

高压直流输电线路故障测距研究综述

杨 林, 王 宾, 董新洲

(电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084)

摘要: 高压直流输电线路的距离长、跨越的地区地形地貌和环境气候差别很大, 故障概率高。对故障测距的准确度要求也高。因此, 提出了描述分布参数线路电气特征的波动方程作为故障测距原理的基础, 针对时间、频率和空间三个角度, 分别对提出的行波法、固有频率法和故障分析法进行了技术梳理与总结, 明确了以行波法为主、固有频率法和故障分析法协助提高测距可靠性的整体技术方案, 并就高阻接地弱故障启动、波头振荡、反射系数频变等行波测距法现存的问题给出了后续的改进思路和方案。

关键词: 高压直流输电; 故障测距; 行波法; 固有频率法; 故障分析法

0 引言

直流输电具有长距离“点对点”输电的特点, 且跨越地区的地形地貌、环境气候差别很大^[1-3], 造成了直流输电线路的运行环境相较于交流线路更为复杂, 是直流输电系统中故障率最高的部分, 其故障形式主要是雷击、污秽、树枝等因素导致的接地和闪络, 且 90% 以上为瞬时性故障^[4]。直流输电线路保护装置检测到故障后启动, 到达定值后向控制系统发出故障重启命令, 测距装置则利用故障后至重启前这段时间的数据进行故障定位。

任何测距原理都是基于线路模型, 利用电气量和故障距离的关系来构造的。就高压直流输电线路而言, 其长度决定了必须基于分布参数模型来推导测距公式, 因此, 描述分布参数线路电气特征的波动方程成为了测距的基础。波动方程的达朗贝尔解说明电压、电流均是由前行波和反行波叠加形成的, 行波是既与时间相关又与距离相关的物理量, 且传播距离和传播时间受波速度的约束, 因此固定观测点, 通过行波到达的时间信息可以推算传播距离, 这就是行波法的基本原理。行波会在线路边界和故障点之间来回折反射, 在计及多次折反射的一个较长的时间范围内行波信号呈现周期性规律, 因此行波信号的频率也可以反映线路边界到故障点的距离, 这

种利用暂态信号频域特征的测距方法称为固有频率法。根据时间换空间的思想, 某一时刻下, 线路某处的前行波可以用测量点处前行波的历史值得到, 反行波可以用测量点处反行波的将来值得到。因此, 通过测量点处电压和电流行波便可推知线路上任意一点的电压和电流值, 结合故障点电压电流的特征便可进行故障定位, 这种直接利用波动方程推导沿线电气量分布的方法就是故障分析法。行波法、固有频率法和故障分析法分别从时间、频率和空间三个角度建立起了可检测电气量和故障距离之间的关系, 是直流输电线路的三种主流故障测距方法。

由于构造测距方程的切入点不同, 三种方法各有优缺点: 行波法测距精度高, 但存在波头检测失败的风险; 固有频率法不需要检测波头, 具有较高的稳定性, 但是抗干扰能力较差, 并且存在测距死区; 故障分析法同样具有稳定性好的优势, 但是受制于模型的准确度使其测距精度有限, 并且计算量很大。

基于分布参数线路的波动方程构造的各种测距方法同样适用于长距离交流输电线路, 由于历史原因, 对这些方法最初的研究也是在交流输电线路提出的。交直流输电线路测距的基本原理本质上并无不同, 存在很多共性的问题, 但是交直流输电系统的网架结构、电气特性有所不同, 在两种应用场景下也存在一些差异。例如, 行波法在两种运用场景下发生高阻接地故障时, 均存在波头检测失败的风险, 在直流输电线路应用时, 不受故障时刻、其他出线的影响, 但是却存在波头畸变的问题; 固有频率法在两种运用场景下均需要解决提取固有频率的问题, 直流输电线路的边界比较复杂, 所以处理终端阻抗

收稿日期: 2017-09-12; 修回日期: 2017-12-27。

上网日期: 2018-01-25。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900600); 国家自然科学基金资助项目(51477084); 清华大学自主科研计划项目(2015THZ0)。

