

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.011

文章编号:1672-9331(2022)03-0104-18

引用格式:李泽文,曾祥君,夏翊翔,等.高压交流输电线路故障行波定位技术综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):104-121.

Citation:LI Zewen,ZENG Xiangjun,XIA Yixiang,et al. Review of traveling wave fault location technology for high voltage AC transmission lines[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022,19(3):104-121.

高压交流输电线路故障行波定位技术综述

李泽文,曾祥君,夏翊翔,王帅,席燕辉

(长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:行波定位技术可根据系统高压交流输电线路发生故障时采集到的时间信息进行快速、准确地故障定位,由于其定位精度高,因而受到广泛的关注。首先,分别从行波信号的精确检测、高精度同步时钟技术、故障定位算法以及工程实践等方面介绍了国内外行波定位技术的发展历程;然后,介绍了单端行波定位、双端行波定位以及网络行波定位方法的工作原理及各自的优缺点,分析了传统行波定位研究尚存的主要技术问题,并提出了相应的解决思路;最后,对行波定位技术的发展前景进行展望,以为后续的研究提供参考。

关键词:输电网;故障定位;行波;高精度检测;同步时钟

中图分类号: TM77

文献标志码: A

0 引言

随着电网规模的不断扩大和电网结构的日益复杂,用户对供电质量的要求不断提高,进而促进了电力系统的快速发展。传统的故障定位方法已经不能满足电力系统在新时代的要求,因此,研究快速、准确、可靠的电网故障定位方法具有重要的研究意义和广泛的应用前景。

快速、可靠地切除故障线路,迅速、准确地定位故障点位置并及时修复线路,对整个电力系统,尤其是对智能电网和能源互联网的安全稳定与经济运行都有着非常重要的意义。

近年来,随着各种智能算法的相继使用,出现了一些智能类处理方法,如卡尔曼滤波技术、神经网络技术和光纤技术等,国内外学者们将这些信号处理技术应用在故障定位领域中。

与传统故障定位方法相比,基于故障暂态分

量的行波定位方法具有精度高、不易受系统运行方式、过渡电阻、电流互感器(current transformer,CT)饱和及线路分布电容的影响等优势,一直是国内外研究的热点。

高压输电线路的电压等级高,故障测量信息特征明显且容易辨识,因而基于行波技术的故障定位方法的研究已能够在实际工程中得以应用;中低压配电线路距离短,电压等级低,故障特征难以被发现且易受噪声干扰,受时钟同步技术的影响大,因而难以将高压线路的行波定位技术直接应用到中低压配电系统中。

本研究回顾了高压输电线路行波定位技术在国内外的发展进程,从行波信号的高精度检测、高精度同步时钟技术、行波定位算法和工程实践这几个方面介绍了国内外的研究现状;接着阐述了单端行波定位、双端行波定位以及网络行波定位方法的工作原理及特点,梳理分析了现有行波定位技术研究中亟须解决的关键问题,为今后的研

收稿日期:2022-07-22;修回日期:2022-08-11;接受日期:2022-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877012)

通信作者:李泽文(1975—)(ORCID:0000-0002-5734-4002),男,教授,主要从事电网故障行波定位与保护的理论与技术、电力系统能量流精确检测的理论与技术方面的研究。E-mail:lzw0917@163.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

究工作提出研究思路,以利于电网故障行波定位技术今后的发展,提高电网的安全可靠性。

1 行波定位发展进程和研究现状

1.1 行波定位发展进程

传统故障测距技术大多基于工频电气量,而阻抗法是其中广泛应用的方法。阻抗法用发生故障时测量到的电压、电流计算出故障回路阻抗来估算故障距离,该方法以线路集中参数模型为基础,测距精度受故障点过渡电阻、对侧系统运行阻抗、负荷电流等因素的影响,因此误差相对较大,测距精度无法得到保障。随着高速数据采集技术和电磁暂态理论等的发展,基于行波理论的故障测距技术逐渐发展起来。行波故障测距技术的出现极大地推动了故障定位技术的发展。目前,在理论上行波故障测距技术在各类测距方式中具有最高的测距精度。

故障行波定位技术最早应用于交流线路中。国内董新洲等^[1]利用 GPS 进行行波故障测距研究,研制出了行波故障测距装置 XC-11,并于 1996 年成功投入试运行。曾祥君等^[2]在此基础上提出了基于整个输电网的 GPS 行波故障定位系统,该系统可以测量故障行波波头到达各个变电站的准确时刻,并由调度进行故障定位,大大提高了行波定位技术的准确性与可靠性。根据故障行波的波形特征,国外 HOLBECK^[3]提出了一种根据故障电流判断故障距离的定位方法,但是该方法只能用于接地故障的定位;DUPOIS 等^[4]对示波器获得的电压、电流波形进行分析并将其应用于故障定位中;NOVOSEL 等^[5]提出了一种无须信息同步的双端故障定位方法;STEVENS 等^[6]将故障涌流应用于输电线路故障距离的确定上。SPAULDING 等^[7]利用 C 型故障定位仪进行故障定位,并分析了雷击等特殊情况;LEWIS^[8]首次阐述了故障行波定位原理,运用数学方法得出了行波传输理论的数学模型,并分别介绍了 A、B、C 型行波定位装置的原理。此后,故障行波定位方法得到了长足的发展,SANT 等^[9]首先提出了故障分析方法,该方法利用单端工频电气量进行故障定位;CROSSLEY 等^[10]将行波信号的相关系数应

用于行波波头的检测中。

我国也有许多专家学者致力于故障定位技术和方法的研究。蔡德礼^[11]提出了一种基于迭加原理的故障电流分量相位修正阻抗法,该方法不受过渡电阻以及故障负荷电流的影响;杨奇逊等^[12]将解微分方程法的故障分析法应用于输电线路的距离保护中;王绪昭等^[13-14]提出了一种适用于相邻线路接地故障的微机测距算法,同时考虑故障前的负荷变化、故障电阻、电弧电阻和零序电流分布系数对故障定位的影响,提出了适用于线路两端装设微机测距仪的高阻接地故障定位算法;于九祥等^[15]将卡尔曼滤波技术应用于距离保护中,该方法对线路所采用的模型参数的准确性要求不高,在收敛速度与滤波精度方面都有较大的提高,且故障点位置的确定可在 20 ms 内完成。对于行波法,黄焕焜^[16]首次提出了行波导数法,当故障发生在输电线路末端时,该方法可以有效区分反射行波与折射行波,进而快速确定故障点位置。葛耀中等^[17]利用故障行波进行故障定位,并研制出了定位装置。随着全球定位系统(global positioning system,GPS)的发展,曾祥君等^[18-19]研制出了装有高精度时钟和存储设备的行波波头记录仪。安装在变电站的记录仪与调度通信一起构成了基于 GPS 的故障行波定位系统。近年来,随着信号处理技术的发展,国内外许多专家学者将短时傅里叶变换、小波变换、Hilbert-Huang 变换等方法应用于行波波头的检测与标定中,使行波法得到了进一步发展,同时也提高了行波法的定位精度。

1.2 行波定位主要研究方向的现状

超、特高压输电线路故障定位的研究经历了数年的发展,现代行波保护定位技术是在大量理论研究的基础上发展起来的。实现行波高精度定位的关键在于:1) 精准地检测行波波形,从而精准标定行波到达时刻;2) 消除不同变电站之间时间不同步对行波定位算法的影响。鉴于此,本研究主要从行波信号的高精度检测方法、高精度同步时钟技术、故障行波定位算法、行波定位装置 4 个方面论述行波定位的研究历程与技术现状。

1.2.1 行波信号的高精度检测方法发展历程

行波信号频带宽、覆盖范围广,所以获取线路

末端的暂态电流和电压分量是实现故障行波检测的基础。

电流互感器具有良好的暂态电流行波信号传输能力,能传输 1 MHz 以下的信号,能满足故障行波定位的要求,所以大多采用电流行波进行故障定位,并利用小波分析方法直接从电流互感器二次侧提取电流波头突变信号,但是该方法需要能够存储大数据的高速数据采集系统和能够进行复杂运算的高性能计算机系统。宋璇坤等^[20]提出采用光学电流互感器作为测量电流互感器以提高测量精度,但由于现有光学技术和光学材料发展的不完善,使得光学传感器的鲁棒性不强;杨汾艳等^[21]针对电磁式电流互感器的暂态响应特性进行研究,结果表明在检测电流行波信号时,电磁式电流互感器可以有效传变 10 kHz 以上的暂态分量,并可将其应用于故障测距中。然而,电流互感器固有特性导致的行波信号畸变,以及线路结构等对电流检测装置的制约都极大地影响着故障行波定位的精度。而电子式电流互感器具有体积小、质量轻、传输频带范围宽等特点,但是在实际应用中,将电子式电流互感器安装到输电线路具有一定的困难^[22]。

