

新型输电线路故障测距系统的研制

许勇, 牛永会, 郭宁明, 孙爱春, 吕大伟, 冯志畅, 郑国太

(国网电力科学研究院, 江苏 南京 210061)

摘要: 针对传统行波故障测距装置存在的一些问题, 如采样率低造成直流线路故障不启动、不同厂家设备间数据无法共享、不能满足智能变电站接入等, 提出并实现了一种设备间基于 Qnet 协议的新型行波故障测距系统。相对于传统行波故障测距系统, 该系统采用超高采样频率、支持分布式接入, 显著提高了测距装置接入的灵活性; 对外通信协议全面满足 IEC61850 要求, 数据存储格式采用 comtrade 标准格式, 便于数据共享; 用多尺度分析替代了传统的主导频带分析。模拟试验证明, 该算法可深度优化测距结果, 有效提高测距精度。

关键词: 行波; 故障测距; 超高速采样; Qnet; 测距算法; 智能变电站

Development of the new fault location system based on Qnet

XU Yong, NIU Yong-hui, GUO Ning-ming, SUN Ai-chun, Lü Da-wei, FENG Zhi-chang, ZHENG Guo-tai

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210061, China)

Abstract: The traditional fault location system has some problems, for example, insufficient sampling rate result in not triggering on DC line when fault happens, can't support distributed installation and communication protocol conform to IEC61850 standard in smart substation, and the data can't be shared between different manufacturers. A new type of fault location system based on Qnet protocol is introduced. The new fault location system has extreme high sampling rate, saves the fault data using comtrade style and accords with the IEC61850 standard, so the data can be easily shared. It is proved through test that the fault location precision is improved largely by using the multi-scale analysis algorithm.

Key words: wave; fault location; extreme high sampling; Qnet; fault location algorithm; smart substation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)12-0119-07

0 引言

当线路故障时, 如果能够快速准确地定位故障点, 就可以大大减少线路寻查的工作量, 缩短故障修复时间, 节约大量的人力、物力, 提高供电可靠性, 减少停电损失。同时准确地测出故障点位置, 找到故障原因, 有利于及时地发现事故隐患, 采取针对性的措施, 对避免事故再一次地发生保证电网安全具有重要的意义^[1]。

故障测距技术的研究开始于上世纪 80 年代, 高压输电线路故障测距方法主要有两类: 一是行波法, 二是阻抗法。测距装置在发展初期的一段时间故障测距功能主要是由微机线路保护或故障录波器实现的, 采用的是基于阻抗测量的原理^[2], 但是阻抗法受多种因素的影响, 如故障点电阻、电压电流互感器的误差、分布电容、线路结构等, 因此精度不是很理想^[3], 另外由于阻抗测距方法都是基于工

频电气量的, 不能用于直流线路故障测距应用。

早期行波法使用由电流行波和电压行波组合而成的方向行波作为测距的依据^[4], 而理论和实践证明普通的电容分压式电压互感器不能传变频率高达数百千赫兹的电压行波信号。为了获取电压行波则需要附加专门的行波耦合设备, 从而使得装置结构复杂、投资增大, 因此目前的行波测距装置大多采集的是电流行波。从 2000 年开始, 中国电力科学研究院和国内一些研究单位开始研究基于小波变换技术, 利用输电线路故障时产生的行波信号确定故障点距离的新方法, 并研制出了专用的故障测距装置。行波测距方法有单端测距法^[5]和双端测距法^[6], 目前双端测距法应用较广, 基于小波变换的故障测距方法相对于基于阻抗法的测距方法具有测距精度高、不受线路长度、故障位置、故障类型、负荷电流、接地电阻、故障时电压相角、大地电阻率及一些较强干扰的影响的特点^[7], 因此在安装运行后可以快速找

到故障点,对电网的安全稳定运行发挥了重要的作用。

除了常用的行波法和阻抗法外,近些年一些学者也提出了一些新的测距算法^[8],如采用同步相量测量装置(PMU)采集的数据进行双端^[9]或N端输电线路测距算法^[10],但是因实施的难度较大,准确性有待验证。

随着智能电网建设的不断推进,现有的行波故障测距装置显现出一些缺陷,如采样率不高、信号无法分散式接入、对外通信不支持 IEC61850 标准、故障数据无法全网共享等^[11]。