的问题显得尤为重要;故障分析法的准确度主要受模型精度的影响,这个问题在距离更长的直流输电线路显得尤为突出。

针对该问题,本文对直流输电线路故障测距技术现状进行了全面的梳理与总结,提出了后续的改进思路和方案。

1 行波法测距

1.1 基本原理

故障行波传播过程如图 1 所示。

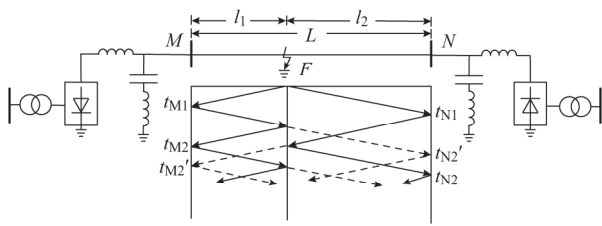


图 1 故障行波传播过程示意图
Fig.1 Propagation schematic diagram of fault traveling waves

双端行波原理测距公式为:

$$l_1 = \frac{L - (t_{N1} - t_{M1})v}{2} \quad (1)$$

式中: l_1 为故障点到 M 端的距离; L 为线路长度; v 为行波的波速度; t_{M1} 和 t_{N1} 分别为初始行波到达 M 和 N 端测量点的时刻。

单端行波原理测距公式为:

$$l_1 = \frac{L - (t_{M2} - t_{M1})v}{2} \quad (2)$$

式中: t_{M2} 为故障点反射波到达 M 端的时刻。

理论上,行波法测距的可靠性和准确性不受线路类型、故障电阻、故障类型及两侧系统运行方式的影响^[5],是一种精度很高的测距方法,但是仍存在问题影响测距的准确度。

1.2 交直流线路行波法测距的共性问题

直流、交流线路行波测距共性的问题,包括行波波头的识别、行波到达时刻的标定、波速度的确定等问题,以下具体分析。

1) 波头识别的问题

双端行波原理仅需要识别线路两侧初始行波的波头,目前,主要有导数法^[6]、小波变换法^[7-11]、数学形态学法^[12-13]和希尔伯特-黄变换(HHT)法^[14-17]等。导数法存在对噪声敏感的问题;HHT 法存在端点效应、模态混叠、筛分停止等问题^[16],并且瞬时频率并不能反映波头的极性^[17],无法通过极性变换识别故障点反射波,限制了 HHT 法在单端测距原理中的应用;数学形态学法和小波变换法应用于行

波波头识别时,关键点在于选取合适的“基”,相比较而言,小波变换法比数学形态学法更为成熟。文献[11]证明了三次 B 样条函数作为小波变化的基函数时可以在有噪声的情况下有效检测出信号的奇异性,但是在高阻等弱故障情况下可能检测不到波头。单端行波测距原理除了初始波头外还要识别出故障点反射波的波头,难点在于区分故障点反射波和对端母线反射波。目前,识别故障点反射波主要有行波相关法^[18-20]、小波变换法^[21-23]、匹配滤波法^[23]等。其中,行波相关法和匹配滤波法都属于利用波形的相关性来识别反射波的方法,存在的问题主要是数据窗的宽度难以确定、受行波衰减和畸变的影响较大。小波变换法是利用行波模极大值的极性来识别故障点的反射波,该方法构成简单、易于实现,并且直流线路母线只有一条出线,不存在来自相邻线路的反射波干扰的问题,使用模极大值的极性来识别故障点反射波的波头是一种可行的方法。

2) 波头到达时刻的标定问题

行波的色散效应^[24]导致波头变缓,进而导致了标定不准确。针对该问题目前有两种解决思路,第一种是将行波信号分解到各个频带,每个频带的衰减系数和波速度可以近似为常数,选取行波信号中能量相对集中的频带进行测距^[25-27]。行波的色散效应在数学上可以用传播系数来描述,所以,第二种思路是用拟合的方法将传播系数表示出来,从而对畸变后的行波波头进行校正^[28]。

