准确的故障位置,则可进一步提高故障点定位速度。对于多级串带电缆线路,在确定故障区段之后,则可选择较为成熟的单纯线路的故障测距方法。

1. 单纯线路故障测距

国内外对于单纯的架空线或电缆线路故障测距研究较多^[1-3],有些测距装置已投入现场运行。通常将此类测距方法

分为阻抗法和行波法两大类。

(1) 阻抗法

阻抗法^[4-6]根据故障时测量到的电压、电流计算出故障回路的阻抗。由于线路长度与阻抗成正比，因此可求出测距装置安装处与故障点的距离。阻抗法按照测量电气量位置的不同可分为利用单端电压、电流量的单端算法和利用双端电压、电流量的双端算法。单端算法由于造价低，不受通信条件限制，在实际中应用非常广泛，其优点是简单可靠，缺点是测距准确度不高，易受过渡电阻、负荷电流和对侧系统阻抗变化的影响。

双端算法可以克服单端算法原理上的缺陷，因此在准确度上有所提高。双端算法按照数据同步的方式可分为GPS同步算法、自同步算法和不同步算法。

(2) 行波法

行波法^[7-14]是根据行波理论实现的输电线路故障测距方法，行波算法也可分为单端算法和双端算法。输电线路发生故障时，从母线向故障点传播的行波经过一段时间后又从故障点反射回来，这段时间间隔与故障距离成正比，检测这一时间是单端行波测距算法的基本思想。双端行波法是利用故障点产生的行波第一次到达两端的时间差实现测距。

文献[12]提出了一种改进的电缆故障测距方法，该方法主要是基于同步采样技术、小波变换分析和行波理论，并对一个400 kV的地下电缆系统进行仿真和评估。仿真研究表明，除了在故障离电缆两端非常接近的情况外，故障误差沿电缆呈对称分布，而且与故障类型无关。故障点离电缆两端越远，测距结果越准确。缺点是，在距离电缆两端很近的单相接地故障中，测距误差较大。

2. 混合线路故障测距

国内架空—电缆混合线路故障测距研究较少。这种模式对阻抗法来说不再是均匀传输线的模式；对行波法来说存在波阻抗差异较大而导致的波速不一致等问题。

(1) 基于分布参数模型的区段故障定位法

基于分布参数模型的区段故障定位法^[15-18]需要

根据故障分量实时算出两侧系统阻抗，再根据系统阻抗及两侧故障电流推导故障发生的区段，易于实现；缺点是只适用于结构相对简单的电缆架空线混合线路输电系统，对于较复杂的多段电缆或架空线交替出现的输电线路，在判定故障区段时判断依据较复杂，导致误差会随着连接点的增多而增大，使故障测距的准确度降低。

(2) 基于波速度归一的双端行波测距法

行波测距算法的关键是行波波头的准确辨识和行波传播速度的确定。混合线路中的波速度明显不连续成为该方法在系统中应用的瓶颈，利用波速度归一算法能很好地解决这一问题^[19-20]。

该方法是双端行波测距方法的一种推广，在理论上排除了线路参数引起的波速度不单一的影响。但需注意过渡电阻的大小会影响初始行波波头能量的大小，对于衰减严重的线路或过渡阻抗过大时，测量误差较大甚至无法正确测量。对于基于波速度归一算法的双端行波测距法，需要采用GPS对时，对现场条件是较大的挑战。

(3) 三相母线外加同一电压脉冲式单端行波测距法

三相母线外加同一电压脉冲式单端行波测距法^[21]是一种单端测距方法，在线路发生单相接地故障且重新达到稳态后，在测量端三相母线上同时加同一电压脉冲，并对采集到的行波进行Karrenbauer变换，利用线模行波进行测距。该方法只用于单相接地故障的测距，且需要故障持续一段时间使系统达到稳态，适用于电压等级较低的中性点不接地系统，不适用于故障快速切除的高压、超高压系统。

