

电力系统行波测距方法及其发展

何军娜, 陈剑云, 艾颖梅, 林鹏, 冯秋实

(华东交通大学电气学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 行波测距法具有测距精度高、定位速度快的特点, 目前主要应用在高压输电线路中。首先比较全面地讨论了行波测距算法及研究现状, 根据行波测距算法的原理不同, 将其分为基于单条输电线路的单端法、多端法和基于广域行波信息的网络测距法, 重点对单端法中的反射波识别、双端法中的 GPS 和 IEEE1588 对时、广域网络测距法中的 IEC61850 标准等问题进行了探讨。然后回顾了行波的获取、波头的检测, 波速对测距的影响及消除行波波速的测距算法等关键问题的最新研究进展。在此基础上总结了行波法测距今后急需解决的关键问题。相关研究结果表明, 行波故障测距在电力系统中有广泛的应用前景, 是今后输电线路故障定位领域的重要发展方向。

关键词: 行波定位; IEEE1588; IEC61850; 电子式互感器; 小波分析; Hilbert-Huang 变换; 数学形态学

Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development

HE Jun-na, CHEN Jian-yun, AI Ying-mei, LIN Peng, FENG Qiu-shi

(School of Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Traveling wave fault location has the characteristics of high precision and fast speed position, which is mainly used in high voltage transmission line fault location. Firstly, this paper discusses the development and general situation of the research in this field. According to the different theories of the fault location, it can be generally divided into two parts, one is the single-terminal method or the multi-terminal method in a single transmission line, and the other is the wide-area fault location based on the network. Secondly, it focuses on the problems of reflection wave identification of the single-ended method, the clock synchronization technology based on GPS and IEEE1588 of the double-terminal method, and the wide-area fault location based on IEC61850. Then the latest research progress on the key issues of traveling wave acquisition, wave head detection, influence of wave velocity on the range, and the velocity elimination of traveling wave fault location algorithm are reviewed. Moreover, the future key issues to be solved urgently are also pointed out. It is shown that the traveling wave fault location has good application prospect in power system and will be the important development direction in the field of transmission line fault location.

Key words: traveling wave fault location; IEEE1588; IEC61850; electronic transformer; wavelet analysis; Hilbert-Huang transform; mathematical morphology

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0148-07

0 引言

电力系统中输电线路的准确故障测距可以减轻巡线负担, 缩短故障修复时间, 对于提高电力系统供电可靠性、减少停电损失具有重要意义。

行波法作为一种新的故障测距技术, 与传统的阻抗测距法相比, 具有受系统参数、过渡电阻、系统运行方式和线路负荷影响较小等优点^[1-2], 发展前景很好。行波测距法的基本原理是利用初始行波和故障点反射波到达测量端的时间差, 结合行波波速, 来确定故障距离的。行波法由于其使用范围广、定

位速度快且测距精度高^[3], 故研究和应用越来越广泛。

本文首先理论上对行波故障测距的算法进行分析, 分别对基于单条输电线路的单端法、多端法及基于广域网络信息的测距法进行了介绍, 重点对单端法中的反射波识别、双端法中的 GPS 和 IEEE1588 对时、广域网络测距法中的 IEC61850 标准等问题进行了探讨, 其次针对波速对测距的影响, 回顾了不同的消除行波波速的测距算法, 然后技术上从行波的获取、行波波头的检测等方面对已取得的研究成果进行综述, 最后在此基础上, 指出了未来有待

解决的问题及有价值的研究方向。

1 现代行波测距方法

行波法的故障定位最早是在 20 世纪 40 年代提出的, 现代行波测距法主要有: ①基于单条输电线路的单端法、双端法、三端法^[4-5]; ②基于广域行波信息的网络测距法, 其中单端法包括 A、C、E、F 四种类型, 双端法包括 B、D 两种类型。