3) 波速度的问题

无论单端还是双端原理,故障距离的计算均离不开波速度。考虑到 1 kHz 以上的行波信号的波速度基本趋于一个稳定值^[29],所以,行波测距装置一般以选取经验值或实测的方法确定波速度。增加用于测距的波头数量也是处理波速度问题的一个思路,如文献[30]提出的分布式行波测距原理,通过在线路上分段布置测量点,实现了波速度的在线测量,并缓解了色散效应带来的标定误差,目前该技术在电网中已经有应用,并且取得了较好的效果^[31]。

1.3 直流线路的行波法测距的特有问题

直流输电系统在网架结构、运行控制等方面与交流系统不同,因此直流输电线路行波测距具有一些优势。例如直流电气量没有周期性的过零点,在任何时刻故障都会产生暂态行波,行波法的测距结果不受故障时刻的影响,直流系统通常情况下为点对点的供电系统,一个直流母线只具有一条出线,故障测距的结果不受其他线路的影响^[32];直流输电系统普遍采用阻容分压式的电压互感器、光电式电流互感器^[33]。电压互感器和电流互感器的截止频率

分别为 50 kHz 和 100 kHz^[34],电压和电流互感器均具有传变行波信号的能力,可以考虑同时采用电压和电流行波进行测距^[35]。

但是通过对直流行波的解析发现,直流输电线路的行波测距也存在着其特殊的问题。其中,最突出的问题就是直流输电线路的边界元件(平波电抗器和直流滤波器)导致行波的反射系数随频率变化。入射电流行波可以看作理想的阶跃波,含有丰富的频率分量。不同频率分量经过边界反射后的幅值和相位变化是不同的,这导致了行波波头的振荡。在交流输电系统中,故障行波可以看作阶跃波的叠加,行波波头是骤升的,采用小波变换的方法标定到达时刻比较准确。但是,直流输电线路的故障行波是一个振荡的波形,这就导致了行波波头比较平缓,小波变换的模极大值点出现的时刻和信号的到达时刻之间可能出现偏差,导致行波到达时刻标定不准确;行波的振荡过程对应多个突变点,进行小波变换后出现多个模极大值点,除了代表波头到达时刻的模极大值点外,还存在一些虚假模极大值点,可能导致行波到达时刻标定错误。针对该问题,文献[36]分析了线路末端的线模和零模电压反射系数与频率的关系,指出了各模量中不同频率分量的反射系数差异性很大。文献[37]给出了线路末端对阶跃输入的响应,也就是入射电压行波为阶跃波时的末端电压,可以看到末端电压发生了明显的振荡。虽然,文献[36-37]都是针对电压行波做的分析,但是电流行波的反射系数和电压行波的反射系数只差一个负号,所以,对电流行波的分析也会得到相似的结论。但是目前还没有文献针对反射系数频变的问题提出解决方案。

综上所述,行波法在直流输电线路故障定位中得到了广泛的应用,是目前精度最高的测距算法,但并非完美无缺。国家能源局在 2010 年发布了针对行波测距装置的行业标准^[38],对装置各项指标提出了明确的技术要求,即对于超过 300 km 的长线路,测距误差最大不超过 1 km。目前,现场投运的行波测距装置基本可以满足技术要求,但是在测距条件恶劣的情况下,测距装置的最大误差可达 3 km^[39],测距精度还有待进一步提高。目前,影响测距精度的主要问题是由线路边界导致的波头畸变问题。除此之外,在高阻等故障情况下,行波法还存在着波头检测失败的风险,需要进一步的改善。

2 固有频率法测距

2.1 固有频率法测距的基本原理

最早在 1979 年,Swift 发现故障行波的频谱与

故障距离及线路终端的结构有关,即^[40]:在一系列频率成分组成的行波频谱中,这一系列频率成分称为故障行波的固有频率,其中最低频所占的比重最大,称为行波频谱的主成分。在线路终端为理想的开路或者短路状态的情况下,行波频谱的主成分与故障距离之间有确定的函数关系。该研究局限于线路终端两种极特殊的情况下的故障定位,所以 Swift 的研究结论仅仅是固有频率法测距的雏形。文献[41]推导了线路终端为任意阻抗值条件下的故障距离和系统终端阻抗、行波固有频率之间的关系,使得利用行波固有频率的测距方法得到了完善。