传统的电容式电压互感器难以传输高频暂态电压行波信号,不能满足行波定位要求。西南交通大学何正友教授团队研究了电磁式电压传感器,通过对其暂态信号的分析及行波信号传输特点的研究,将电压式传感器运用在了故障测距上^[23]。也有学者研究发现,电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)、套管等设备的接地线所产生的入地电流的突变信号可以很好地反映测量线路上电压的突变特性,并据此研制了专用电压行波传感器。但由于需要专用的电压行波传感器,成本问题还是难以解决。此外,对于电压行波的精确检测以及行波波头的提取问题,仍需进一步解决^[24]。

1.2.2 高精度同步时钟技术发展历程

自 1996 年以来,卫星时钟同步技术在我国电力行业的推广应用为我国电力系统提供了更为精准的时钟同步信号。而 GPS 可以获取较低误差的时间脉冲,通常被用作双端行波定位的时间同步单元。然而,民用 GPS 时钟不能满足我国电力

系统的可靠性要求,同时卫星同步时钟本身存在着较大的随机误差,如与信号传输路径有关的对流层延时误差等,会导致对时失效等问题,这使得 GPS 同步时钟的精度和可靠性都难以得到保障,故而难以在变电站综合自动化等领域实际应用。

近年来,我国自主研制了北斗卫星导航系统,从而完全消除了对 GPS 的依赖,大大提高了我国电网的整体安全性。北斗卫星导航系统在我国各领域都有成功的应用实例,然而由于我国尚未出台明确的北斗系统民用授时应用产业扶持计划,导致北斗授时接收机的成本比成熟的 GPS 授时接收机的高,但可靠性却不太高。因此,如果不解决时钟信号误差大、稳定性差的问题,这些技术很难在像电网这样的对安全、稳定运行要求高的重要领域得到广泛应用。

为解决时钟信号误差大和稳定性差的问题,国内外提出了许多解决方案以消除传输路径上的误差和补偿接收端的误差。传输路径上的误差主要是由大气折射引起的传播路径延迟导致的,可以通过建立近似模型和使用滤波算法来消除。虽然输电网络中各节点时间同步的精度已经达到纳秒级别,但是网络时钟的时延误差和时钟振荡器误差不可忽略^[25]。

为解决卫星授时过程中的误差修正问题,李泽文等^[26]采用高精度晶振对 GPS 秒时钟进行在线监测和校正,并研制了可实现的发生装置,但未考虑晶振的频率偏移,因而误差消除能力有限;蒋陆萍等^[27]通过数字锁相原理,利用 GPS 秒时钟修正晶振秒时钟,并设计了有效的实现方案,但该方案无法满足时间精度要求较高的应用,且其同步对时还需要额外接线,增加了成本,降低了可靠性;赵廷等^[28]提出了一种“天地互备”广域同步网建设方案,有效解决了广域范围内时间同步的问题,实现了广域同步网络的资源优化配置和同步链路的合理组织;李泽文等^[29]用偏最小二乘回归法建立了卫星时钟和晶振时钟的偏差模型,对晶振时钟的累计误差进行实时主动补偿,继而生成了高精度同步时钟。现有的同步时钟装置设计方案在精度上已达到了较高的水平,不仅在正常情况下能保证授时的精度,在非正常情况下也能确保授时的准确性。

1.2.3 故障行波定位算法发展历程

20 世纪 90 年代以来,随着硬件技术以及数字信号处理技术的发展,现代故障行波定位在暂态信号传变、高速采集、时间同步等方面的技术实现已经变得非常容易,这使得行波定位技术广泛应用于电力生产实际中。西安交通大学葛耀中教授团队、中国电科院覃剑博士团队等对输电线路故障暂态行波的产生机制和传播特性进行了深入研究,为行波定位技术的应用打下了坚实的理论基础^[30-31]。大量学者和专家开始将智能分析方法引入故障行波定位领域的理论研究中,如小波变换、Hilbert-Huang 变换、数学形态学和人工神经网络等,用其确定行波的到达时刻。VALSAN 等^[32]提出了一种基于小波变换低通信要求的保护方案,该方案可利用两端的故障相电流信息对故障进行定位,不需要对两个终端的数据进行同步测量;WANG 等^[33]提出了一种基于 Hilbert-Huang 变换的电网换相换流器—模块化多电平换流器—多端直流输电(line commutated converter-modular multilevel converter-multi terminal direct current,LCC-MMC-MTDC)混合传输系统故障行波定位算法,该算法可通过 GPS 技术实现数据同步以提高故障定位精度;吴杰等^[34]采用数学形态学算法提取输电线路故障行波信息,该方法适用于单端故障行波测距的情况,可避免噪声等的干扰;蒲婷婷等^[35]利用优化小波神经网络实现了单端行波测距。上述大部分智能算法仍处于理论和仿真阶段,只有小波变换和神经网络在交直流输电工程中得到了应用。

1.2.4 行波定位装置发展历程

20 世纪 90 年代以来,随着硬件技术以及数字信号处理技术的进步,现代故障行波定位技术在高速采集、高精度同步时钟和远程通信等方面得到了不断发展,并已进入实用阶段。目前,国内外已经开发了大量的故障测距装置和行波测距装置系统,并投入了实际运行,取得了良好的故障测距效果和巨大的经济效益。传统故障行波定位方法按其工作原理可以分为 A、B、C、D、E、F 6 种不同类型。

1992 年,英国哈德威仪器公司研制出了基于电流暂态分量的现代故障行波定位装置,该装置

具有 A、D、E 型行波故障测距功能,可以将故障测距误差控制在 300 m 以内;1993 年,加拿大的不列颠哥伦比亚水电公司研制出了 D 型现代故障行波定位系统,该系统需在 500 kV 输电网中的多台变电站安装行波波头采集装置,能准确检测线路上的各种故障,故障定位误差在 300 m 以内,但 CVT 地线上串联的行波传感器在安装时会对系统运行造成一定影响。

我国一些研究单位研制的行波定位装置也已经逐步进入实用化阶段。山东科汇电力自动化股份有限公司分别在 1995 年和 2000 年研制出了 XC-11 型输电线路故障行波测距装置和 XC-2000 型故障行波测距系统。后者具备 A、D、E 型行波测距功能,并在全国各电压等级的输电线路进行了试运行。实际运行结果表明,在交流输电网中故障定位误差在 200 m 以内,直流输电线路的故障定位误差在 1 km 以内。2002 年,中国电力科学研究院研制出了 WFL2010 故障行波定位系统并投入运行,该系统基于 D 型故障行波定位原理,利用模量分析方法分析处理故障初始行波波头,实现了输电线路的精准故障定位,其故障定位误差在 500 m 以内,同时,该系统直接引入线路的三相 CT 的二次电流信号,不需要附加专门的交流电压耦合设备来获取电压行波信号。长沙理工大学李泽文团队研制了广域电网故障行波定位系统^[36],开发了专用的电压行波传感器,并基于 N-1 原则优化配置故障行波采集装置,开发了基于多端时差的广域故障行波定位系统,在河南、湖南、广东等多个省份的不同电压等级输电网试运行,运行结果显示,故障定位误差在 300 m 以内。

经过数年的研究和探讨,故障行波定位技术已成功应用于输电网中,特别是单一架空线路的输电网,同时也成功应用于架空线—电缆混联线路和含分布式电源的配电系统中。行波定位系统的推广应用为行波保护技术的实用化奠定了坚实的基础,但是行波定位技术仍然存在定位不可靠、定位误差较大等问题,需要对其展开更深入的分析 and 研究。

2 行波定位主要方法概述

当输电线路发生故障时,由故障点产生的行

波以接近光传播的速度传向整个电力系统。在传输过程中,在母线、设备等阻抗不连续的地方行波发生反射和折射,此时可根据行波传输的时间计算故障距离。行波法是根据行波理论实现故障定位的方法。故障行波定位方法按其工作原理可分为:传统行波定位法和网络行波定位法。其中,传统行波定位法的 A、B、C、D、E、F 6 种类型按照定位原理又可分为单端行波定位法和双端行波定位法,它们都是从时域角度进行行波定位的,除此之外,还存在从频域以及时频域角度进行行波定位的方法。

2.1 单端行波定位方法

单端行波定位方法是根据单端检测的初始行波波头和故障点反射波头到达测量点的时间差来定位故障点的,其中 A、C、E、F 这 4 种类型的行波定位法都属于单端行波定位法。