1.1 单端测距法

单端测距法利用在线路一端测量到的数据进行测距, 其原理图如图 1 所示, 测距公式^[6]如式(1)、式(2)。

$$x = \frac{1}{2} v_1 \Delta t \quad (1)$$

$$x = \frac{v_1 v_0 (t_{M0} - t_{M1})}{v_1 - v_0} \quad (2)$$

式中: v_1 、 v_0 分别为线模、零模波速; t_{M1} 、 t_{M0} 分别为线模、零模分量到达 M 端的时刻; Δt 为测量端 M 感受到的故障点初始行波与其故障点反射波之间的时间差。

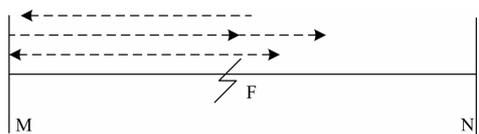


图 1 行波法测距示意图

Fig. 1 Sketch map of traveling wave fault location

根据单端法测距原理研制的定位装置简单, 测距精度高, 但由于母线接线方式和故障类型存在着不确定性, 且随着故障点过渡电阻、故障点位置的不同, 故障点反射波的反射情况就不同, 因此, 单端法的关键在于故障点反射波波头的准确检测。

针对此问题, 文献[7]利用故障点反射波和对端母线反射波两者波形极性相反的关系来进行区别, 但该方法只适用于特定的母线类型, 不具有通用性。文献[8]给出了通过第 2 个反向行波中零模和线模之间的相对极性关系来识别故障点反射波的方法, 但零模分量的出现与故障类型有关, 仅适用于单相接地故障, 且由于零模分量在传播过程中频散现象严重, 利用零模分量的判别法可靠性较低。文献[9]提出一种可以统一识别各种接地故障下第 2 个反射波性质的方法, 且该法不受母线结构、选相结果和过渡电阻的影响。针对利用线模、零模波速的单端测距法, 文献[10]利用神经网络训练学习估算零模波速, 利用线模、零模波速差估算初步故障距离, 以

此初步故障距离从线模行波突变波头中找出故障点反射波, 该法可同时识别出故障点反射波、对端母线反射波和干扰波头, 可靠性较高, 但该方法在实际应用中需要获取大量的故障数据对网络进行训练才有可能得到较好的效果, 而电力线路发生故障的数据不可能很多, 故其应用受到了一定的局限。

以上都是基于理论上的分析, 目前还没有成熟可靠的自动识别方法, 还需要故障后人工分析故障行波来区分, 不利于故障的迅速修复^[11]。单端法除了故障行波的记录分析外, 还需要准确的行波波速。

1.2 双端测距法

双端测距法利用第一个初始行波浪涌到达两端的时间差进行测距, 其测距公式为^[6]

$$D_{MF} = \frac{1}{2} [L + v_1 (t_{M1} - t_{N1})] \quad (3)$$

双端法只需检测故障点初始行波到达两测量端的准确时间即可完成定位, 不需要分析识别反射波, 测距可靠性高。相对于单端法测距, 双端法也存在着行波波速不确定影响定位结果的问题, 同时还有线路长度的影响, 但随着行波定位技术研究的不断深入, 行波波速和线路长度对故障定位的影响越来越小^[12], 目前影响双端法测距的主要因素是线路两端的时钟对时问题。

现代的双端行波故障测距装置大多是采用 GPS 技术来实现线路两端的时钟同步, 利用基于 GPS 的同步时钟输出, 可以使两端装置的时间同步精度达到 1 μ s, 由此产生的测距误差不会超过 150 m, 完全满足故障测距精度的要求。虽然 GPS 是目前应用于行波测距系统中较好的时钟同步单元, 但也存在着 GPS 授时不稳定性缺点, 为此, 文献[13]采用 GPS 高精度时钟的误差修正方法对 GPS 秒脉冲进行在线修正, 通过对秒脉冲间的计数值进行动态平均和秒脉冲的误差估计, 利用高精度晶振对 GPS 秒脉冲进行在线修正, 有效地减小了误差, 保证了输出信号的稳定性。