本文详细介绍了一种最新研发的 WFL-2012 输电线路行波故障测距系统,该系统软硬件采用模块化设计、配置灵活,采样率高达 1.25 MHz,测距算法中采用多尺度分析替代了传统的主导频带分析,显著提高了测距精度。

1 系统的构成

如图 1 所示,WFL-2012 输电线路故障测距系统由测距主站、管理机箱和采集单元构成。其中采集单元可以分散布置,便于智能变电站信息分散式接入的要求,一套系统最多可以接入 48 条线路的电流信号,采集单元通过光纤与管理机箱相连,当线路发生故障时采集单元预设的故障录波判据启动,故障数据自动上传到管理机箱,管理机箱可以存储最多 1 000 次故障数据,管理机箱可以将故障数据传输到远方或就地的测距主站,测距主站接收线路两端的故障数据,通过测距算法自动给出测距结果。

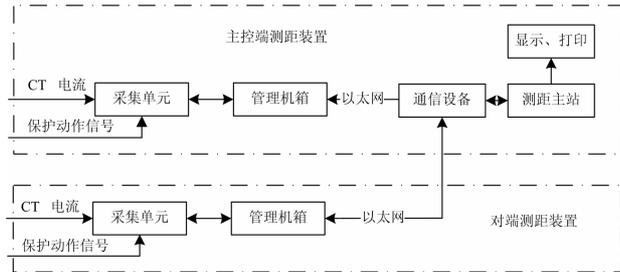


图 1 WFL-2012 系统示意图
Fig. 1 WFL-2012 system structure

2 装置硬件结构

管理机箱采用标准的 5U 的 19 英寸工业机箱,采集单元采用 5U 的 19/3 英寸工业机箱。接线采用后部进出方式设计,机箱 CT 插件采用前拔插,其余插件均采用后插拔设计,方便现场配线与维护。

设备中的板卡主要包含 CPU 插件、采集插件、信号变换插件、开入开出插件和电源插件。其中 CPU 插件如图 2 所示,采用 COM-E 嵌入式计算机

模块,具有 128 GB 的 SATA 接口固态硬盘,作为大容量的数据存储区;扩展 USB 口作为可移动的存储空间,实现数据拷贝、程序更新等作用。

装置具有电 B 码或光 B 码两路授时接口,一路用于长期授时,另外一路用于接入校准用标准授时信号,当线路两端的安装设备接入的授时信号具有误差时,可以在安装时通过临时接入标准授时信息进行校准;同时设备内置 10 M 高稳晶振,实现守时功能,在失去外部时钟信号时在短时间内保证时间可用。

系统采样频率高达 1.25 MHz(传统的测距装置采样率一般在 1 M 以内),高速采集插件通过 CPU 板发送的 B 码授时脉冲来实现同步,其采用 2 MHz 采样率的 AD 芯片,前置带通滤波电路,带宽大于 400 kHz,通过 FPGA 控制 AD 采样,通过 FPGA 外挂的 DDR2 形成高速采样数据缓存区,并将抽点降频后数据送至 DSP 进行启动判断,当满足启动条件后,DSP 触发 FPGA 进行数据录波并写入启动原因,然后将预存数据和后续数据上送。