固有频率法的测距公式为:

$$l = \begin{cases} \frac{(\theta_1 + \theta_2 + 2k\pi)v}{4\pi f_n} & 0 \leq \theta_1 + \theta_2 \leq \pi \\ \frac{(\theta_1 + \theta_2 - \pi + 2k\pi)v}{4\pi f_n} & \pi < \theta_1 + \theta_2 \leq 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

式中: l 为故障距离; f_n 为第 n 次固有频率; θ_1 和 θ_2 分别为频率 f_n 下线路末端和故障点处的反射角; k 为整数,具体取值与固有频率的次数有关, f 为主成分时, k 取使得方程为非零正值中的最小值, f 为二次成分时, k 取使得方程为非零正值中的第二小值,以此类推。

2.2 固有频率法测距的研究现状

利用固有频率法测距,无论应用场景是交流线路还是直流线路,都需要提取出精确的固有频率,目前提取行波固有频率的算法主要有傅里叶变换、多信号分类算法、小波变换,在此基础上,文献[42]利用信号的时频相关性,先在频域确定行波频谱的主成分,再在该频率的邻域内确定行波信号的周期来得到更为准确的频率值。文献[43]先利用经验模态分解算法处理信号得到故障测距所需的行波成分,再在该成分中提取固有频率,减弱了频谱混叠对测距的影响。

直流输电线路的边界比较复杂,因此对终端阻抗的处理方式对测距精度有比较大的影响。文献[44]将固有频率法应用于直流输电线路的故障定位中,该文献对线路终端阻抗的处理是把线路终端对高频分量而言看作是开路的,线路终端对低频分量的作用看作使其发生偏移。没有对线路终端的作用进行理论分析,而是利用神经网络的方法训练得到了测距结果。文献[45]则对线路终端阻抗的影响进行了量化分析,计算得到了行波主频率下的终端反射角,通过行波主频率和反射角计算出故障距离。文献[46]研究了在柔性直流输电线路中固有频率法的适应性。

一些学者还提出了利用行波法和固有频率法进行组合测距的方法,组合测距法首先利用固有频率法给出故障距离的大概范围,然后利用行波法在给出的故障范围内查找波头来进行精确测距,组合法测距结合了固有频率法稳定性好及行波法精确度高的优势^[47]。

因此,与行波法相比,固有频率法不需要对行波的波头进行识别,避免了波头识别和波头标定带来的误差。但是,当存在干扰信号时,干扰信号在一个或者多个频点的能量高于固有频率的能量时,固有频率法得到的测距结果可能出错;当故障点靠近线路终点时,行波频谱主成分的频率很高,可能已经超过了行波采集装置的采样率,所以固有频率法存在测距的死区。截至目前,尚未见到固有频率法工程实用案例报道。

3 故障分析法测距

根据直流输电线路输电距离长、直流电气量不具备工作频率的特点,一般采用基于分布参数模型、利用时域量的故障分析法进行测距。

3.1 故障分析法测距的基本原理

目前,故障分析在直流输电线路测距中的具体做法是:根据故障条件下的电压、电流沿线分布特征求出故障点的位置。文献^[48-49]提出了一种利用沿线电压分布的直流输电线路双端测距算法,该算法从线路的两个测量点分别向对侧测量点计算故障后输电线路各点的电压,计算所采用的输电线路模型是 Bergeron 模型,利用两次算得的电压在故障点处时相等这一原理构造测距判据。文献^[50]提出了一种基于电气量沿线分布的单端故障测距算法,该方法在计算出电压和电流沿线分布特征的基础上,实时计算各点上电压和电流的比值,利用故障点上二者的比值总是过渡电阻这一性质来测距。

3.2 故障分析法测距的研究现状

故障分析法的本质是求解输电线路波动方程以得到电气量的沿线分布,输电线路模型误差是求解结果误差的主要来源,因此消减模型误差的影响是故障分析法的主要研究内容。文献^[51]将遗传算法引入时域故障分析测距算法中,改善了线路参数不准确情况下沿线电压分布计算不准的问题。文献^[52]改进了直流输电线路双端测距算法,针对线路参数不准确和两端数据不同步导致测距出现误差的问题,将测距结果、直流线路参数和两端信号采集时钟误差一起作为未知数,构造出多变量最优化问题,给所有变量设定取值范围,然后用遗传算法寻找最优解。文献^[53]利用 Pearson 相关系数测量故障