目前, GPS 技术作为时钟同步单元广泛应用于双端行波测距中, 其相关技术已相当成熟^[14]。而 IEEE1588 作为一种网络对时, 近年来受到国内外有关学者的广泛关注。IEEE1588 同步时钟作为一种网络对时系统, 不仅成本比较低, 而且其同步精度很高, 可达到亚微秒级, 为网络化配置的精确时钟同步提供了一个理想的选择。关于 IEEE1588 在现代行波故障测距中的应用, 文献[15]分析了 IEEE1588 的同步时钟原理, 并构建了基于 IEEE1588 的行波故障测距网络模型, 这些都为基于网络的行波故障测距奠定了基础。

1.3 三端测距法

三端法^[16]是在双端测距原理的基础上提出的一种新型的测距方法。利用检测故障点初始行波到达故障线路本端(M端)、对端(N端)以及相邻线路对端(P端)的绝对时刻 t_M 、 t_N 、 t_P 进行测距的,其线路示意图如图2所示,图中, L_1 为故障线路, L_2 为相邻线路。

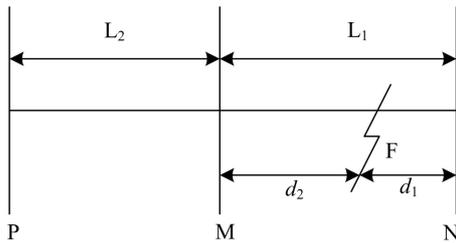


图2 三端法测距示意图

Fig. 2 Sketch map of three-terminal fault location

其测距公式为

$$d_2 = \frac{(t_N - t_M)L_2}{2(t_P - t_N)} + \frac{L_1}{2} \quad (4)$$

该方法只需测量故障初始行波到达三个测量端的绝对时刻,波头突变明显,可达到较高的测距精度,在未来的行波测距算法研究中,三端法具有很大的发展潜力。利用三端法实现准确测距的难点是相邻线路对端母线处波头的检测。

1.4 基于广域网络信息的行波测距算法

基于单条输电线路的单端、双端及多端定位法,当定位装置故障、启动失灵或时间记录错误都将导致定位的失败,定位可靠性得不到保证,且定位装置的时间记录误差也会使定位准确度降低。随着大电网建设及系统间通信技术的发展,基于单条输电线路的故障定位已无法满足电网运行的要求。因此,基于广域网络信息的行波测距成为今后故障定位发展的必然趋势。广域测距原理是采用基于扩展的双端测距原理进行故障定位的,该方法结合了行波传输的各个变电站的数据,比传统的测距方法可靠性更高,且通过优化部署可以减少数据采集装置,从而节省了成本。

1993年,加拿大在B.C.Hydro 500 kV的输电线路的14个变电站安装行波测距装置,建立了全球第一个基于网络的行波测距装置^[17],自此,基于网络的行波定位思想引起人们的广泛关注。文献^[17]提出了适用于不同拓扑电网不同算法处理的网络行波测距方案,基于网络的行波测距系统已在我国株洲电网进行了成功运行,且运行结果的可靠性准确度

都较高。广域网络测距法的难点在于不同制造商生产的行波测距装置间的互操作性的实现,IEC61850标准旨在解决这一问题,为此,文献^[18]提出了基于IEC61850的行波测距装置信息模型,通过分析行波测距系统的数据要求,建立了相应的IED信息模型,实现了不同厂家间行波测距系统的互联互通,目前,基于IEC61850的行波测距装置已安装于新疆电网的220 kV库米什变电站运行,该装置的运行推进了行波测距技术在智能变电站内的应用。文献^[19]提出了基于IEC61850的广域行波测距系统,实现了广域的开放通信以及数据采集设备和主站间的互操作。

2 行波提取及波速的确定

现代行波测距方法中,有效地提取行波是进行行波故障测距的前提,分析行波特性进而确定行波的波速是提高测距精度的关键因素之一。

2.1 行波信号的获取

在采用行波信号进行故障定位时,传统的行波信号的获取是利用电磁式电压或电流互感器,且理论研究表明,电容式电压互感器不能有效地传变高频信号,而常规电流互感器可以有效地传变用于行波测距的暂态行波,故现有的大多数行波测距装置多采用电磁式电流互感器来获取行波信号。