2.1.1 A 型行波定位法

A 型行波定位法可利用发生故障时产生的暂态行波来定位故障点。下面以图 1 为例,说明 A 型行波定位法的原理。

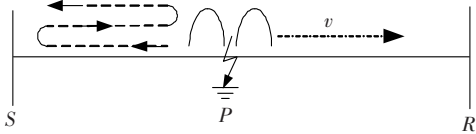


图 1 A 型行波定位法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of A-type traveling wave location method

图 1 中,当线路上的 P 点发生故障时,线路上会产生暂态行波并向两端传输。这些行波会在波阻抗不连续处和故障点处发生多次折射和反射。假设变电站 S(R 也为变电站)为测量点,行波的传播速度为 v ,故障点 P 到 S 的距离为 Z ,行波第一次由 P 传播到 S 的时刻为 t_1 ,行波在 S 点发生反射后,再次在 S 点检测到该行波的时刻为 t_2 ,则 Z 可表示为:

$$Z = \frac{1}{2}v(t_2 - t_1) \tag{1}$$

2.1.2 C 型行波定位法

C 型行波定位法通过发射脉冲进行定位。当线路发生故障时,测距装置会向线路发送脉冲并开始计时。在脉冲传输到故障点时会因波阻抗不

相等而发生反射,当测距装置再次检测到该脉冲时则停止计时。故障点的位置可通过光速和两次测到同一脉冲的时间差计算得到,其原理如图 2 所示(图中 M、N 表示变电站)。

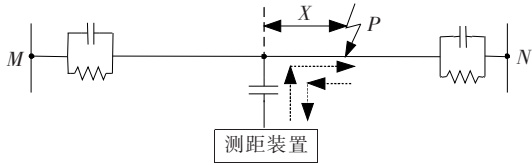


图 2 C 型行波定位法原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of C-type traveling wave location method

假设脉冲在线路上的传播速度为 v ,故障点 P 与测距装置的距离为 X ,测距装置第一次检测到行波的到达时刻为 t_3 ,第二次检测到行波的到达时刻为 t_4 ,则 X 可表示为:

$$X = \frac{1}{2}v(t_4 - t_3) \tag{2}$$

C 型行波定位法的原理简单易懂,无须电压、电流互感器,可以节省成本。但是该方法需要脉冲源,且受干扰的影响严重,故一般适用于永久性故障的离线检测。

2.1.3 E 型行波定位法

E 型行波定位法通过线路上的断路器重新合闸所产生的行波浪涌来对故障点产生的暂态行波进行测量。该方法可以根据检测装置检测到的行波浪涌来回两次的时间差和行波的波速测得故障点的位置,其原理如图 3 所示。

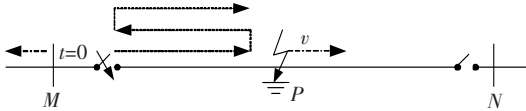


图 3 断路器重新合闸的行波传输路径

Fig. 3 The traveling wave transmission path of circuit breaker reclosing

假设行波浪涌在线路上的传播速度为 v ,故障点 P 距离测距装置的距离为 Y ,第一次合闸瞬间检测到行波浪涌的时刻为 t_5 ,第二次合闸瞬间检测到行波浪涌的时刻为 t_6 ,则 Y 可表示为:

$$Y = \frac{1}{2}v(t_6 - t_5) \tag{3}$$

E 型行波定位法适用于装有重合闸的输电线路,同时要求测量点测得的第一个正向行波浪涌

必须是断路器合闸产生的初始行波浪涌。

2.1.4 F 型行波定位法

F 型行波定位法的基本原理与 E 型的相同,区别在于它们使用的暂态行波不同,前者使用的是故障线路重合闸装置合闸产生的行波,后者使用的是故障线路断路器触头跳闸产生的行波。值得注意的是,E、F 型行波定位法难以区分故障点的反射行波和对端断路器跳闸产生的初始行波浪涌透射波,从而容易导致定位误判,降低定位的可靠性。

单端行波定位方法的优点是设备成本低、故障定位受线路长度的影响较小、实时性较高,但该方法在原理上存在缺陷,同时对检测到的初始行波和反射行波的准确度要求较高,且行波波头的极性受母线结构的影响。因此,依靠单一模量行波波头可靠识别第二个反向行波是一个尚未解决的难题。

SALAT 等^[37]提出了一种输电线路单端行波测距的新算法,该算法通过检测各个行波的到达时刻,利用 3 或 4 个行波波头的时序关系直接计算故障点距离,避免了行波波速的影响,但该方法依赖于多个行波波头的准确检测。邓丰等^[38]基于波形唯一性理论获取单端时频全波形信息,通过建立故障行波时频谱矩阵,利用波形特征匹配技术对输电线路进行可靠保护与故障定位,该方法克服了对波头检测的依赖,但现场的实用化还需要进一步的研究。DENG 等^[39]从行波在输电系统中的传播规律角度深入研究了故障信号的时频特征,但算法复杂度较高,不利于故障定位和行波保护的快速动作。束洪春等^[40]根据行波突变点与故障点之间的位置关系以及时间和长度约束条件,辨识出反映故障位置和对偶位置的行波突变点,进而得到故障距离,但是该方法需要检测故障点的反射波以及对端母线的反射波,当面对混合线路中复杂的行波折射、反射情况时,通常难以有效区分出故障点的反射波、对端母线反射波以及连接点的反射波。HUAI 等^[41]提出了一种基于变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 算法的单端故障定位方法,并提出了一种新的参数优化方案,有效地提取了微弱信号中的故障特征,该方法可进一步推广应用于电力系统的保护中,但是实际工程中潜在的环境因素、测量误差,以

及不准确的线路参数使该故障定位方法的精度显著降低。因此,如何控制由线路参数的不确定性引起的行波测距误差是未来重要的研究方向。

2.2 双端行波定位方法

双端行波定位方法是通过初始行波波头到达两端检测点的时间差来实现故障定位的。其中,B、D 这两种类型的行波定位法都属于双端行波定位法。

2.2.1 B 型行波定位法

B 型行波定位法是通过两端检测点的行波时间差来实现故障定位的,其原理如图 4 所示。

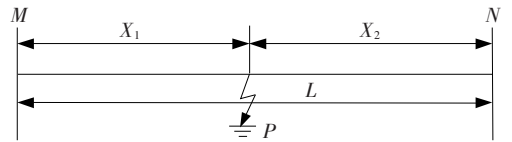


图 4 B 型行波定位法原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the principle of B-type traveling wave location method

在线路发生故障后,检测装置分别在母线 M、N 两端检测行波信号的到达时刻。故障点到母线 M 的距离为:

$$X_1 = \frac{L + v(t_7 - t_8)}{2} \quad (4)$$

式中: X_1 为故障点 P 到变电站 M 的距离; X_2 为故障点 P 到变电站 N 的距离; t_7 、 t_8 为行波从故障点 P 到变电站 M、N 的传输时间; v 为行波的传播速度; L 为线路 MN 的总长度。

B 型行波定位法只需要检测首个电压行波信号,不需要考虑反射问题,因此行波波头的提取比较简单。但是母线两端均需安装检测设备,所以成本高,同时对时间同步的要求较高。

2.2.2 D 型行波定位法

D 型行波定位法,也称高压闪烁法,采用重合闸的思想,在重合闸时向线路注入脉冲信号,利用线路发生故障时产生的初始行波到达线路两端的时间差来确定故障点的位置,其原理如图 5 所示。

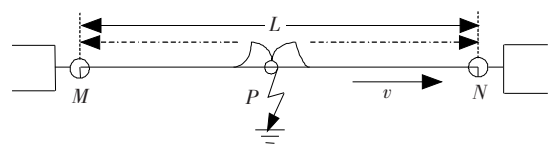


图 5 D 型行波定位法原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the principle of D-type traveling wave location method

若线路发生瞬时接地故障,接地电阻不连续点会迅速消失,脉冲到达故障点后不会发生反射;若线路发生永久性故障,脉冲会在故障点发生反射。假设行波浪涌在线路上的传播速度为 v ,线路 MN 的总长度为 L , M 变电站第一次检测到行波的到达时刻为 t_M , N 变电站第一次检测到行波的到达时刻为 t_N ,则故障点 P 到变电站 M 的距离 L_M 和到变电站 N 的距离 L_N 分别为:

$$L_M = \frac{v(t_N - t_M) + L}{2} \tag{5}$$

$$L_N = \frac{v(t_M - t_N) + L}{2} \tag{6}$$

双端行波定位法的关键是能够准确无误地记录行波到达线路两端的时刻。为保证时间误差和定位误差在有效精度内,必须使用专用的双端时间同步装置,目前一般采用 GPS 作为双端行波定位法的同步时间单元。