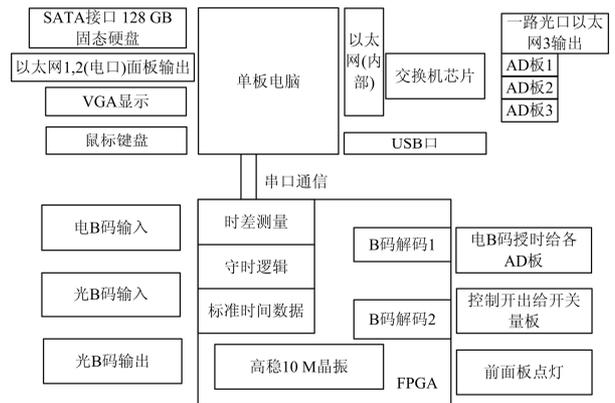


图 2 CPU 插件功能示意图
Fig. 2 CPU plug-in function structure

装置高速 AD 采集板中采用美国 TI 公司生产的高速 AD 芯片 ADS8413,其分辨率为 16 bit,最高采样速率为 2-MSPS,每块芯片为单通道。进入测距装置的被测信号经 CT 转换后,变为单端弱电流信号经过全差分调理电路,转换为差分信号进入 ADS8413 的模拟端输入。模拟差分信号进入 ADS8413 后经过模数转换通过 1 对差分脚输出串行数字信号,该数字信号的频率及其同步时钟的频率均为固定的 200 Mbps,后续的 FPGA 芯片对所有的 AD 数字信号接收并解码。

3 装置的软件架构

装置 CPU 插件和采集插件的 ARM 芯片中均内

嵌了 QNX 嵌入式操作系统, 它们之间通过 QNX 系统自带的 Qnet 协议交换数据。

Qnet 是 QNX 操作系统的一个内部规约, 它将“信任”的一群计算机组成一个内部网络, Qnet 让这些机器共享它们的资源, 通过 Qnet 可以象操作本地文件一样操作网络上其他机器的文件, 同时还可以对其他机器进行控制, 如启停进程、文件拷贝等。

采集插件的软件流程如下: 1) 上电后完成操作系统、DSP、FPGA 程序的下载、运行。2) 下载各线路、通道的配置信息。3) FPGA 高速、周而复始地将采样数据写入环形缓冲区, 同时将抽点后的低频采样数据发送给 DSP 进行启动判别。4) 当 DSP 满足启动判据后, 向 FPGA 发送触发命令。5) ARM 快速通过 FIFO 读取故障数据, 并通过 Qnet 将数据转发给 CPU 板。

在 WFL-2012 输电线路故障测距系统中, 每个采集插件上的软件系统通过拨码开关自动分配 IP 地址, 同时根据 IP 地址将其映射到 Qnet 网络上, 并提供一个类似“资源管理器”的共享文件句柄/dev/x.x.x.x (x.x.x.x 是 IP 地址), 装置 CPU 板中包含主管理模块、人机显示模块内部通信模块和外部通信模块, 其中内部通信模块通过 Qnet 自动搜寻所有的采集插件, 当得到“有故障数据”通知后通过 Qnet 将数据快速上传到 CPU 板并保持到固态硬盘, 外部通信模块监测到故障数据后将其转发到远方或就地主站, 人机显示模块提供友好的人机交互界面。

4 装置的启动算法

4.1 故障测距装置启动算法技术特点

输电线路故障测距装置与保护装置相比较, 其启动算法有以下特点:

1) 允许误动, 故障测距装置要保证线路故障时必须正确启动, 而作为测量装置, 又允许一定的误启动^[12]。

2) 快速启动, 故障测距装置由于采样率较高, 录波时长相对保护、录波相对较短, 要求装置必须能在线路故障发生后半个周波 (10 ms) 以内快速启动。

在 WFL-2012 系统中针对不同的线路, 启动判据分为交流线路启动判据和直流线路启动判据两种。

4.2 交流线路启动算法

交流线路启动判据包括以下五种: 零序电流突变启动、负序电流突变启动、线电流突变启动、零序限时越限启动和负序限时越限启动, 为了保障不同故障电流变化情况下的启动可靠性, 在实际运行

中只要有一项判据满足条件即启动。

(1) 零序电流突变启动算法

计算 3 倍电流零序分量, 判断当前时刻 3 倍电流零序分量与前一周期对应时刻 3 倍电流零序分量的差值绝对值大小实现启动。

(2) 负序电流突变启动算法

计算电流负序分量, 判断当前周期电流负序分量与前一周期对应时刻电流负序分量的差值绝对值大小实现启动。

(3) 线电流突变启动算法

计算当前周期线电流与前一周期的线电流的差值绝对值, 同时计算前一周期的线电流与前两周期的线电流的差值绝对值, 判断两个绝对值的差值绝对值大小实现启动。

(4) 零序限时越限启动算法

计算一个周期电流零序分量各采样点绝对值的和, 经系数处理计算出零序分量有效值, 比较当前采样时刻求出有效值与前两周期对应时刻求出的有效值大小, 超越一定限值实现启动。