但随着数字化变电站的实施,电磁式互感器已不能满足需求,而电子式互感器作为数字化变电站的基础性设备,其应用成为一种迫切的需求。现有的电子式互感器只能满足测量、保护的功能要求,针对暂态信号传变的电磁式互感器正在研究试验阶段,尚未成熟地应用于行波测距系统中。文献^[20]通过分析IEC61850标准下行波采样值的传输问题,采用分流取样的方法收集电子式互感器采集端的数据,设计了适于行波传变的ECT,并建立了相应的数字化行波测距系统信息模型,使其与其他智能电子设备(IED)之间的互操作和无缝集成成为可能。

2.2 行波特性及波速的确定

暂态行波分量含有从低频到高频的各种频率分量,不同频率的行波分量具有不同的衰减常数和不同的传播速度。三相输电线路发生故障后,产生的行波可分为线模、零模分量,相关研究表明,线模受到线路结构参数影响较零模小,故行波测距中常采用线模分量。

行波在传播的过程中由于出现频散现象,导致波速难以确定,文献^[21]指出波速取决于架空线的结构和大地电阻率的分布。目前常用的波速确定方法^[22]有:采用线路参数计算;使用参考文献提供的波速;实测线路波速;利用线路区外故障在线测量

调整行波波速。文献[23]给出了输电线路中实测的高频分量不同频率范围的波速。

3 消除波速影响的故障测距算法

行波波速由于受线路实际参数的影响, 而这些参数又是随频率变化的, 故波速的准确测定具有一定的难度, 为避免因波速不确定带来的误差, 人们就此提出了不同的消除波速的测距方法。

3.1 单端法

文献[24]提出利用检测行波浪涌前 3 个波头到达测量端的时刻, 再结合故障点发生的位置来进行测距的, 其测距式为

$$x = \frac{(t_2 - t_1)L}{t_3 - 2t_1 + t_2} \quad (5)$$

式中: t_1 、 t_2 含义同上; t_3 为对端母线反射波经故障点透射到本端的时刻。

该方法不受线路弧垂的影响, 理论上计算精度高, 但需要注意的是, 在某些特殊情况下, 可能会发生波形混叠现象, 或有可能难以同时检测到故障点反射波和对端母线反射波, 因此本算法的可靠性不如现有单端测距法, 但可作为现有单端测距法的一种补充。

3.2 双端法及多端法

3.2.1 双端法

(1) 文献[6]采用初始行波线模、零模波速的不同来消除波速的影响, 其测距式为

$$x = \frac{IC}{A - B + 2C} \quad (6)$$

式中, $A = t_{M1} - t_{N1}$, $B = t_{M0} - t_{N0}$, $C = t_{M0} - t_{M1}$, 变量含义同上。

此方法可以消除线路参数不同及雷击时冲击电晕对波速的影响。但因采用了零模分量, 依然存在着零模衰减快和频散的问题, 且同样需要双端数据交换通道和同步对时设备, 实际中很难推广使用。

(2) 文献[25]采用计算故障距离与线路全长之比, 利用杆塔定位的方法找到故障点, 其线路模型如图 3 所示。

图 3 中 t_1 、 t_3 和 t_2 、 t_4 分别为行波从故障点第 1 次、第 2 次到达 M 侧、N 侧母线的时刻。其测距式为

$$\begin{cases} \frac{d}{L} = \frac{t_3 - t_1}{2(t_3 + t_2 - 2t_1)} & \text{当 } t_1 < t_2 \text{ 时} \\ \frac{d}{L} = \frac{2t_1 + t_4 - 3t_2}{2(t_1 + t_4 - 2t_2)} & \text{当 } t_1 > t_2 \text{ 时} \end{cases} \quad (7)$$