双端行波定位法的优点在于只需准确检测初始行波波头信息,不需要测量母线反射波,比较容易检测,因而该方法适用于长距离输电线路。此外,由于双端行波定位法的精确度较高,为了保证标定的初始行波抵达时刻的准确性,所以对双端时间测量准确度的要求比较严格。

黄震等^[42]将双端行波定位法原理应用于架空线—电缆混合线路的故障测距中,利用行波到达各测量端的时间差来判别故障区段并进行定位,该方法理论上可以解决混联线路区段的定位问题,但是测距误差会受线路长度误差的影响;范新桥等^[43]针对多端输电线路,基于双端行波定位法,利用初始波头的到达时刻构建故障支路判定矩阵,最后实现故障定位,该方法计算过程较为烦琐,且在线路 T 型连接点处存在一定的死区;李泽文等^[44]提出了一种不受波速影响的双端故障行波定位方法,该方法可以消除传统双端定位方法中由于时间不同步和波速不确定所引起的故障定位误差,但是对 GPS 对时装置的精度要求较高;高艳丰等^[45]将变分模态分解法和 Teager 能量算子算法相结合,并应用于双端行波定位的故障行波波头检测中,该方法不需要检测行波反射波的波头,测距原理简单,但该方法没有考虑绝对时间,且必须已知线路故障发生时刻才能定位,因而实际运用起来比较困难;孙广等^[46]提出了一种不受

波速影响的改进双端行波定位方法,该方法对不同类型的故障和不同故障的过渡电阻具有良好的适应性,同时也适用于近区故障的定位。

2.3 网络行波定位方法

20 世纪 40 年代以来,行波定位技术取得了长足的进步。由于传统故障行波定位方法存在抗干扰能力差、定位结果误差大等问题,且在实际应用中常定位失败,所以国内外开始研究基于电网的故障行波定位技术。

网络行波定位是在线路发生故障时利用整个电网中所有行波检测装置记录的有效初始行波到达时刻来进行故障定位的一种方法,可对电网中各行波的到达时刻进行过滤、匹配、容错处理,并结合初始行波在电网中的传播路径实现网络定位计算。当电网中某些行波检测装置启动失灵、发生故障或记录了错误时间,该方法仍能进行故障的精准定位。图 6 所示为广域网络行波定位原理图。

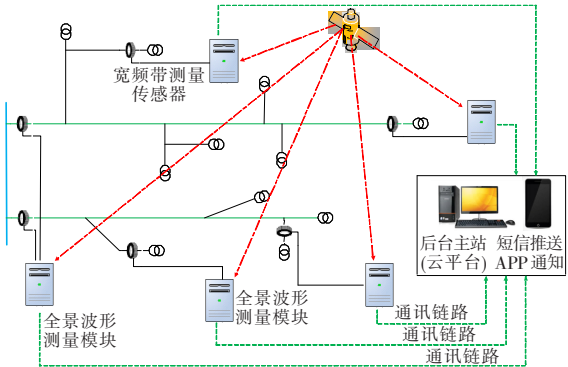


图 6 广域网络行波定位原理图
Fig. 6 Schematic diagram of traveling wave location in wide area network

国内外学者们针对电网故障行波定位技术进行了大量研究。其中,LEE 等^[47]、曾祥君等^[48]首次提出了基于整个输电网络初始行波波头到达时差和行波传输最短路径的复杂输电网行波定位方法,并构建了行波定位系统,这为故障行波定位技术在整个电网的应用提供了技术支持,也使得电网故障行波信息的定位成为可能,但该方法没有涉及具体的定位算法;李泽文^[49]在构建行波定位网络的基础上,首次提出了一种综合利用全网初始行波时间信息进行故障定位计算的电网故障行波定位方法,解决了传统故障定位中可能出现的定位准确度低和定位失败的难题,大大提高了故障行波定位的可靠性和实用性;李泽文等^[50]针对

传统网络定位方法需要对复杂环网网络进行解网计算,且容易解网失败等影响定位精度的问题,通过分析电网网络拓扑结构的最短路径矩阵,结合所包含的所有变电站的行波到达时刻信息进行故障定位,提出了一种基于 Dijkstra 算法的电网故障行波网络定位方法,该方法需要在全网的变电站安装行波检测设备,需要大量投资成本;夏翊翔等^[51]针对现有输电网络行波定位中解网操作步骤复杂和行波传播速度不确定的问题,提出了一种利用动态虚拟故障进行网络行波定位的方法,该方法在消除波速不确定性误差对故障定位结果的影响上有一定的作用,但上述问题仍没有得到根本解决。某些异常情况,如行波定位装置故障、启动失败、时间记录错误等容易导致输电网发生故障而无法准确定位。YU 等^[52]提出了一种时间线性相关的故障行波定位方法,并在湖南电网试验成功,该方法可以有效减小故障行波到达各变电站的时间记录误差,提高故障定位的可靠性和准确性。

相较于传统故障行波定位中存在的可靠性差和准确度低的问题,网络行波定位方法具有较强的抗干扰能力,可以利用少数行波检测装置实现整个电网中所有输电线路可靠、准确的故障定位,并可消除部分行波检测装置发生故障、启动失灵或时间记录错误对定位结果的影响,从而提高故障行波定位的适用性和可靠性。但是该方法从本质上仍然依赖于行波波头,需要与高精度广域时钟同步及已知行波的传输速度,且没有充分考虑复杂电网的特点给故障行波定位带来的实际问题。图 7 为动态虚拟故障网络行波定位原理图,图中节点表示变电站的位置, x 、 y 表示距离。

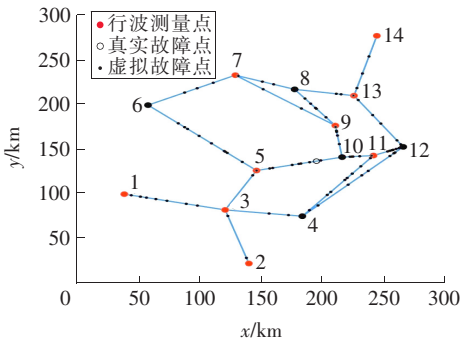


图 7 动态虚拟故障网络行波定位原理图

Fig. 7 Schematic diagram of traveling wave location of dynamic virtual fault network

2.4 频域及时频域行波定位方法

为了弥补时域行波定位法需要在整个频带内处理的缺陷,有学者提出在频域内向输电线路中注入一个人工频带信号,具体操作为:利用阻抗分析仪或网络分析仪向输电线路中注入一组频带范围内幅值相同、频率不同的正弦波(扫频信号),在测量端得到该频带范围内包含故障点信息的反射系数频谱,再通过反傅里叶变换得到时域信号,将其与行波速度相乘就得到了线路长度函数,进而得到故障位置^[53-54]。

由于时域方法不适合判断线路的高阻值故障,频域反射法仅仅只能在频域内分析线路的故障,因此有学者结合这两种方法的长处,提出了时频域结合的行波定位方法^[55],即时频域反射法。该方法向线路中注入具有高斯时间包络的时宽、带宽信号,其中时宽为高斯函数方差的 3~4 倍,带宽为待测线路最适合的频带。其入射信号包括时间中心、时间长度、频率中心和频率随时间变化的速率等参数。当频率随时间变化缓慢且信号持续时间较短时,其入射信号类似于时域反射法的入射信号;当频率随时间变化迅速且信号持续时间较长时,其入射信号类似于频域反射法的入射信号。时频域反射法的入射信号需要根据被测电缆的物理特性进行组合选择。在得到线路反射信号后,利用时频分析方法分析入射信号与反射信号之间的关系,从而得到线路故障信息。

3 行波定位技术存在的主要问题

随着行波装置在实践中的应用和信号处理技术的发展,现有行波技术取得了长足的进步,但现有行波定位技术仍然存在部分问题,这些关键问题会影响行波定位技术的实用化发展。

3.1 故障行波信号难以准确检测

行波信号的检测方法主要包括非接触式检测方法和行波传感器检测方法。

非接触式检测方法是通过检测传输线周围电磁场的变化来实现的,该方法的总成本较低,检测装置不与电网设备直接接触,但测量速度和自动化程度需要进一步提高。此外,该方法大多应用在地理科学研究领域中,如果提高其在电力系统的应用,则会对高压输电线路故障行波的检测起