(4) 混合线路相位测距法

文献[22]提出一种高压电缆—架空线混合线路相位测距法。该方法定义了一新定位函数。通过分析可知，在混合线路上当所取参考点与故障点的相对位置不同时，定位函数呈现不同的相位特性；当所取参考点在故障点前后变化时，定位函数的相位会发生唯一一次相位突变，相位发生突变的位置即为故障点。该方法无需事先判别故障区段，将混合线路直接等效为一等长线路进行故

障测距。测距准确度基本上不受过渡电阻、故障类型、采样频率、故障位置和负荷电流等因素的影响,无测距死区,较好地克服了传统方法在混合线路连接点附近有死区的不足。

3. 故障区段定位法

单纯线路的故障测距、混合线路的故障测距方法都是在没有单独的终端信息采集设备的条件下的故障测距方法,对于单纯电缆线路、架空线路或结构简单的混合线路较为适用。但对于包含了分支较多的多级串带线路和较复杂的混合线路,这些没有终端的故障测距方法不再适用。从现有的研究情况来看,选择故障分段加准确定位的组合方式不失为一种相对合适的方法。

故障区段定位的方法主要分为两大类。

第一类。利用馈线沿线装设的现场终端设备(Feeder Terminal Unit, FTU)采集故障实时信息,然后上传至配电自动化系统,实现故障区段定位功能。此类方法判断快速、准确,但需要相当可观的建设费用,目前一般只在负荷密集地区建设配电自动化系统,而且通常是分步实施的。

第二类。利用电力用户打来的故障投诉电话(Trouble Call, TC),同时根据供电局的营销管理系统和地理信息系统中的相关信息,最终实现故障区段定位。相对于第一类方法,该方法投资费用较小,但是故障区段定位速度较慢,在这里不做探讨。

基于FTU采集故障信息的故障区段定位方法,由于FTU大多安装于户外,所处运行环境恶劣,经受着强烈的电磁、雷电干扰,使得配电网信息受干扰而畸变或丢失的可能性较高^[23]。因此基于硬件信息的配电网故障定位方法又可分为两种:一种是基于完备、准确信息的配电网故障定位方法,此种方法的容错性差;另一种是基于不准确、不完备信息的配电网故障定位方法,这种方法具有较高的容错性。

(1) 基于完备、准确信息的定位方法

基于完备准确信息的故障定位方法,根据信息采集终端的不同可分为基于FTU的矩阵算法、基于故障指示器的故障区段定位方法和基于柔性光

电互感器的集中式故障区域判别方法。

1) 基于FTU的矩阵算法。基于完备、准确信息故障定位方法的基础是故障电流判别法。判定规则归纳如下^[24]:对于开环运行的网络,如果一个最小配电区域的始点经历了过电流,则该最小区域内有故障;对于闭环运行的网络,定位必须借助于故障潮流的方向来判别。如果故障时流过一个最小区域的各个端点的有功功率方向都指向该最小配电区域,则该区域有故障。

基于以上判定准则,国内外学者提出了一系列配电网故障区段定位的算法。文献[25]中提出了一种基于柱上FTU的配电网区间定位的统一矩阵算法,该算法只适用于辐射状、开环网络结构中,且规格化处理较为繁琐。为克服上述算法的不足,文献[26]中提出一种改进的统一矩阵算法。此算法不但省去了规格化处理,而且还适用于多电源多故障情况,并且克服了馈线末端发生故障的判断盲区。文献[27]进一步简化了算法,但只适用于单一故障下的区段定位。文献[28]在文献[27]的基础上完善了判据,使算法适用于多电源、多故障区间的判别。文献[29]将这种算法推广到考虑分布式发电的情况,并讨论了与电流保护装置相配合的情况。文献[30]构造了继续简化的运算过程,经简单判断便可得到故障区段,但故障判断矩阵有出现误判的可能。文献[31]提出了一种适用于多电源的情形。

2) 基于故障指示器的故障区段定位方法。线路故障指示器^[32]是应用在输配电线路、电力电缆及开关柜进出线上,用于指示故障电流流通的装置。目前绝大多数模拟电路的故障指示器主要是采用电流突变法。该方法的优点是自动跟踪负荷电流大小,不用整定参数。其缺点是在两相接地、过电流或过负荷短路情况下,短路电流是逐渐增大的,指示器因无法检测到电流突变而导致拒动。过电流速断法与变电站低压线路保护装置的故障检测原理一致,需要用户整定定值。