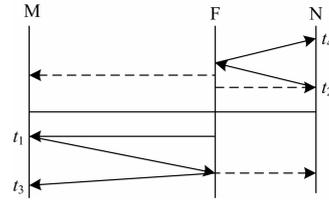


图 3 行波折反射示意图

Fig. 3 Sketch map for refraction and reflection

该方法不需考虑故障线路的实际长度, 测距精度不受实际线路长度变化和设定波速误差的影响, 具有很高的实用性。

3.2.2 多端法

以上提出的不受波速影响的单端、双端测距算法, 在实际应用中, 有时行波发生 2 次折反射后就基本衰减至不可测量, 很难检测到对端母线反射波或故障点反射波, 针对此问题, 文献[16]提出一种基于三端行波测量数据的测距新方法, 有关三端法的理论分析已在现代行波测距算法中进行论述。

4 故障行波波头到达时刻的标定

行波测距需要相应的信号检测算法, 以用来标定行波波头的到达时刻, 国内外学者广泛采用的波头检测方法有小波变换、希尔伯特-黄变换、数学形态学。

4.1 小波分析法

行波测距中用小波变换模极大值与信号突变点相对应的方法来检测波头。文献[23]提出利用小波变换模极大值检测原理标定行波波头来进行测距的方案。需注意的是, 小波分析结果受小波基的种类、采样率及分解尺度等因素的影响, 因此, 选择合适的小波基函数和分解尺度是使用小波变换成功的关键。文献[26]指出故障测距中一般选择对称小波, 文献[27]对定位中的小波基选择和尺度问题进行了研究。

小波变换虽然是多分辨率分析, 但不具有自适应性, 且一旦小波基函数和分解尺度确定, 其分析效果就会固定不变。

4.2 Hilbert-Huang 变换法

HHT 变换是一种很好的自适应分析方法, 它由经验模态分解 (EMD) 和 Hilbert 变换两部分组成, 行波测距中通过检测第一个 IMF 希尔伯特变换后的瞬时频率突变点来确定波头的到达时刻。文献[28-29]提出采用 HHT 变换对故障行波信号进行检测。

HHT 方法虽然克服了小波变换中小波基选取

困难的不足,但本身存在负频率、端点效应等问题,这都将影响波头检测的准确度。为克服 HHT 方法的不足,文献[30]提出了一种新的自适应时频分析方法—局域均值分解法(LMD)。文献[31]首次提出将 LMD 时频分析算法用于行波故障测距中,且结果表明,该方法同基于小波变换或希尔伯特-黄变换的定位方法相比具有较高的定位精度。

4.3 数学形态学法

行波测距提取的行波信号往往含有大量的噪声干扰,这给信号的检测带来了一定的困难。因此,能否有效滤除所提取暂态信号中的噪声干扰,保留所需的主要特征,将直接影响着行波测距的精度,而基于数学形态学的形态滤波器以其优良的滤波性能,不仅能够有效地滤除噪声,且能够很好地抑制行波波形的畸变。文献[32]指出利用数学形态学分析电力系统暂态信号具有幅值不衰减、相位不偏移且计算简单等优势。文献[33]采用将形态学与 Hilbert-Huang 变换(HHT)相结合的方法检测行波波头,该法可以精确到采样点。近年来,将形态学与小波变换、HHT、相关法相结合来进行行波波头的检测,成为人们的研究热点。

5 总结及展望

行波测距作为一种新的定位技术和方法,由于其原理简单,测距精度高,一直成为近年来的研究热点。本文先总结了现代行波测距方法:单端法、多端法和基于网络信息的广域测距法,然后分别对行波信号的获取,行波特性及波速的确定,消除波速影响的故障测距算法及故障行波波头到达时刻的标定(小波分析法, Hilbert-Huang 变换法,数学形态学法)等进行了综述。