后,电压和已有模式的电压相似性来进行故障定位。文献^[54]针对 Bergeron 模型中将线路电阻作为集中参数分段计入而导致模型不够准确的问题,将电阻作为分布参数计入线路模型,使得算法采用的线路模型更为精确。综上所述,削减模型误差的影响主要有两个思路:第一个思路是利用最优化算法或者相似性算法对测距结果进行修正,这种思路没有提高模型的精度,修正的标准也很难确定,所以并没有从本质上解决模型误差的问题;第二个思路是采用更精确的线路模型,理论上可以提高测距的精度,但是提高模型的准确度会因引入高阶微分而导致数据病态。

还有一些学者将沿线电气量的分布和行波相结合,计算行波量的沿线分布,计算出的行波量的突变点对应故障点^[55-57]。

综上所述,故障分析法是一种稳定性较好的故障定位方法,但是针对线路模型误差导致测距精度不高的问题还没有很好的解决方案。截至目前,也尚未见到该方法的工程实用案例报道。

4 后续研究的建议与设想

由以上分析可知,行波法是目前较为成熟的直流输电线路故障测距方法,因此,后续研究重点建议仍然放在行波法上,有以下几条建议。

1) 针对高阻等弱故障情况下行波测距装置无法启动和波头难以识别的问题,研究弱故障检测算法,根据算法的检测结果制定浮动的启动门槛值和运用灵敏度更高的识别算法。

2) 直流输电线路具备使用反向行波进行故障测距的基本条件,双端法使用的第一个反向行波还没有发生反射,不受反射系数频变的影响。因此,使用反向行波测距是解决双端行波测距中的波头振荡问题的一个思路。

3) 边界上装有串联补偿装置的交流输电线路的测距问题和反射系数频变问题有相似之处,都是存在波头变缓的现象,可以借鉴串补问题的解决方案,如文献^[58]提出的一种利用能量比函数进行串补线路行波标定的方法。

4) 初始电流行波和故障点反射波都可以看作是入射电流行波在输电线路边界上激励产生的。在辨识出较为准确的反射系数时,可以提取入射电流行波,利用入射电流行波测距也可以消除反射系数频变的影响。

5) 固有频率法和故障分析法目前都处于仿真研究阶段,其工程实用性还有待考证,因此这两种方法应该定位在行波测距的辅助算法,可以将其稳定性

优势与行波法的准确性优势相结合,进行组合测距。

5 结语

本文对现阶段直流输电线路故障测距技术的研究状况进行了比较全面的总结,行波测距法较为成熟,但是存在可靠性差、精度有待进一步提高的问题。固有频率法和故障分析法都具有稳定性好、可靠性高的优势,但是死区和准确度的问题影响其发展。因此,建议应该进一步提高行波法的可靠性和测距精度,并将行波法和其他两种测距方法的优势相结合,发展组合测距技术。