(5) 负序限时越限启动算法

计算一个周期电流负序分量各采样点绝对值的和, 经系数处理计算出负序分量有效值, 比较当前采样时刻求出有效值与前两周期对应时刻求出的有效值大小, 超越一定限值实现启动。

4.3 直流线路启动算法

直流线路启动算法与交流线路启动算法在原理上有较大区别, 且具有以下特点:

1) 要求的采样频率更高。虽然行波测距装置的采样频率要求在 512 k 以上, 但是因为启动判据中涉及大量计算, 所以为了减少 DSP 开销, 必须进行数据抽点降速处理, WFL-2012 系统交流启动算法的采样频率为 5 k。直流线路电压变化特点是突变后持续时间短, 实际运行数据表明, 电压突变最短时间可在 200 μ s 以内, 这就要求直流线路测距装置启动算法采样率要远高于交流线路启动算法^[13]。不同采样频率下, 典型直流线路 du/dt 波形对比如图 3 所示, 由图可见在低速或中速采样的情况下, 故障特征非常不明显, 这就造成判据可能无法启动, 所以 WFL-2012 系统直流启动算法的采样频率为 50 k。

2) 对于直流线路故障测距装置而言, 一般是通过 PLC (噪声滤波器) 间接测量线路电压而非直接测量线路电压, 因此, 其启动定值在设计上与 PLC 的电容参数相关, 也与直流线路参数相关。

直流线路启动判据包括以下三种启动判据算法: 变化启动、极差启动、突变启动。

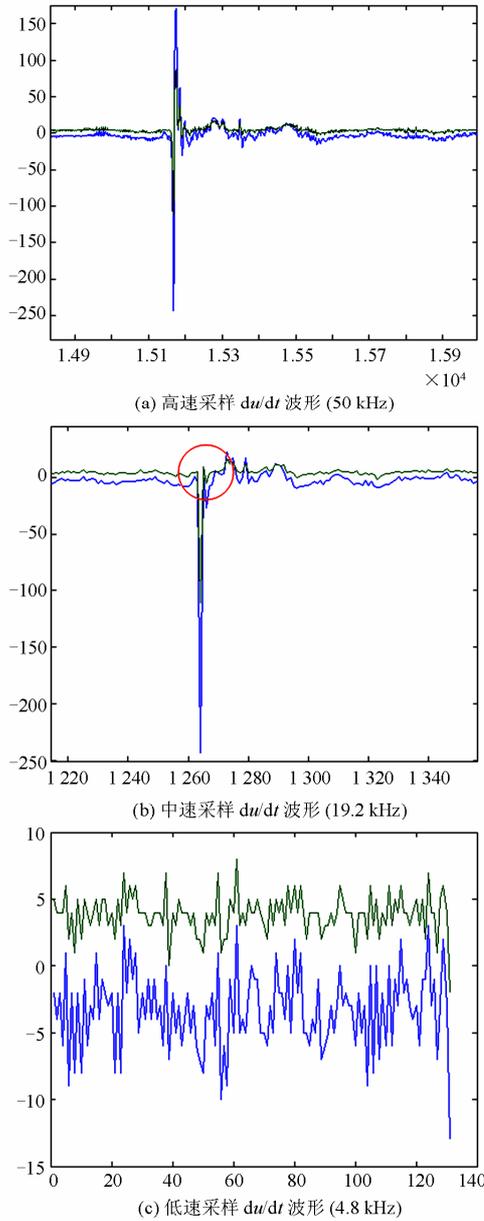


图3 不同采样频率波形对比

Fig. 3 Wave comparison between different sampling rate

(1) 变化量启动算法

根据 du/dt 变化情况,连续 n 点 du/dt 超过定值,装置启动,与直流行波保护原理基本一致。

(2) 极差量启动算法

根据两相(两极)间幅值差情况,连续 n 点极差超过定值,装置启动,与直流行波保护原理一致。

(3) 突变量启动算法

根据 du/dt 连续变化情况,连续 n 点 du/dt 绝对值叠加增大,装置启动。

5 小波变换的测距算法的改进

行波是指某一物理量的空间分布形态随着时间的推移振幅不变的情况下向一定的方向行进形成的无限波^[14]。电力线路在输送电能时是以电磁波的形式传播的,其中的行波传播速度接近于光速。在电力线路故障开始的瞬间,各种暂态分量非常丰富,以往因不能正确区分干扰信号与故障产生的暂态分量信号,而将暂态分量当作噪声滤除了,实际上暂态分量中包含了大量的故障信息,这也包含行波的“突变信号”^[15]。