纵观现代行波测距方法,仍然存在以下问题尚待解决:反射波的自动识别问题;基于 IEEE1588 对时的行波测距装置的研究;用于行波传变的电子式互感器的成熟研制;波速确定的精确性与测距误差之间的有效控制;不同波头检测方法的相互配合与行波测距的有效结合等问题。未来行波测距法研究空间较大的方向有:研究自动识别故障行波波形进行故障定位的算法;研制有效获取行波暂态信号电子式互感器;研制基于 IEC61850 标准采用 1588 对时的行波测距装置;基于如何针对不同的线路及故障类型选择小波类型分析可得到最好的效果;小波分析、HHT、数学形态学结合多种智能算法(如神经网络、支持向量机等)混合的综合电力系统故障测距方法的研究;新的基于行波理论测距算法的研究及行波和相关新技术的应用结合等。

参考文献

- [1] 王奎鑫, 祝成, 孙佳佳, 等. 输电线路组合行波测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 82-88.
WANG Kui-xin, ZHU Cheng, SUN Jia-jia, et al. Research of combined traveling wave's fault location method on transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 82-88.
- [2] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 172-178.
JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 172-178.
- [3] 梁睿, 靳征, 刘建华. 基于故障特征频率的单端行波测距新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 7-13.
LIANG Rui, JIN Zheng, LIU Jian-hua. A new method of single terminal traveling wave fault location based on fault characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 7-13.
- [4] 陈平. 输电线路现代行波故障测距及其应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
CHEN Ping. Modern traveling wave based fault location of transmission lines and its applications[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [5] 季涛. 中性点非有效接地系统行波故障测距技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
JI Tao. Neutral non-effectively grounded system traveling wave fault location techniques[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008.
- [6] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, 27(7): 36-39.
LI You-jun, WANG Jun-sheng, ZHENG Yu-ping, et al. Comparison of several algorithms of traveling wave based fault location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 27(7): 36-39.
- [7] 徐伟宗, 唐昆明. 基于导数法的故障行波波头识别改进算法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 198-202.
XU Wei-zong, TANG Kun-ming. An improving derivation algorithm to recognize wave heads of fault generated traveling waves[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 198-202.
- [8] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障下第 2 个反向行波识别的新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 41-44, 59.