参考文献

- [1] 肖东晖,刘沛.架空输电线路故障测距方法综述[J].电力系统自动化,1993,17(8):46-56.
XIAO Donghui, LIU Pei. Survey of fault location problem on overhead transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(8): 46-56.
- [2] LEE H, MOUSA A M. GPS travelling wave fault locator systems: investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1214-1223.
- [3] WEEDY B M. Environmental aspects of route selection for overhead lines in the USA. [J]. Electric Power Systems Research, 1989, 16(3): 217-226.
- [4] 宋国兵,高淑萍,蔡新雷,等.高压直流输电线路继电保护技术综述[J].电力系统自动化,2012,36(22):123-129.
SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.
- [5] 全玉生,杨敏中,王晓蓉,等.高压架空输电线路的故障测距方法[J].电网技术,2000,24(4):27-33.
QUAN Yusheng, YANG Minzhong, WANG Xiaorong, et al. A fault location method for overhead high voltage power transmission lines[J]. Power System Technology, 2000, 24(4): 27-33.
- [6] ROBERTSON D C, CAMPS O I, MAYER J S, et al. Wavelets and electromagnetic power system transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 1050-1058.
- [7] 董新洲,贺家李,葛耀中.小波变换第3讲 二进小波变换及信号的奇异性检测[J].电力系统保护与控制,1999,27(3):65-68.
DONG Xinzhou, HE Jiali, GE Yaozhong. Wavelet transform: Part III dyadic wavelet transform and signal singularity detection[J]. Power System Protection and Control, 1999, 27(3): 65-68.
- [8] 董新洲,葛耀中,徐丙垠.利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J].中国电机工程学报,1999,19(4):76-80.
DONG Xinzhou, GE Yaozhong, XU Bingyin. Research of fault location based on current travelling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 76-80.
- [9] 董新洲,耿中行,葛耀中,等.小波变换应用于电力系统故障信号分析初探[J].中国电机工程学报,1997,17(6):421-424.
DONG Xinzhou, GENG Zhongxing, GE Yaozhong, et al. Application of wavelet transform in power system fault signal analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 421-424.
- [10] 董新洲.小波理论应用于输电线路行波故障测距研究[D].西安:西安交通大学,1996.
- [11] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 38(2): 617-643.
- [12] 吴青华,张东江.形态滤波技术及其在继电保护中的应用[J].电力系统自动化,2003,27(7):45-49.
WU Qinghua, ZHANG Dongjiang. Morphological filtering techniques and applications in protection relaying [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 45-49.
- [13] 张杰.基于数学形态学的故障行波测距方法研究[D].昆明:昆明理工大学,2005.
- [14] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1998, 454(1971): 903-995.
- [15] 张小丽,曾祥君,马洪江,等.基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J].电力系统自动化,2008,32(8):64-68.
ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power grid faults location with traveling wave based on Hilbert-Huang transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 64-68.
- [16] 刘志刚,李文帆,孙婉璐.Hilbert-Huang 变换及其在电力系统中的应用[J].电力自动化设备,2012,32(4):109-116.
LIU Zhigang, LI Wenfan, SUN Wanlu. Hilbert-Huang transform and its applications in power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 109-116.
- [17] 张广斌.实测数据环境下的输电线路行波故障测距关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [18] VITINS M. A correlation method for transmission line protection[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1978, 97(5): 1607-1617.
- [19] CROSSLEY P A, MCLAREN P G. Distance protection based on traveling waves[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1983, 3(9): 30-31.
- [20] PAITHANKAR Y G, SANT M T. A new algorithm for relaying and fault location based on autocorrelation of travelling waves[J]. Electric Power Systems Research, 1985, 8(2): 179-185.
- [21] 葛耀中,董新洲,董杏丽.测距式行波距离保护的研究(一)—理论与实现技术[J].电力系统自动化,2002,26(6):34-40.
GE Yaozhong, DONG Xinzhou, DONG Xingli. Travelling wave based distance protection with fault location: Part one theory and technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 34-40.
- [22] 董杏丽,葛耀中,董新洲,等.基于小波变换的行波测距式距离保护原理的研究[J].电网技术,2001,25(7):9-13.
DONG Xingli, GE Yaozhong, DONG Xinzhou, et al. Wavelet transform based distance protection scheme with travelling wave fault location [J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 9-13.
- [23] 葛耀中.新型继电保护和故障测距的原理与技术[M].西安:西安交通大学出版社,2007.