到一定的推进作用。

因 Rogowski 线圈具有无磁饱和、测量范围宽、响应速度快、测量精度高等特点,行波传感器检测方法通常用其对高频信号进行检测。但是 Rogowski 线圈的结构和所测得的电流频率会影响 Rogowski 线圈的精度,且故障行波信号在通过 Rogowski 线圈传变时会产生信号衰变,这使得所测信号在幅值等波形特征上与原信号存在较大差异。同时,电压、电流传感器的响应特性、在测量和采样过程中产生的误差、高频干扰及各种背景噪声的影响也很容易导致实际检测的行波波产生畸变,从而影响对波形特征的观察与分析。信号采集模块的宽频带高频传变特性是实现真实检测的基础。由于电压、电流传感器及二次测量元件(信号采集模块)在故障行波信号各特征频段的传变特性有所不同,因而单个传变模型不能有效描述信号采集模块的宽频带传变特性。

3.2 故障行波信号难以精确辨识

故障行波信号是一种具有突变性质的非平稳变化的高频暂态信号,很难将其与其他高频干扰信号和开关操作波进行区分。在发生电压过零故障或高阻接地故障的情况下,故障行波信号微弱。行波在整个电网的传输过程中会在波阻抗不连续的地方(如母线、故障点等)发生衰减,这会对行波奇异性产生削弱作用。由于在传输和采样过程中行波信号会受到噪声干扰等的影响而无法对其提取有效信号,同时因受到行波检测技术等制约,保护装置无法有效辨识行波信号。

行波信号辨识的主要目的是凸显行波信号。目前,针对输电线路故障辨识的研究大致分为两类:利用区内外故障特征的差异性对故障行波信号进行辨识和使用不同信号处理方法对故障行波信号进行有效识别。

现有的基于行波信号的故障定位方法仅利用行波波头的时域或频域的局部信息进行故障定位,而瞬时存在的行波波头易受传输色散、线路边界传变特性的影响。由于网络拓扑结构复杂,入射波和反射波会出现混叠现象,这会导致行波波头检测困难。因此,现有行波定位方法的可靠性与电网发展的实际需求存在差距。

3.3 波头到达时刻难以准确标定

行波波头的到达时刻为行波波头中最高

率分量到达测量点的时刻。在发生高阻接地故障时,线路中的一部分行波经由阻抗通过大地传播,这就使得原有的故障行波发生了一定程度的衰减和畸变,进而造成行波波头检测困难,并进一步使故障行波到达测量端的时刻标定不够准确。同时,由于行波频散、故障初始角以及互感器响应速度等因素的影响,安装在输电线路末端的行波故障测距装置检测到的初始故障行波总会存在一定的延时,这将最终导致行波测距失败。

3.4 变电站高精度同步时钟的问题

高精度同步时钟是测量电力系统故障暂态信号的基础。电力系统中的各种自动化系统和装置都需要在同一时间基准下运行,所以同步时钟的精度将直接影响智能电网的控制精度和性能。

近年来,由于卫星导航系统和电力电子技术的快速发展,高精度同步时钟的抗干扰能力大大增强,由卫星时钟结合晶振时钟产生同步时钟的技术得到了快速发展。但是在实际应用系统中,GPS 同步时钟的精度和可靠性都难以得到保障,这使得 GPS 时钟难以应用于如变电站综合自动化、电力系统保护控制等对时钟可靠性要求较高的控制领域中。现有的方法可以产生较为精准的同步时钟,但仍存在实时性不够、补偿方案复杂、样本数据异常处理、误差模型的稳定性差、对设备的要求过高等问题,因而无法满足电力系统的实际需求。

3.5 复杂电网的故障定位问题

传统的故障行波定位方法严重依赖于行波波头的精确提取。随着大规模分布式新能源和电动汽车等柔性负荷接入电力网络,应用于交直流混联的复杂电网故障行波定位技术将面临新的挑战,其中包括:

1) 直流逆变侧线路的边界中包含大量高压电力设备,其非线性传变特性会使高频信号显著衰减,并导致行波波头严重衰减与畸变。同时,区内外各种故障产生的行波波头特征也存在差异,这将影响观察、分析波形特征^[56]。

2) 以电力电子器件为核心的电力设备大量存在于电力网络中,网络拓扑结构变得复杂。对电力网络的快速控制将产生暂态行波及多个行波源,各行波源波形的叠加将导致故障特征混叠严重,进而造成行波波头检测困难。

3) 直流系统换流站快速、灵活、可控及离散非线性的特点导致故障特征在时、空域呈现非线性分布的特征^[57-59],这给准确、充分、可靠地挖掘故障特征带来了巨大的困难。

综上所述,现有行波定位方法的可靠性与电网发展的实际需求存在一定的差距,所以需要提出适用于复杂电网、能有效解决传统故障行波定位方法瓶颈问题的新思路和新方法,以可靠、充分地挖掘行波中包含的故障特征信息。

4 解决现有问题的主要措施

为了解决上述传统行波定位中存在的可靠性和准确度低的问题,提高行波定位的实用性,本研究提出了几点解决措施。

4.1 改进行波信号检测方法

对于非接触式磁场行波检测方法,需要分析输电线路发生故障时周围的磁场特征,并通过检测磁场信号以获得故障行波信号的相关特征信息,以达到检测输电线路电流和电压的目的;需要运用信号处理技术对非平稳磁场信号进行降噪处理,进而对去噪后的信号进行检测;需要确定磁场传感器的最优放置位置。分析磁场传感器和输电线路时需要考虑三维空间内的情况。对双回和多回输电线路的故障磁场进行特性分析,以提高故障行波检测的可靠性。现有的输电线路故障行波检测方法缺乏实际应用的支撑,因而需要开发可用于现场测量的磁场检测装置。

针对检测真实一次行波信号时存在的问题,需要考虑电流互感器二次侧行波波形的差异对输电线路故障定位的影响^[60]。王晓芳等^[61]、金丹等^[62]研究了由 Rogowski 线圈测得的波形畸变的矫正方法;李泽文等^[63-65]提出了几种应用波形反演技术进行故障电压行波精确检测的方法。该方法的主要步骤为:首先,根据已有的相关理论与试验设备,以研制的专用电压行波传感器作为行波检测装置^[66],分析专用电压行波传感器的工作原理、传递函数模型和高频传变特性,选取适合行波波形的反演专用电压行波传感器传递函数模型为正演模型,并根据反卷积原理建立行波特征频带反演模型;然后,结合各类反演算法的特点,解决

反演过程中存在的病态问题,并结合反演模型实现电压行波的精确检测,即由所测二次行波信号反演得到一次行波信号;最后,通过仿真与试验,分析和验证该方法的有效性、准确性和适应性。

采用波形反演理论与方法对宽频带行波信号进行波形反演,可以解决宽频带行波信号检测的真实性问题。寻找信号采集模块的依频变化规律是建立信号采集模块宽频带传变模型和实现精确测量的关键,所以需要对信号采集模块特征频带传变模型的依频变化情况、传递函数模型的元件参数、分布参数的等效阶数、非线性各特征频段间的串扰、各种电磁干扰、环境温度等因素对信号传变的影响规律进行深入研究。同时,为提高行波定位速度,在进行波形反演时,需充分考虑反演的速度问题,并研究宽频带行波信号分频段波形反演、各频段反演信号合成、反演及合成算法速度等内容。

4.2 提出故障行波信号可靠精准的辨识方法

根据区内外发生故障时行波波形的不同,可将检测到的宽频带行波信号的波形与区内发生故障时的行波波形的波形进行对比,根据波形相似度实现区内外故障的辨识。研究内容主要包括:基于电网宽频带行波信号的实时全景信息,揭示电网不同结构、故障点位置、故障发生时刻、故障程度及不同类型故障对宽频带行波信号的影响机理;统计分析各种故障情况下宽频带行波信号的波形特征,如时间、频率、幅值、极性等;综合运用信息融合、数据挖掘、人工智能等理论研究电网时空多维尺度故障信息及其传输特性、暂态干扰识别和多源信息融合处理技术;研究基于宽频带行波信息的电网故障特征、关联规律和描述方法;研究波形拟合技术,对宽频带行波信号进行时间—频率—幅值—极性的多尺度拟合,根据波形拟合度的变化趋势及特点,提出区内外故障行波保护判据,实现故障的精准辨识与保护。

传统的辨识方法大多采用单一故障信息进行故障辨识,其可靠性有待提高。故障暂态行波波形的波形中包含着丰富的故障信息,需要依靠信息融合技术实现海量故障信息的有效融合,这样才能全面准确地描述故障特征,实现故障的可靠辨识。研究内容主要包括:通过研究暂态行波与电网拓

扑结构及故障参数之间的映射机理,考虑网络拓扑结构影响以及暂态行波特征与故障参数之间的关联性,对多维特征量的重要性和优先级进行排序,实现最佳输入波形特征数据组的选取;研究基于多核学习方法的多维特征量的融合方法,采用多核函数的优化组合方式将多维特征量映射至高维空间,依据暂态行波与电网拓扑结构及故障参数的映射机理设置权重系数;自适应学习全景特征,建立适用于初始故障辨识的特征融合分类模型,实现故障的灵敏、可靠辨识。