- SHI Shen-xing, DONG Xin-zhou, ZHOU Shuang-xi. New principle to identify the second reverse traveling wave generated by single-phase-to-ground fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 41-44, 59.
- [9] 高效海, 何奔腾, 王慧芳, 等. 行波距离保护中识别第 2 个反射波性质的新方法[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1477-1482.
- GAO Xiao-hai, HE Ben-teng, WANG Hui-fang, et al. A new scheme to identify the nature of the second reflection wave in travelling wave based distance protection[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1477-1482.
- [10] 梁睿, 孙式想. 单端行波故障测距的组合方法研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 699-706.
- LIANG Rui, SUN Shi-xiang. A combined method for single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 699-706.
- [11] 位韶康, 陈平, 姜映辉. 一种不受波速影响的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 76-81.
- WEI Shao-kang, CHEN Ping, JIANG Ying-hui. Study of fault location on single terminal traveling waves avoiding wave speed influence[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 76-81.
- [12] 李泽文, 姚建刚, 曾祥君, 等. 基于整个输电网的电压行波故障定位算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 66-69.
- LI Ze-wen, YAO Jian-gang, ZENG Xiang-jun, et al. Study on voltage traveling wave based fault location for transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 66-69.
- [13] 李泽文, 曾祥君, 黄智伟, 等. 基于高精度晶振的 GPS 秒时钟误差在线修正方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 55-58.
- LI Ze-wen, ZENG Xiang-jun, HUANG Zhi-wei, et al. Method for correcting errors of GPS-clock based on high accurate crystal oscillator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 55-58.
- [14] 赵上林, 胡敏强, 窦晓波. 基于 IEEE 1588 的数字化变电站时钟同步技术的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 97-102.
- ZHAO Shang-lin, HU Min-qiang, DOU Xiao-bo. Research of time synchronization in digital substation based on IEEE 1588[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 97-102.
- [15] LI Rui-feng, ZENG Xiang-jun, LIU Hui, et al. The application of precision clock synchronization technology based on PTP (IEEE1588) in traveling wave fault location system[C] // The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2011, 5: 1631-1635.
- [16] 郭安明, 钟俊, 王永洪, 等. 基于复小波的输电线路行波三端测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 100-104, 111.
- GUO An-ming, ZHONG Jun, WANG Yong-hong, et al. A location algorithm for three-terminal travelling wave of transmission lines based on complex wavelet[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 100-104, 111.
- [17] 邓丰, 曾祥君, 陈楠, 等. 自适应网络结构的故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 66-70.
- DENG Feng, ZENG Xiang-jun, CHEN Nan, et al. A network adapted traveling wave fault location method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 66-70.
- [18] 陈羽, 刘东, 徐丙垠. 基于 IEC 61850 的行波测距装置建模[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 86-90.
- CHEN Yu, LIU Dong, XU Bing-yin. A travelling wave fault location device modeling based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 86-89.
- [19] CHEN Yu, DONG Liu, XU Bing-yin. Wide-area traveling wave fault location system based on IEC61850[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(2): 1207-1214.
- [20] 董义华. 基于电子式互感器的智能行波测距系统[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- DONG Yi-hua. Smart traveling wave fault location system based on electronic transformer[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [21] 邓军波, 施围. 输电线路接地故障行波测距新方法[J]. 继电器, 2000, 28(8): 16-18.
- DENG Jun-bo, SHI Wei. A new technique of earth fault location[J]. Relay, 2000, 28(8): 16-18.
- [22] 黄雄, 王志华, 尹项根, 等. 高压输电线路行波测距的行波波速确定方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 34-37.
- HUANG Xiong, WANG Zhi-hua, YIN Xiang-gen, et al. Traveling wave velocity measurement in fault location based on traveling wave for high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 34-37.
- [23] 马丹丹, 王小茹. 基于小波模极大值的单端行波故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 55-59.
- MA Dan-dan, WANG Xiao-ru. Single terminal methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 55-59.
- [24] 蒋涛, 陆于平. 不受波速影响的输电线路单端行波故

- 障测距研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 29-32.
JIANG Tao, LU Yu-ping. Study of fault locating based on single terminal traveling waves avoiding wave speed influence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 29-32.
- [25] 郑州, 吕艳萍, 王杰, 等. 基于小波变换的双端行波测距新方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 203-207.
ZHENG Zhou, LÜ Yan-ping, WANG Jie, et al. A new two-terminal traveling wave fault location method based on wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 203-207.
- [26] 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, 76.
HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. Mother wavelet option method in the transient signal analysis of electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 45-48, 76.
- [27] 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, 86.
TAN Jian, PENG Li-ping, WANG He-chun. 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, 86.
- [28] 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 Xiao-li, ZENG Xiang-jun, MA Hong-jiang, 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.
- [29] 李伟, 王倩, 杜延辉. 基于数学形态学暂态特征提取的分布式母线保护[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 11-14.
LI Wei, WANG Qian, DU Yan-hui. Extraction of transient character based on the mathematical morphology for distributed bus protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 11-14.
- [30] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005, 2(5): 443-454.
- [31] 朱永利, 范新桥, 尹金良. 基于三点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 260-268.
ZHU Yong-li, FAN Xin-qiao, YIN Jin-liang. A new fault location scheme for transmission lines based on traveling waves of three measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 260-268.
- [32] 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.
ZHANG Jie. Study on fault location method based on mathematical morphology[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005.
- [33] 蔡秀雯, 谭伟璞, 杨以涵. 基于数学形态学的配电网单端行波故障测距[J]. 现代电力, 2006, 23(6): 25-29.
CAI Xiu-wen, TAN Wei-pu, YANG Yi-han. Single-terminal traveling wave fault location for distribution network based on mathematics morphology theory[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(6): 25-29.

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2014-05-19

作者简介:

何军娜(1987-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统行波故障测距研究; E-mail: 993614887@qq.com

陈剑云(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统监控及自动化研究。