- [24] 武霁阳, 王钢, 李海峰, 等. 考虑频变特性的直流线路故障行波精确计算方法及应用[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 122-128. DOI: 10.7500/AEPS20151009005.
WU Jiyang, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Accurate traveling wave calculation method for HVDC transmission lines fault considering frequency characteristic and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 122-128. DOI: 10.7500/AEPS20151009005.
- [25] 段建东, 刘静, 陆海龙, 等. 基于行波瞬时频率的高压直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1842-1848.
DUAN Jiandong, LIU Jing, LU Hailong, et al. Fault location method based on traveling-wave instantaneous frequency for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1842-1848.
- [26] 覃剑, 彭莉萍, 王和春. 基于小波变换技术的输电线路单端行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 62-65.
QIN Jian, PENG Liping, WANG Hechun. Single terminal methods of traveling wave fault location in transmission line using wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 62-65.
- [27] 杨建, 唐忠. 高压电缆在线行波故障测距算法的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 48-54.
YANG Jian, TANG Zhong. Design of online travelling wave based fault location algorithm for HV power cable[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 48-54.
- [28] 李明舒. 基于行波色散效应的行波故障测距方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [29] 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(23): 62-65.
XU Bingyin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern fault location techniques based on fault generated travelling waves and their applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62-65.
- [30] 徐湘忆, 盛戈皞, 刘亚东, 等. 输电线路分布式行波检测的故障定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(3): 134-138.
XU Xiangyi, SHENG Gehao, LIU Yadong, et al. Fault location method for transmission line based on distributed traveling wave detection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(3): 134-138.
- [31] 黄志都. 基于分布式行波测距的输电线路故障诊断技术研究与应用[J]. 广西电力, 2013, 36(6): 1-4.
HUANG Zhidu. Research and application of transmission line fault diagnosis technology based on distributed traveling wave location[J]. Guangxi Electric Power, 2013, 36(6): 1-4.
- [32] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 133-137.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Survey of fault location research for HVDV transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 133-137.
- [33] 费烨, 王晓琪, 汪本进, 等. $\pm 1\,000\text{ kV}$ 特高压直流互感器的选型与研制[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2380-2387.
FEI Ye, WANG Xiaoqi, WANG Benjin, et al. Development on $\pm 1\,000\text{ kV}$ UHVDC instrument transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2380-2387.
- [34] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 影响输电线路行波故障测距精度的主要因素分析[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 28-35.
QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui, et al. Analysis on main influencing factors for transmission lines fault location precision based on traveling wave[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 28-35.
- [35] 刘巍, 湛大千. 基于反向行波的故障测距[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5): 62-65.
LIU Wei, ZHAN Daqian. Fault location method based on backward travelling wave[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(5): 62-65.
- [36] 韩昆仑, 蔡泽祥, 贺智, 等. 高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20-25.
HAN Kunlun, CAI Zexiang, HE Zhi, et al. Propagation characteristic of fault traveling wave on HVDC line and its influence on HVDC line traveling wave protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 20-25.
- [37] 李爱民. 高压直流输电线路故障解析与保护研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [38] 电力行业继电保护标准化技术委员会. 输电线路行波故障测距装置技术条件: DT/L 357—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [39] 谢菁, 陈平. 直流输电线路行波故障测距系统[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2006, 20(3): 47-50.
XIE Jing, CHEN Ping. A traveling wave based fault locating system for HVDC transmission lines[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 20(3): 47-50.
- [40] SWIFT G W. The spectra of fault-induced transients[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1979, 98(3): 940-947.
- [41] 邬林勇. 利用故障行波固有频率的单端行波故障测距法[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [42] 林圣, 何正友, 李小鹏, 等. 一种考虑时域特征的单端行波固有频率测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 243-248.
LIN Sheng, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. Single terminal fault location by natural frequencies of travelling wave considering its time-domain characteristics[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 243-248.
- [43] 夏璐璐, 何正友, 李小鹏, 等. 基于行波固有频率和经验模态分解的混合线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 67-73.
XIA Lulu, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. A fault location method based on natural frequencies and empirical mode decomposition for mixed overhead-cable lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 67-73.
- [44] 束洪春, 田鑫萃, 张广斌, 等. $\pm 800\text{ kV}$ 直流输电线路故障定位的单端电压自然频率方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 104-111.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, ZHANG Guangbin, et al. Fault location for $\pm 800\text{ kV}$ HVDC transmission lines using natural frequency of signal terminal voltage data[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 104-111.
- [45] 廖凯, 何正友, 李小鹏. 基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 104-109.
LIAO Kai, HE Zhengyou, LI Xiaopeng. Fault location of