4.3 改进故障行波到达测量端时刻的标定方法

针对行波波头到达时刻的标定,除了要提高硬件设备的性能,还要有合适的信号处理算法来计算故障初始行波到达端点的准确时刻。行波法故障测距的关键在于检测故障行波波头和准确提取故障行波信号的特征信息,常用的方法有:小波变换法、数学形态学法、Hilbert-Huang变换法、独立分量法等。在对提取的特征信息进行时频分析方面,有小波分析、Hilbert分析、Teager能量算子等方法。通过对高压输电线路故障测距方法的深入研究,发现现有算法无法同时满足自适应性、精度和适用范围等各个方面的要求。因此,亟须寻找一种精度高、鲁棒性强、适用性广的故障行波测距算法,但单一算法无论在检测提取还是在时频分析方面都存在一定的局限性,无法做到同时兼顾。所以,对于测距算法的改进和探讨还有很大的进步空间。

4.4 研究同步时钟问题的解决方法

针对电力系统对同步时钟高精度、高稳定性的要求,需要继续研究同步时钟误差修正理论与技术,设计基于北斗卫星时钟和晶振时钟的高精度、高稳定性同步时钟系统的实现方案。

针对同步时钟存在的问题,需要进一步深入分析研究卫星时钟的授时特性和误差来源,提出卫星时钟和网络时钟的误差修正方法,提高授时精度;综合利用卫星时钟和网络时钟两种授时方式,研究卫星时钟、晶振时钟和网络时钟这3种时钟互为备用的“天地网”式时间同步技术;以“天基”授时为主,“地基”授时为辅,将各测量点通过网络互连,同时将同步时钟和网络时钟相结合,使二者互为备用,构建天地互备的时间同步体系;不

断探索和完善适用于智能电网时间同步系统的新理论和新技术,从而提高同步时钟的精确度和稳定性,以满足建立智能电网的条件。

4.5 研究复杂电网故障定位问题的算法

随着电网自动化程度的不断提高,大量的自动化终端设备、先进的测量装置等被应用于交直流混联的复杂电网之中,为实现电网可观可控、实时获取电网运行状态与海量故障数据、将深度学习等人工智能技术应用于复杂电网中等奠定了数据基础,提供了技术支持。

将深度学习方法和迁移学习方法相结合,并应用到电力系统继电保护和故障定位中,可加快深度学习模型的训练速度,增强其动态学习能力和泛化性能;可从非线性、混叠严重的故障行波信息中准确、充分、可靠地挖掘故障敏感特征,剔除故障冗余特征和虚假特征,进而提高继电保护和故障定位的可靠性和准确性。

行波可完整描述线路的电气状态,具有全时频特性,其中,前行波和反行波包含所有的故障信息^[67]。一定时间窗内的行波波形的包含了大量时频域故障特征,可反映网络拓扑结构、线路参数、故障类型、故障位置、故障程度(包括故障过渡电阻、故障初相角)、电压和电流等全景故障信息^[68-70]。

因此,有必要从时频域行波传输特性和波形形成机理入手,挖掘波形中包含的全景故障特征,基于全景故障特征更准确、可靠地获取复杂电网故障点位置等信息,从时频域行波波形的形成机理出发,提出时频多尺度行波全景波形的理论诠释和数学描述方法;改进时频联合分析方法,深入研究深度学习算法,实现行波全景波形浅层常规特征和深层抽象特征准确、充分、可靠的提取;在此基础上,探索时空多层次行波全景特征与故障位置之间的映射关系,揭示并论证行波全景波形唯一性理论,即行波全景波形与故障位置的一一对应关系,提出时空多层次故障特征融合的复杂电网故障行波定位新方法。

5 结语

行波定位有利于缩小故障隔离范围和快速开展检修与维护,在保障输配电网安全、稳定、高效

运行方面,具有广阔的应用前景。本研究梳理了输电网故障行波定位的主要发展进程和研究现状,介绍了基于输电网的行波定位的基本原理,并针对现有行波定位研究中存在的问题提出了相应的解决方案。为顺应输电网日益发展的现实需求,提高行波定位的实用性,对行波定位未来的研究方向建议如下:

1) 虽然大多数行波定位技术提高了行波保护方法的可靠性,但通过仿真分析和实验室测试等手段无法完全重现电力系统的实际运行现场。针对这一问题,需要开展以下研究:一方面,可以改进和完善电网仿真分析模型,特别是针对母线系统的精确建模,使仿真和试验波形尽可能地接近实际波形,并构建完善的波形数据库;另一方面,研究雷击故障、雷击干扰的辨识方法,以提高行波保护的抗干扰能力,降低行波保护的误动概率。

2) 以“天地网”式时间同步技术为基础,进一步研究北斗卫星的授时方式,解决晶振驯服过程中的频率闪跳问题,以提高授时的稳定性;进一步研究秒脉冲在传送过程中和不同串口的适应性问题,增强信号的抗干扰能力,精简仿真测试平台;进一步研究系统授时方案,优化硬件布局,拓宽数据传输接口,争取在除电力系统以外的其他领域中得以使用。

3) 电网线路众多且覆盖面广,电网的各个分支均配备了专用行波传感器和行波采集装置,成本巨大。为解决这一问题,下一阶段应开展以下研究:一方面,研究电网行波波头采集装置的优化配置方法,减少一次性投资;另一方面,研究高性能、低成本、体积小、低功耗、便于安装的行波采集模块,并将其嵌入保护装置、相量测量装置或故障指示器等,推动故障行波定位技术在电网中的实际应用与推广。

4) 输电网故障行波定位技术已非常成熟,但若要将其应用于电力电子化输配电系统中,则还有系列的理论技术问题需要解决。相较于输电网故障定位,电力电子化输配电系统的初始、微弱故障定位的难度极大。只有深入研究故障暂态信号在电力电子化输配电系统中的衰变特性、各模量波速的衰减规律,并利用广域多源暂态信息与多维暂态特征量进行协同定位,才有望实现电力电

子化输配电系统故障的精准定位。

〔参考文献〕

- [1] 董新洲,葛耀中,徐丙垠,等. 利用GPS的输电线路行波故障测距研究[J]. 电力系统自动化,1996,20(12):37-40.
DONG Xinzhou, GE Yaoshong, XU Bingyin, et al. Study of transmission line fault location based on travelling waves and GPS technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(12): 37-40.
- [2] 曾祥君,尹项根,陈德树,等. 基于整个输电网GPS行波故障定位系统的研究[J]. 电力系统自动化,1999,23(10):8-10,16.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. GPS travelling wave fault location systems for transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(10): 8-10, 16.
- [3] HOLBECK J I. A simple method for locating ground faults[J]. Electrical Engineering, 1944, 63(3): 89-92. DOI: 10. 1109/ee. 1944. 6440188.
- [4] DUPOIS H P, JACOBS W E. Fault location and relay performance analysis by automatic oscillographs [J]. Electrical Engineering, 1946, 65(7): 442-446. DOI: 10. 1109/ee. 1946. 6441811.
- [5] NOVOSEL D, HART D G, UDREN E, et al. Un-synchronized two-terminal fault location estimation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 130-138. DOI: 10. 1109/61. 484009.
- [6] STEVENS R F, STRINGFIELD T W. A transmission line fault locator using fault-generated surges [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1948, 67(2): 1168-1179. DOI: 10. 1109/t-aiee. 1948. 5059797.
- [7] SPAULDING L R, DIAMOND C C. A transient fault locator for high-voltage transmission lines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1949, 68(2): 1005-1012. DOI: 10. 1109/t-aiee. 1949. 5060042.
- [8] LEWIS L J. Traveling wave relations applicable to power-system fault locators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1951, 70(2): 1671-1680. DOI: 10. 1109/t-aiee. 1951. 5060615.
- [9] SANT M T, PAITHANKAR Y G. Online digital fault locator for overhead transmission line[J]. Pro-

- ceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1979, 126(11): 1181-1185. DOI: 10. 1049/piee. 1979. 0201.
- [10] CROSSLEY P A, MCLAREN P G. Distance protection based on travelling waves[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(9): 2971-2983. DOI: 10. 1109/TPAS. 1983. 318102.
- [11] 蔡德礼. 高压输电线故障点定位的一种新的计算机方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1982(2): 1-18.
CAI Deli. A new computer method for fault location on HV transmission lines[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1982(2): 1-18.
- [12] 杨奇逊, 黄少锋. 微型机继电保护基础[M]. 第2版. 北京: 中国水利电力出版社, 2005.
YANG Qixun, HUANG Shaofeng. Fundamentals of microcomputer relay protection[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2005.
- [13] 王绪昭, GALE P F. 利用测量电阻分量实现高阻接地短路的准确测距法[J]. 继电器, 1988(3): 13-20.
WANG Xuzhao, GALE P F. Accurate distance measurement method for high resistance grounding short circuit by measuring resistance component[J]. Relay, 1988(3): 13-20.
- [14] 王绪昭. 一种小接地电网两点接地短路的微机测距算法[J]. 河北电力技术, 1987(6): 53-57.
WANG Xuzhao. A microcomputer distance measurement algorithm for two-point grounding short circuit in small grounding grid[J]. Hebei Electric Power, 1987(6): 53-57.
- [15] 于九祥, 汤健红. 卡尔曼滤波技术在距离保护上的应用[J]. 继电器, 1990(4): 22-27.
YU Jiuxiang, TANG Jianhong. Application of Kalman filter technology in distance protection[J]. Relay, 1990(4): 22-27.
- [16] 黄焕焜. 行波与行波继电保护[J]. 电力系统自动化, 1982(3): 3-12, 39.
HUANG Huankun. Travelling wave theory and its application to protective relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 1982(3): 3-12, 39.
- [17] 葛耀中, 徐丙垠, 陈平. 利用暂态行波测距的研究[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(3): 70-75.
GE Yaozhong, XU Bingyin, CHEN Ping. Study of fault location based on travelling waves[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29(3): 70-75.
- [18] 曾祥君, 尹项根, 陈德树, 等. 基于整个输电网 GPS 行波故障定位系统的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 8-10, 16.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. GPS travelling wave fault location systems for transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(10): 8-10, 16.
- [19] 曾祥君, 尹项根, 唐忠, 等. GPS 行波故障定位[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 1999, 14(3): 236-239.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, TANG Zhong, et al. GPS travelling wave fault location[J]. Journal of Changsha University of Electric Power (Natural Science), 1999, 14(3): 236-239.
- [20] 宋璇坤, 闫培丽, 肖智宏, 等. 全光纤电流互感器技术应用评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 149-154.
SONG Xuankun, YAN Peili, XIAO Zhihong, et al. Comment on the technology and application of fiber optic current transformer (FOCT)[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 149-154.
- [21] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统典型暂态响应特性分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 45-52. DOI: 10. 19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 2005. 03. 009.
YANG Fenyan, XU Zheng. Typical transient responses in HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 45-52. DOI: 10. 19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 2005. 03. 009.
- [22] 吴崇昊, 陆于平, 侯喆. 基于时域连续有限冲激响应滤波器的电子互感器采样数据站间同步算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 50-54.
WU Chonghao, LU Yuping, HOU Zhe. Time-domain continuous FIR filter based electronic instrument transducers sampling data inter-substation synchronization arithmetic[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 50-54.
- [23] 郭林勇, 何正友, 钱清泉. 利用 CVT 二次信号的频域行波故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2008(8): 73-77, 82.
WU Linyong, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. Frequency domain traveling wave fault location method using CVT's secondary signals[J]. Automation of

- Electric Power Systems,2008(8):73-77,82.
- [24] LI Z W,DENG T F,ZENG X J, et al. Theoretical modeling and implementation of traveling wave sensor based on PCB coils[J]. Journal of Sensors, 2015,2015:598194. DOI:10.1155/2015/598194.
- [25] 胡永春,张雪松,许伟国,等. IEEE 1588 时钟同步系统误差分析及其检测方法[J]. 电力系统自动化, 2010,34(21):107-111.
HU Yongchun,ZHANG Xuesong,XU Weiguo, et al. Error analysis and detection method for IEEE 1588 clock synchronization system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(21):107-111.
- [26] 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 Zewen,ZENG Xiangjun,HUANG Zhiwei, et al. Method for correcting errors of the GPS-clock based on the high precision crystal oscillator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (13):55-58.
- [27] 蒋陆萍,曾祥君,李泽文,等. 基于 GPS 实现电力系统高精度同步时钟[J]. 电网技术,2011,35(2):201-206. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2011.02.036.
JIANG Luping,ZENG Xiangjun,LI Zewen, et al. Realization of high accuracy synchronous clock for power system based on GPS[J]. Power System Technology,2011,35(2):201-206. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2011.02.036.
- [28] 赵廷,李泽文,邹彬,等. 卫星时钟与网络时钟互备的广域时间同步方法[J]. 电力系统自动化,2017, 41(14):202-207.
ZHAO Ting,LI Zewen,ZOU Bin, et al. Wide-area time synchronization method for mutual preparation of satellite clock and network clock[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(14):202-207.
- [29] 李泽文,邹彬,赵廷,等. 基于偏最小二乘回归的高精度同步时钟[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019,31(1):1-6.
LI Zewen,ZOU Bin,ZHAO Ting, et al. High-precision synchronous clock based on partial least squares regression[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(1):1-6.
- [30] 陈平,葛耀中,索南加乐,等. 输电线路故障开断暂态行波的传播特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000,20(7):75-78. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2000.07.018.
CHEN Ping,GE Yaozhong,SUONAN Jiale, et al. Study on propagation characteristics of fault switching-off induced transient travelling waves on transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2000,20(7):75-78. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2000.07.018.
- [31] 覃剑,黄震,杨华,等. 同杆并架双回线路行波传播特性的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(5): 30-34. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2004.05.006.
QIN Jian,HUANG Zhen,YANG Hua, et al. Study on travelling wave propagation in double-circuit parallel transmission line[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(5):30-34. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2004.05.006.
- [32] VALSAN S P,SWARUP K S. Wavelet transform based digital protection for transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2009,31(7-8):379-388. DOI:10.1016/j.ijepes.2009.03.024.
- [33] WANG D,HOU M Q. Travelling wave fault location algorithm for LCC-MMC-MTDC hybrid transmission system based on Hilbert-Huang transform[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2020,121:106125. DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106125.
- [34] 吴杰,刘梦丹,韩啸,等. 基于数学形态学的 VSC-HVDC 电缆故障测距[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(1):111-117.
WU Jie,LIU Mengdan,HAN Xiao, et al. Fault location of VSC-HVDC transmission cable based on mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2017,29(1):111-117.
- [35] 蒲婷婷,李京. 基于优化小波神经网络的输电线路行波故障测距[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021,33(2):83-88. DOI:10.19635/j.cnki.csu-ep-sa.000494.
PU Tingting,LI Jing. Traveling wave fault location of transmission line based on optimized wavelet neural network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021,33(2):83-88. DOI:10.19635/j.cnki.csu-ep-sa.000494.
- [36] 曾祥君,楚相辉,李灵,等. 株洲电网故障行波定位

- 系统[J]. 电力科学与技术学报,2008,23(4):38-43,52.
- ZENG Xiangjun, CHU Xianghui, LI Ling, et al. Faults location system with traveling wave for Zhuzhou power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2008,23(4):38-43,52.
- [37] SALAT R, OSOWSKI S. Accurate fault location in the power transmission line using support vector machine approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2004,19(2): 979-985.
- [38] 邓丰,李欣然,曾祥君,等. 基于波形唯一和时-频特征匹配的单端行波保护和故障定位方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5):1475-1487. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.170899.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-end traveling wave based protection and fault location method based on waveform uniqueness and feature matching in the time and frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1475-1487. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.170899.
- [39] DENG F, LI X R, ZENG X J. Single-ended traveling wave protection algorithm based on full waveform in the time and frequency domains[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(15):3680-3691. DOI:10.1049/iet-gtd.2017.1730.
- [40] 束洪春,宋晶,田鑫萃. 基于沿线行波突变的双回线路单端测距[J]. 中国电机工程学报,2019,39(19):5793-5804,5907. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.180742.
- SHU Hongchun, SONG Jing, TIAN Xincui. Single ended fault location of double circuit lines based on traveling wave saltation along the line[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19):5793-5804,5907. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.180742.
- [41] HUAI Q, LIU K P, HOOSHYAR A, et al. Single-ended line fault location method for multi-terminal HVDC system based on optimized variational mode decomposition [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 194: 107054. DOI:10.1016/j.epsr.2021.107054.
- [42] 黄震,江泰廷,张维锡,等. 基于双端行波原理的高压架空线-电缆混合线路故障定位方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(14):88-91.
- HUANG Zhen, JIANG Taiting, ZHANG Weixi, et al. A fault location method for high-voltage overhead lines combined with underground power cables based on double-ended travelling wave principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14):88-91.
- [43] 范新桥,朱永利. 基于双端行波原理的多端输电线路故障定位新方法[J]. 电网技术,2013,37(1):261-269. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2013.01.043.
- FAN Xinqiao, ZHU Yongli. A novel fault location scheme for multi-terminal transmission lines based on principle of double-ended traveling wave [J]. Power System Technology, 2013, 37(1):261-269. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2013.01.043.
- [44] 李泽文,范彩兄,曾赞,等. 不受波速影响的电力线路故障双端行波定位方法[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(2):79-83.
- LI Zewen, FAN Caixiong, ZENG Yun, et al. Power line fault location method with double terminal traveling waves unconsidered wave transmission speed[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(2):79-83.
- [45] 高艳丰,朱永利,闫红艳,等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(8):8-13.
- GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8):8-13.
- [46] 孙广,王阳,薛枫,等. 特高压直流输电线路改进双端行波故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(14):113-120. DOI:10.19783/j.cnki.pspc.191050.
- SUN Guang, WANG Yang, XUE Feng, et al. Research on an improved double-terminal traveling wave fault location method for UHVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14):113-120. DOI:10.19783/j.cnki.pspc.191050.
- [47] 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.
- [48] 曾祥君,陈楠,李泽文,等. 基于网络的故障行波定位算法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(31):48-53.