故障指示器使用简单,成本低,对区分故障段效果明显,但仍需检修人员巡线,效率相对较低。目前在低压配电网中,已有将故障指示器的

状态信息通过无线通信网上送到监控中心，由监控中心进行自动故障定位的系统。故障指示器的方法只适用于单端电源的线路，不适用于双端电源，同时对于区外扰动可能误判，可靠性相对较差。

3) 基于柔性光电互感器的故障区段判别方法。随着柔性光电互感器技术越来越成熟，南瑞继保电气有限公司提出并研制了基于柔性光电互感器的集中式故障区域判别装置PCS-958，并成功投运。

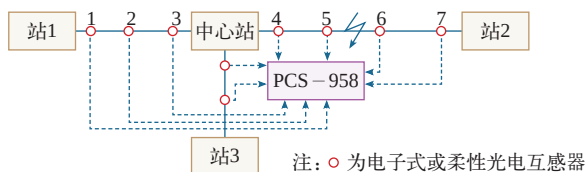


图1 故障区域判断系统

如图1所示，该方法在混合线路的架空—电缆线路交接处以及变电站相关位置分别安装电子式互感器或柔性光电互感器，在中心站设置一台集中式故障区域判别装置，在故障后快速准确识别出故障位于哪个区段。该方法已用于南京南瑞继保电气有限公司的集中式故障区域判别装置。与故障指示器相比，电流测量点的互感器只是将采集的电流通过数字通道上送到中心站，本身不进行逻辑判别；该系统的通信网中传输的是采样值，而不是判断处理后的状态信息，相比于基于故障指示器的故障区段定位系统，中心判别装置得到的信息更丰富和完整，便于各种判别算法的应用。此方法需要大容量通道来传输采样信息，对于高压线路而言，大容量的光纤通道是不难得到的。目前此方法在实际中还只用于单电源供电的线路，是否有用于双端供电线路和多级串带线路的需要，以及如何应用，还有待研究。

(2) 基于不准确、不完备信息的定位方法

如前所述，如果由于某种原因，上传的实时信息中出现信息畸变或不完备，上述矩阵算法就会造成误判，因此有必要研究高容错性的算法。国内外已有不少学者开始这方面的研究，也取得了一定的成果。例如人工神经网络法、遗传算法和粗糙集理论方法等，这里就不一一详述。

多级串带电缆线路测距方式

1. 各种测距方法的特点分析

对于单纯架空线路或电缆电路，阻抗法和行波法是最常见的故障测距方法，而且都有单端和双端之分。

单端阻抗法在实际中应用非常广泛，其优点是简单可靠，成本低；缺点是测距准确度不高，受过渡电阻、负荷电流和对侧系统阻抗变化的影响。双端阻抗法需要两端装置具备通信和同步功能，其优点是测距准确度高；缺点是成本稍高，测距准确度受通信通道可靠性和GPS信号稳定性的影响。

虽然阻抗法的测距准确度受故障电阻、光电互感器误差、线路结构不对称和零序参数沿线路分布不均匀等因素影响，但是这些因素一般较稳定。而且阻抗法相比行波法，存在成本低、测距准确度稳定、不受线路长度限制和适用范围较广的优点。

行波测距的优点是测距准确度在理论上不受线路类型、过渡电阻和两侧系统阻抗的影响；缺点是对硬件要求较高，对故障行波信号的测量、超高速记录、行波脉冲的小波检测以及双端装置时间准确度要求较高，成本较高，而且由于行波波形复杂多变，分析难度大，误判波头的可能性较大，尤其是线路中存在分支或串有阻波器时，行波测距几乎无法使用。行波测距还有一个较大的特点是故障点离电缆两端越远测距结果越准确，在距离电缆两端很近的单相接地故障中，测距误差较大。所以行波法更适用于电压等级较高、线路结构简单和线路长度较长的输电线路，不适用于分支较多、线路较短和结构复杂的配电网。