- HVDC transmission line based on the natural frequency of traveling wave [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 104-109.
- [46] 蔡新雷,宋国兵,高淑萍,等.利用电流固有频率的 VSC-HVDC 直流输电线路故障定位[J].中国电机工程学报,2011,31(28): 112-119.
- CAI Xinlei, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. A novel fault-location method for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency of current [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 112-119.
- [47] 李博雅,杨耀,杨立红.高压直流输电线路单端故障测距组合算法[J].电力系统保护与控制,2014,42(3):116-121.
- LI Boya, YANG Yao, YANG Lihong. A combined method of single-ended fault location for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 116-121.
- [48] 宋国兵,周德生,焦在滨,等.一种直流输电线路故障测距新原理[J].电力系统自动化,2007,31(24):57-61.
- SONG Guobing, ZHOU Desheng, JIAO Zaibin, et al. A novel fault location principle for HVDC transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 57-61.
- [49] SUONAN J, GAO S, SONG G, et al. A novel fault-location method for HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1203-1209.
- [50] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等.基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J].中国电机工程学报,2010,30(13):75-80.
- GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A fault location method for HVDC transmission lines on the basis of distributed parameter model [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [51] 李洪波.超高压直流输电线路故障测距原理研究及软件开发[D].天津:天津大学,2009.
- [52] 张烁.高压直流输电系统线路保护、故障重启及故障测距方法的研究[D].天津:天津大学,2014.
- [53] FARSHAD M, SADEH J. A novel fault-location method for HVDC transmission lines based on similarity measure of voltage signals[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2483-2490.
- [54] 康丽红,唐昆明,罗建,等.直流输电线路单极接地双端故障测距[J].电网技术,2014,38(8):2268-2273.
- KANG Lihong, TANG Kunming, LUO Jian, et al. Two-terminal fault location of monopolar earth fault in HVDC transmission line [J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2268-2273.
- [55] LIANG Y, WANG G, LI H. Time-domain fault-location method on HVDC transmission lines under unsynchronized two-end measurement and uncertain line parameters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1-8.
- [56] 邢鲁华.高压直流输电线路保护与故障测距原理研究[D].济南:山东大学,2014.
- [57] 宋国兵,李德坤,靳东晖,等.利用行波电压分布特征的柔性直流输电线路单端故障定位[J].电力系统自动化,2013,37(15): 83-88.
- SONG Guobing, LI Dekun, JIN Donghui, et al. One-terminal fault location for HVDC flexible transmission lines based on wave voltage distribution features[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 83-88.
- [58] 商立群,夏远洋.基于能量比函数的串补线路行波故障测距[J].中国电机工程学报,2015,35(20):5228-5234.
- SHANG Liqun, XIA Yuanyang. Energy ratio function-based traveling wave fault location for series compensated line[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5228-5234.

杨 林(1992—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统故障测距技术。

王 宾(1978—),男,通信作者,副教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护、高阻故障检测及测距技术等。E-mail: binw_ee@mail.tsinghua.edu.cn

董新洲(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护、行波测距、行波选线等。

(编辑 鲁尔姣)

Overview of Fault Location Methods in High Voltage Direct Current Transmission Lines

YANG Lin, WANG Bin, DONG Xinzhou

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

Abstract: High voltage direct current (HVDC) transmission line has a long distance, great differences in terrain, geomorphology, environment and climate. It has high probability of failure and needs high accuracy for fault location. So, the wave equation describing the electrical characteristics of the distributed parameter line is put forward, which is the basis of fault location principle. According to the time, frequency and space, the traveling wave methods, natural frequency methods and fault analysis methods are summarized. It makes clear that the main fault location method in real application should be traveling wave method, and the others assist to improve the reliability of overall fault location. Then, the follow-up ideas and programs to improve several existing problems are also presented, such as pickup in high resistance grounding fault, oscillation of initial wave head, and frequency change of reflection coefficient.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900600), National Natural Science Foundation of China (No. 51477084), and Independent research project of Tsinghua University (No. 2015THZ0).

Key words: high voltage direct current transmission; fault location; traveling wave method; natural frequency method; fault analysis method