- ZENG Xiangjun, CHEN Nan, LI Zewen, et al. Network-based algorithm for fault location with traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31):48-53.
- [49] 李泽文. 时差型电网故障行波定位与广域行波保护方法研究[D]. 长沙:湖南大学, 2011.
- LI Zewen. Research of traveling wave time difference based power network fault location and wide-area traveling wave protection method[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [50] 李泽文, 唐平, 曾祥君, 等. 基于 Dijkstra 算法的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18):162-168.
- LI Zewen, TANG Ping, ZENG Xiangjun, et al. Method of traveling wave fault location based on Dijkstra algorithm in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18):162-168.
- [51] 夏翊翔, 李泽文, 雷柳, 等. 基于动态虚拟故障的行波网络定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14):4868-4878. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.201232.
- XIA Yixiang, LI Zewen, LEI Liu, et al. A new method of traveling wave network location based on dynamic virtual fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14):4868-4878. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.201232.
- [52] YU K, ZENG J P, ZENG X J, et al. A novel traveling wave fault location method for transmission network based on time linear dependence[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126:106608. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106608.
- [53] OHKI Y, HIRAI N. Fault location in a cable for a nuclear power plant by frequency domain reflectometry[C]//Proceedings of 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Xi'an: IEEE, 2016:36-39.
- [54] FURSE C, CHUNG Y C, DANGOL R, et al. Frequency-domain reflectometry for on-board testing of aging aircraft wiring[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(2):306-315. DOI:10.1109/TEM.2003.811305.
- [55] LEE C K, COATS D L, LEE C K, et al. Diagnosis of cables in nuclear power plants using joint time-frequency domain reflectometry[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(29):74-78. DOI:10.3182/20131111-3-KR-2043.00020.
- [56] 罗四倍. 特高压电网交流线路全信息量快速保护的研究[D]. 济南:山东大学, 2019.
- LUO Sibi. Fast protection based on full fault information for AC transmission lines in UHV grid[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [57] 段建东, 李浩, 雷阳, 等. 利用同步挤压小波变换的高压交直流混联系统交流线路暂态方向保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13):3833-3842. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.180669.
- DUAN Jiandong, LI Hao, LEI Yang, et al. Transient-based directional protection using synchrosqueezing wavelet transforms for AC transmission lines in HVAC/DC hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13):3833-3842. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.180669.
- [58] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲, 等. 利用波前广义 Logistic 函数拟合的直流输电线路快速保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11):3168-3176. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.181645.
- ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Principle of high speed protection for DC transmission line using wave front generalized Logistic function fitting[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11):3168-3176. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.181645.
- [59] 周念成, 廖建权, 王强钢, 等. 深度学习在智能电网中的应用现状分析与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4):180-191.
- ZHOU Niancheng, LIAO Jianquan, WANG Qianggang, et al. Analysis and prospect of deep learning application in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4):180-191.
- [60] 王绍部, 舒乃秋, 龚庆武, 等. 计及 TA 传变特性的输电线路行波故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2006(2):88-92.
- WANG Shaobu, SHU Naiqiu, GONG Qingwu, et al. Study on traveling wave fault location reckoning with transfer characteristic of TA[J]. Proceedings of the CSEE, 2006(2):88-92.
- [61] 王晓芳, 周有庆, 李付亮. Rogowski 线圈电流互感器的相差分析与校正[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5):56-60.
- WANG Xiaofang, ZHOU Youqing, LI Fuliang,

- Phase error analysis and correction of electronic current transformer based on Rogowski coils[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 56-60.
- [62] 金丹, 徐春营, 岳鑫桂, 等. 输电线路雷电流测量用 Rogowski 线圈低频失真校正技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 96-100.
- JIN Dan, XU Chunying, YUE Xingui, et al. Low-frequency distortion correction technology of Rogowski coil applied to lightning current measurement on transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 96-100.
- [63] 李泽文, 任申, 贺子凝, 等. EMD 分解结合维纳滤波的电压行波精确检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 28-34. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.000213.
- LI Zewen, REN Shen, HE Zining, et al. Accurate detection method for voltage traveling wave based on EMD decomposition combined with Wiener filtering[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(12): 28-34. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.000213.
- [64] 李泽文, 杜显东, 林依勤, 等. 结合 Tikhonov 正则化的电压行波精确检测方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1049-1055. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0942.
- LI Zewen, DU Yudong, LIN Yiqin, et al. A method of voltage wave accurate detection based on Tikhonov regularization theory[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1049-1055. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0942.
- [65] LI Z W, LV J J, XI Y H, et al. Accurate detection method of voltage traveling-wave-based on waveform inversion[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 178: 106033. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.106033.
- [66] 李泽文, 刘柏罕, 范彩兄, 等. 基于 Rogowski 线圈的新型电压行波传感器[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 94-99.
- LI Zewen, LIU Bohan, FAN Caixiong, et al. Rogowski coil based voltage traveling wave sensor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 94-99.
- [67] 董新洲, 雷傲宇, 汤兰西, 等. 行波特性分析及行波差动保护技术挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 184-191.
- DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi, et al. Analysis of traveling wave characteristics and challenges and prospects of traveling wave differential protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 184-191.
- [68] 邓丰, 李欣然, 曾祥君. 基于全波形信息的混联线路单端行波定位方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3471-3485. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.171642.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun. Single-ended traveling-wave-based fault location algorithm for hybrid transmission line based on the full-waveform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3471-3485. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.171642.
- [69] 邓丰, 曾祥君, 李泽文, 等. 故障行波全波形时一频特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3231-3243. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.181326.
- DENG Feng, ZENG Xiangjun, LI Zewen, et al. Research on characteristics of traveling wave full-waveform in the time and frequency domains[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3231-3243. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.181326.
- [70] 邓丰, 梅龙军, 唐欣, 等. 基于时频域行波全景波形的配电网故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(13): 2861-2870. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.200649.
- DENG Feng, MEI Longjun, TANG Xin, et al. Faulty line selection method of distribution network based on time-frequency traveling wave panoramic waveform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2861-2870. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.200649.

Review of traveling wave fault location technology for high voltage AC transmission lines

LI Zewen, ZENG Xiangjun, XIA Yixiang, WANG Shuai, XI Yanhui

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of
Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Traveling wave location technology can quickly and accurately locate the fault according to the collected time information when the high-voltage AC transmission line fault occurs in the system. Due to its high location accuracy, it has attracted extensive attention. This paper introduces the development of traveling wave location technology at home and abroad from the aspects of accurate detection of traveling wave signal, high-precision synchronous clock technology, fault location algorithm and engineering practice. Then it introduces the working principles and their advantages and disadvantages of single-end traveling wave location, double-end traveling wave location and network traveling wave location methods. The main technical problems existing in the traditional traveling wave location research have been analysed, which puts forward the corresponding solutions. Finally, the development prospect of traveling wave location technology is prospected, in order to provide reference for subsequent research.

Key words: transmission network; fault location; traveling wave; high-precision detection; synchronous clock

Manuscript received: 2022-07-22; **revised:** 2022-08-11; **accepted:** 2022-08-20

Foundation item: Project(51877012) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author: LI Zewen(1975—)(ORCID:0000-0002-5734-4002), male, professor, research interest: theory and technology of fault traveling wave location and protection in power grid, theory and technology of accurate detection of energy flow in power system. E-mail: lzw0917@163.com

(责任编辑:石月珍;校对:赵冰;英文编辑:彭卓寅)