从以上分析可以看出，对于多级串带电缆线路来说，仅仅使用适用于简单线路的阻抗法或行波法来进行故障区段定位几乎不可能，但是在简单线路的故障准确定位上，又各有优缺点。

针对架空线—电缆的混合线路来说，基于分布参数模型的区段故障定位法、基于波速度归一算法的双端行波测距法、三相母线外加同一电压脉冲式单端行波测距法和混合线路相位测距法不仅各自都有使用局限性，而且当混合线路的结构

变复杂时,测距准确度都会下降。

2. 故障分段加准确定位方式的提出

对于城市输电网来说,结构简单不带分支的单纯架空线路或电缆线路、甚至混合线路都比较少见,仅仅依靠前面这些基于少量信息的故障测距方法难以准确判断故障区段和位置。如果能通过其他方法先确定故障区段,再选择合适的测距方法,就能准确定位故障位置,方便工作人员快速排除故障。

要想实现快速、准确和实用的在线故障区段定位系统,必须基于必要数量的信息采集终端。由于信息采集终端安装的环境一般比较恶劣,终端设备的可靠性值得考验。考虑到终端传送信息的可信度,基于终端的故障区段定位系统又分为两个方向:一个是基于完备准确信息的判断方法;一个是基于不准确、不完备信息的判断方法。

基于完备准确信息的故障区段判断方法包括基于FTU的矩阵算法、基于故障指示器的故障区段定位方法和基于柔性光电互感器的集中式故障区段判别方法等,它们对终端采集设备的可靠性要求较高。

基于FTU的矩阵算法由于需要FTU在终端进行简单判断后把结果传给中央系统进行矩阵算法判断故障区域,对FTU处理信息和传输结果的可靠性要求较高。由于中央系统获取的信息是经过处理之后的二次信息而不是原始信息,所以故障判断算法的灵活性有限,容错性也不高。

基于柔性光电互感器的集中式故障区段判别方法与基于FTU的矩阵算法相比,电流测量点的互感器只是将采集的电流量通过数字通道上送到中心站,本身不进行逻辑判别;该系统的通信网中传输的是采样值,而不是判断处理后的状态信息,相比于基于故障指示器的故障区段定位系统,中心判别装置得到的信息更丰富和完整,便于各种判别算法的应用,判别算法的研究发展空间很大。

针对基于FTU的矩阵算法,考虑到FTU上传的实时信息中出现信息畸变或不完备,为了提高判别算法容错性,基于不准确不完备信息的故障区段定位方法也有大量的学者在研究,其中引进

了人工神经网络、遗传算法和蚁群算法等各种信息理论。然而这些方法是基于不准确、不完备信息的假设条件,虽然目的是为了提 高算法的容错性,但是算法较复杂,目前大多还处于理论研究阶段,没有普遍应用。可以想象,随着信息技术的飞速发展和电力系统的硬件条件不断改善,基于丰富信息的故障定位系统必然会成为主流,那时必然有条件应用这些理论研究成果。

综上所述,判断准确、快速和高容错性是输电线路故障区段定位算法所必须具备的三大要素。通过对比分析可见,基于完备故障信息的输电网故障定位区段是最可靠的,同时具备在线实时应用的可能。针对包含多级串带电缆和混合线路的配电网来说,要建立准确、快速和实用的在线故障定位系统,考虑到目前技术的成熟度和实用性,理想的方案是采用以基于柔性光电互感器的集中式故障区段判别方法为基础,增加单端或双端阻抗法的准确测距功能,可以实现实时、准确的故障定位系统,而且这个系统的可扩展性和灵活性非常大,以此为平台可以通过不断开发程序满足用户的各种需求。但由于目前柔性光电互感器的价格较高,资金投入较大,且存在多点同步等技术难题,有待进一步研究。