小波变换是一种数学方法,在信号处理领域里用途广泛,基于小波变换的行波法故障测距的主要是通过小波变换检测故障行波信号的突变点^[16]。信号的突变点是描述暂态信号的重要特征,它携带着信号的重要信息。小波变换具有“变焦”特性,可以用于信号的突变点检测。实函数 $\theta(x) = \theta\left(\frac{1}{1+x^2}\right)$ 如果满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(x)dx = 1$, 则称之为平滑函数。平滑函数可以看作低通滤波器的冲激响应。令 $\theta_s(x) = \frac{1}{s}\theta\left(\frac{x}{s}\right)$, 设小波函数 $\psi(x)$ 是平滑函数的一阶导数,即 $\psi(x) = \frac{d\theta(x)}{dx}$, 则 $f(x)$ 的小波变换为

$$Wf(s, x) = f \cdot \psi_s(x) = f \cdot \left(s \frac{d\theta_s}{dx} \right) (x) = s \frac{d\theta_s}{dx} (f \cdot \theta_s)(x)$$

可见,小波变换 $Wf(s, x)$ 与 $f(x)$ 被 $\theta_s(x)$ 平滑之后的一阶导数成正比。对一个固定的尺度 s , $(x \cdot s) f_M$ 沿 x 变量的局部极值点对应着 $f(x) \cdot \theta_s(x)$ 的拐点,即 $f(x)$ 的突变点。因此,若选择小波函数为平滑函数的一阶导数,则由其小波变换模极大点可以检测到信号的突变点,在选择合适的小波时,模极大值的幅值可以表征信号的突变程度。

行波传播过程中的色散,使行波波头能量分散,这时仅通过行波外观很难确定行波到达时间^[17]。色散情况取决于行波的传播距离和线路参数等,行波传播中的色散越大,行波波头能量越分散,表示行波到达时间的特征点就越难确定。

行波法故障测距的精髓是通过选择合适的小波对行波线模进行变换,将行波线模中的某种外观不明显、位置不易精确确定的特征点,转变为小波变换域的特征明显、位置可精确确定的另一种特征点,然后由小波变换域的这种特征点的位置确定行波到达时间,由行波波头线模到达线路两端的时间差即可确定出故障位置,计算公式为

$$x = L - (t_m - t_n) \cdot v / 2$$

其中: x 为故障点位置; L 为线路全长; t_m 、 t_n 分别为故障后行波波头到达线路两端 (M、N) 的绝对时刻; v 为行波波速。由上式可知, 波速及故障时刻是决定行波测距精度的主要因素, 而波头时刻又和波速相关。

在算法方面 WFL-2012 输电线路故障测距系统在以下两个方面进行了改进:

(1) 提高装置的采样频率

行波故障测距装置对采样频率的要求主要基于以下两点:

a) 较高的采样频率有利于提取暂态行波信号, 常规 CT 的信号上限频率为 100 kHz, 因此, 行波故障测距装置的采样频率至少应在 200 kHz 以上, 同时, 较高的采样频率也有利于对信号细节部分的提取。

b) 故障测距计算中根据信号突变点出现时刻确定故障发生时刻。对于连续信号而言, 提高采样频率, 可以减少相邻采样点间隔, 提高了时间分辨率。在确定行波传输波速后, 每个采样点时间差乘以波速所得距离即为测距误差。因此, 采样点间隔越小, 装置的采样频率越高, 对提高测距精度越有利。

(2) 波速与故障时刻的有效结合

传统行波测距通过选择信号的主导分析频带, 确定一个固定波速, 根据线路全长及波头时刻计算故障距离。但实际运行中存在以下问题:

a) 如前所述, 故障行波传输过程中会发生色散, 信号频带范围较宽的同时, 波头能量相对分散, 这就导致主导频带难以选择。

b) 在小尺度下分析受白噪、故障点位置等因素影响较大; 在大尺度分析下, 小波变换对噪声进行了一定的平滑, 极值点相对稳定便于识别, 但时间分辨率精度相对较低, 选择单一尺度分析难以应对各种故障情况。

WFL-2012 输电线路故障测距系统采用多尺度分析替代了传统的主导频带分析, 多尺度分析下, 双端行波测距公式修正为

$$\begin{cases} x_1 = \frac{L - (t_m - t_n) \cdot v_1}{2} \\ x_2 = \frac{L - (t'_m - t'_n) \cdot v_2}{2} \\ \vdots \\ x_n = \frac{L - (t''_m - t''_n) \cdot v_n}{2} \end{cases}$$

式中: t_m 、 t'_m 、 t''_m 、 t_n 、 t'_n 、 t''_n 为不同尺度下, 初

始行波波头到达线路两侧时间; v_1 、 v_2 、 v_n 为不同尺度下暂态行波在线路传播波速。通过测试表明, 相对单一尺度分析, 经过多尺度分析后, 故障测距精度的稳定性有了显著提高, 表 1 给出了模拟 20 次不同故障点的各种故障, 两种分析方法测距结果大于 150 m 的结果对比如表 1。

表 1 多尺度分析与单一尺度分析测距结果对比
Table 1 Fault location comparison between multiscale analysis and singlescale analysis

| | 单一尺度分析 | 多尺度分析 |
|-------------------|--------|-------|
| 线路 M 端单相接地故障 | 1 | 0 |
| 线路 N 端单相接地故障 | 1 | 0 |
| 线路中点单相接地故障 | 0 | 0 |
| 线路 M 端单相经过渡电阻接地故障 | 3 | 1 |
| 线路 N 端单相经过渡电阻接地故障 | 3 | 1 |
| 线路中点单相经过渡电阻接地故障 | 2 | 0 |
| 线路 M 端两相接地故障 | 1 | 0 |
| 线路 N 端两相接地故障 | 1 | 0 |
| 线路中点两相接地故障 | 0 | 0 |
| 线路 M 端两相经过渡电阻接地故障 | 3 | 0 |
| 线路 N 端两相经过渡电阻接地故障 | 3 | 0 |
| 线路中点两相经过渡电阻接地故障 | 2 | 0 |
| 线路 M 端三相接地故障 | 1 | 0 |
| 线路 N 端三相接地故障 | 2 | 0 |
| 线路中点三相接地故障 | 1 | 0 |
| 线路 M 端三相经过渡电阻接地故障 | 3 | 1 |
| 线路 N 端三相经过渡电阻接地故障 | 2 | 0 |
| 线路中点三相经过渡电阻接地故障 | 2 | 0 |

6 智能变电站的接入

传统变电站测距装置与智能变电站测距装置有很多差别, 首先是接入方式不同。传统变电站测距装置在结构上采用集中式采样方式, 数据集中处理发布, 一般通过传统电流互感器直接接入模拟量信号, 并且需要将电缆引入控制室内进行采样, 而智能变电站测距装置采用分层分布式结构, 因此需要实现分布式就地采集, 但与其他 IED 设备不同之处在于采用小波变换的行波法故障测距对采样频率的要求很高, 要求 ≥ 500 kHz, 而目前智能变电站通过合并单元 (Merging Unit) 发送的 SV 报文的采样频率通常只有 4 000 Hz, 因此不能采用接收 MU 发送 SV 报文的形式进行故障测距, 而一般采用通过私有协议与电子式电流互感器进行数据交互。WFL-2012 测距装置目前采用的方法是使用专用的光口接收板, 替换传统的模拟采集板, 光口接收板上没有传

统的AD转换模块,而是通过光口接收端子实时接收电子式电流互感器下传的高速串行数据,然后通过FPGA转换为传统的数据格式,其中电子式互感器与WFL-2012之间采用多模光纤,高位(对应UART空闲位)定义为“光纤灭”,低位定义为“光纤亮”,通信波特率不低于10 Mbps,采用1位起始位(低电平)、16位数据位(高位在前)、1位奇校验位、1位停止位(高电平)的串行通信模式。