准确定位方法

双端测距相比单端测距具有不受过渡电阻、负荷电流和系统阻抗等因素影响的优点,所以测距准确度高,应用范围较广。

1. 双端阻抗测距特点归纳

双端阻抗测距优点:不受过渡电阻的影响,适用范围广,适用于带有分支的线路。由于各分支的两端都安装有电流互感器,根据两端的电压和各分支的电流可以推算出故障区段两端的电压,从而确定故障的准确位置,不受线路长度限制,无测距死区,硬件成本低。只需要工频电压互感器和电流互感器即可,获得两端电压和各区段的电流信息,即可推算出故障位置,算法简单可靠,不易受干扰。

双端阻抗测距的缺点:对两端采样的同步要求高,如采用GPS时钟同步则要求信号稳定,对通

信通道可靠性要求高。

2. 双端行波测距法特点归纳

双端行波测距的优点：不受过渡电阻和两侧系统阻抗的影响。

双端行波测距的缺点：对GPS时钟信号的准确度和稳定性要求非常高。由于行波以接近光速传播，较小的时钟误差会导致较大的测距误差；对采样设备的准确度、传变特性要求高。电压电

流的高速采集设备投入成本高；行波波形复杂多变，分析难度大，存在误判波头的可能性较大。不适用于带分支的线路，分支会导致行波的折反射，导致行波分析过于复杂甚至测距失败；适用于长线路测距，不适用于短线路。短线路或故障点靠近两端时，测距误差大。

针对上述两种方法的特点描述，将两种方法在关键技术方面进行对比，如下表所示。

表 双端行波测距与双端阻抗测距对比分析表

序号	类别	双端阻抗测距	双端行波测距
1	同步时钟	要求具备GPS同步时钟或采用基于通信通道的其他同步方法，保证两端采样同步即可	对两端的GPS时钟信号的准确度和稳定性要求非常高，时钟信号的准确度对测距误差影响较大
2	采样设备	常规工频电压互感器/电流互感器即可满足要求，无须额外投资，成本低	要求具备能采集高频信号的电压互感器/电流互感器，对采样设备的高速、高频采样性能要求高，额外投资成本高
3	线路类型	可适用于带分支线路	不适用于带分支线路
4	线路长度	长短线路都适用，无测距死区	适用于长线路，短线路测距误差大，长线路且故障点离两端近时测距误差大
5	算法、稳定性及成熟度	算法简单可靠，使用广泛，较成熟	波形分析复杂，小波分析计算量大，存在误判波头的可能性
6	测距准确度	受互感器误差、线路结构不对称和零序参数沿线路分布不均匀等因素影响	受时钟准确度影响大，测距误差受故障点位置影响，有测距死区

综上所述，多级串带电缆线路具备以下特点：多级串带高压电缆的线路较短；考虑将来的扩展性，将来有带分支线路的可能；电缆线路结构比较对称，同区段电缆参数较均匀；受电缆线路现有条件限制，如GPS时钟信号、地下电缆采样设备安装条件等；电缆线路数量多分部广，受投资金额限制，不可能大量安装昂贵的行波采集分析设备和高准确度、高稳定性的GPS设备。

对于城市电缆网当中的多集串带电缆线路来讲，选择双端阻抗法是一种更合理的选择。

结束语

通过全面、深入地汇总目前国内外在输电线路分段和定位技术研究和应用领域的成果，得到了各种故障定位技术和故障分段技术的优缺点和使用范围，并进行了对比分析。鉴于电缆多级串带线路愈发成为生产和研究领域的重要关注点，考虑到目前大城市输电网络中的复杂情况，给出了针对多级串带线路的故障分段加准确定位的故

障测距方式，同时对于目前大家所广泛关注的双端阻抗法和行波法在多级串带线路故障判别方面的适用性进行了深入的对比分析，最终提出了对于多级串带线路应采用基于柔性光电互感器的故障分段以及双端阻抗法的故障测距方式，为今后进一步的研究和实际应用奠定了理论和技术基础。

参考文献

[1] 覃剑，陈祥训．基于小波变换技术的新型输电线路故障测距系统[J]．电网技术，2001，25(4)：31-35．
[2] 郑健超，陈祥训，覃剑，等．验证小波变换行波故障测距法的现场试验[J]．电网技术，2001，25(3)：26-29．
[3] 鹿洪刚，覃剑，陈祥训，等．电力电缆故障测距综述[J]．电网技术，2004，28(20)：58-63．
[4] 杜召满．输电线路故障测距研究与应用[D]．杭州：浙江大学，2004．
[5] 王玮，蔡伟，张元芳，等．基于阻抗法的电力电缆高阻故障定位理论及试验[J]．电网技术，

- 2001, 25 (11): 38-41.
- [6] 张群峰, 文习山, 陈燕萍. 基于电弧特性的电力电缆故障在线测距方法 [J]. 高电压技术, 2003, 29 (7): 30-31.
- [7] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (12): 62-65.
- [8] 范春菊, 张兆宁, 郁惟镛. 小波方法在超高压输电线路行波故障测距中的应用 [J]. 电网技术, 2003, 27 (8): 50-53.
- [9] 何正友, 钱清泉. 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (10): 45-48.
- [10] Magnago F H, Abur A. Fault location using wavelets [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13 (4).
- [11] 范春菊, 张兆宁, 郁惟镛. 小波方法在超高压输电线路行波故障测距中的应用 [J]. 电网技术, 2003, 27 (8): 50-53.
- [12] Zhao W, Song YH, Chen R. Improved GPS travelling wave fault locator for power cables by using wavelet analysis [J]. Electrical Power and Energy systems, 2001, 23 (5): 403-411.
- [13] Boggess A, Narcowich F J. A first course in wavelet with fourier analysis [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [14] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and Processing with wavelets [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38 (2): 617-643.
- [15] 刘伟, 陈皓. 基于分布参数模型的混合线路故障测距新算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (24): 76-80, 132.
- [16] 蔡华嵘, 范春菊, 郁惟镛, 等. 一种实用的高压输电线路双端电气量故障测距新算法 [J]. 中国电力, 2003, 36 (7): 31-34.
- [17] Lee J B, Ha C W, Jung C H. Development of digital distance relaying algorithm in combined transmission lines with underground power cables [J]. IEEE Power Engineering, 2001 (1): 611-616.
- [18] 吴承恩, 邵能灵, 郁惟镛, 等. 超高压电缆-架空线混合线路故障测寻法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (10): 26-30.
- [19] 和敬涵, 季英业. 小电流接地系统单相接地故障测距方法的研究 [J]. 华北电力技术, 2004 (1): 1-3.
- [20] Huang Yizhuang, Li Quanyao, Xia Mingchao. A new fault location method [C]. IEEE/PES-CSEE Proceedings, 2002 (2): 1142-1145.
- [21] 季英业, 和敬涵. 基于小波变换的铁路10 kV系统单相接地故障行波测距法 [J]. 电网技术, 2003, 27 (11): 13-15.
- [22] 曾惠敏, 林富洪. 高压电缆-架空线混合线路相位测距法 [J]. 电力自动化设备, 2011, 9 (31): 82-87.
- [23] 孙雅明, 杜红卫, 廖志伟. 基于神经逻辑网络冗余纠错和FNN组合的配电网高容错性故障定位 [J]. 电工技术学报, 2001, 16 (4): 71-74.
- [24] 刘建, 毕鹏翔, 杨文字, 等. 配电网理论及应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [25] 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.
- [26] 夏雨, 姚月娥, 刘全志, 等. 配电网故障定位和隔离的新统一矩阵算法 [J]. 高电压技术, 2002, 28 (3): 4-7.
- [27] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障定位的一种新算法 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (14): 48-50.
- [28] 李静一, 肖保明, 周正贵. 配电网故障区段诊断改进矩阵算法研究 [J]. 现代电力, 2004, 21 (1): 50-54.
- [29] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的多电源故障区域定位新方法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23 (11): 139-145.
- [30] 徐奎, 张雪松, 杨波. 配电网故障定位的改进通用矩阵算法 [J]. 继电器, 2007, 35 (3): 6-8.
- [31] 张钊. 配电网故障定位的通用矩阵法 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (5): 40-42.
- [32] 张丹洋, 周浩. 一种用于绝缘子闪络定位的新型无源故障指示器 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (6): 120-124.
- (收稿日期: 2014-05-05) EA