其次在智能变电站装置的站内通信基本上都遵循 IEC 61850 标准,采用统一的抽象模型构建方法,使之具有通用的信息服务,这就从根本上保证了互操作性的实现。因为在信息模型上与故障录波器非常相似,因此故障测距装置可以参考故障录波器进行建模。

7 结论

本文介绍的基于 Qnet 协议的新型输电线路故障测距装置具有采样率高、测距准确、配置灵活、通用性强等多种特点,可广泛应用于 220 kV 及其以上电压等级的线路故障测距。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
GE Yao-zhong. New types of relay protection and fault location: theory and techniques[M]. Xi 'an: Xi 'an Jiaotong University Press, 1996.
- [2] 郑秀玉, 丁坚勇, 黄娜. 输电线路单端故障定位的阻抗行波组合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 18-21.
ZHENG Xiu-yu, DING Jian-yong, HUANG Na. Impedance-traveling wave assembled algorithm of one-terminal fault location for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 18-21.
- [3] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 新型输电线路故障测距装置的研制[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 17-21.
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. A new device for fault location of transmission line[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 17-21.
- [4] 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 Bing-yin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern fault location techniques based on fault generated travelling wave and their applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62-65.
- [5] 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 Li-ping, WANG He-chun. Single terminal method of travelling wave fault location using wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 62-65.
- [6] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10.
QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao, et al. A new double terminal method of travelling wave fault location using wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6-10.
- [7] 李胜芳, 范春菊, 郁惟镛. T型支接线路的自适应故障测距算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 61-66.
LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong. Adaptive fault location method for three-terminal transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 61-66.
- [8] 姚亮, 陈福锋, 陈琦. 一种应用于T接线路的自适应故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 26-30.
YAO Liang, CHEN Fu-feng, CHEN Qi. An adaptive method of fault locator for T transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 26-30.
- [9] 叶恒. 基于PMU的双端同步故障测距算法的研究[J]. 江西电力, 2010, 34(3): 22-25.
YE Heng. A new fault location algorithm for double-terminal transmission lines based on synchronized phasor measurement[J]. Jiangxi Electric Power, 2010, 34(3): 22-25.
- [10] 王增平, 林富洪. 基于同步相量测量的N端输电线路故障测距新算法[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 154-160.
WANG Zeng-ping, LIN Fu-hong. A new fault location algorithm for N-terminal transmission lines based on synchronized phasor measurement[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 154-160.
- [11] 郭宁明, 覃剑, 汤飞, 等. 智能电网行波故障测距系统应用方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 72-76.
GUO Ning-ming, QIN Jian, TANG Fei, et al. Application

- of transmission lines traveling wave fault location system in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 72-76.
- [12] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 261-265.
XU Min, CAI Ze-xiang, LIU Yong-hao. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 261-265.
- [13] 王钢, 徐子利, 梁远升, 等. 基于故障电弧方波曲线相似度的输电线路单端故障测距域算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 109-112.
WANG Gang, XU Zi-li, LIANG Yuan-sheng, et al. Single terminal time domain fault location method based on the similarity of square wave for arc grounding fault[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 109-112.
- [14] 伯罗斯·C·西德尼. 小波与小波变换理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
BURRUS C S. Introduction to wavelets and wavelet transforms[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [15] 周濂, 卢毅, 廖瑞金, 等. 基于小波包提取算法和相关分析的电缆双端行波测距[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 1-4.
ZHOU Quan, LU Yi, LIAO Rui-jin, et al. Double terminal traveling wave fault location for cable based on the wavelet packet extraction algorithm and correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 1-4.
- [16] 尹晓光, 宋琳琳, 尤志, 等. 与波速无关的输电线路双端行波故障测距研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 35-39.
YIN Xiao-guang, SONG Lin-lin, YOU Zhi, et al. Study of fault locating for transmission line double terminal traveling waves unrelated to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 35-39.
- [17] 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): 82-86.
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): 82-86.

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2013-10-31

作者简介:

许勇(1971-), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 从事系统稳定控制、继电保护、WAMS等系统工作; E-mail: xuyongl@sgepri.sgcc.com.cn

牛永会(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统分析, 系统稳定控制等工作;

郭宁明(1980-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统分析、电力系统自动化工作。