

# 配电网电缆故障在线监测及定位系统

郭自刚 徐天乐 陈玉林 王光 陈俊

(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

**摘要** 本文开发一套配电网电缆故障在线监测及定位系统, 可实现局部放电监测预警、护层环流监测预警、行波选线、行波测距功能。系统采用高精度对时同步技术, 通道间和装置间同步采集, 可同时监测多回路、多相电缆; 采用无死区记录和行波启动确认技术, 可以准确记录故障原始波形, 方便故障分析与处理; 采用行波波头准确识别和测距模式选择技术, 提高电缆故障定位的准确性。该系统集成度高, 适用于复杂的配电网系统, 具有较高的推广价值。

**关键词:** 配电网电缆; 在线监测; 局部放电 (PD); 行波选线; 行波定位 (TWFL)

## On-line monitoring and locating system for cable fault in distribution network

GUO Zigang XU Tianle CHEN Yulin WANG Guang CHEN Jun

(NR Electric Co., Ltd, Nanjing 211102)

**Abstract** In this paper, a set of on-line monitoring and locating system for cable fault in distribution network is proposed, which includes the functions of partial discharge monitoring, sheath circulation monitoring, traveling wave fault line selection and traveling wave fault location. High precision time synchronization technology is adopted in this system to realize synchronous acquisition between channels and devices, and multi-loop and multi-phase cable can be monitored simultaneously. Reliable startup of traveling wave and non-dead zone recording technology are used to accurately record the original waveform of the fault, which is convenient for fault analysis and processing. The accurate identification and location mode selection technology of traveling wave is adopted to improve the accuracy of cable fault location. The system is highly integrated and suitable for complex distribution system, which has high popularization value.

**Keywords:** distribution network cable; on-line monitoring; partial discharge (PD); traveling wave fault line selection; traveling wave fault location (TWFL)

## 0 引言

电缆线路具有供电可靠性高、安全性好、不占地面空间等优势, 已经成为城市配电网建设的主要方向, 并逐渐在钢铁、石化、煤矿等工矿企业电网中广泛应用。配电网系统中电缆敷设环境复杂隐蔽, 分支众多, 一旦发生电缆故障, 不易定位, 给故障的排查和检修带来诸多不便。目前通用做法是利用配电网自动化系统或故障指示器等设备定位出故障区段, 然后在设备停电后再采用离线式测距设备定位故障点, 整个过程需要花费大量时间和人力<sup>[1-5]</sup>。因此, 现场用户更加关注在线监测或定位系统的应

用及发展。

现有的配电网电缆故障在线监测或定位系统通常在各条电缆上布置各种传感器和监测装置, 分别监测局部放电、护层环流、故障行波等信息, 然后将各装置采集的数据上送到主站进行分析处理。文献[6]采用脉冲电流法并结合配电网电缆连接方式, 实现 10kV 电缆的局部放电检测及定位。文献[7]提出一种电缆接地环流在线监测系统, 采集电缆护层接地环流和表面温度, 通过通用分组无线服务 (general packet radio service, GPRS) 网络发送到上位机进行分析处理和展示。文献[8]提出一种小电流接地系统故障选线方法, 根据方向行波能量的大小关系提高

故障支路与健全支路的区分度，实现对故障线路的可靠识别。文献[9]提出一种配电网单相接地故障检测与定位系统，利用零模电压判断是否发生故障，并选用 B 型行波法对故障进行测距。由于配电网电缆分支众多，上述各类监测装置功能单一，导致全站监测装置数量众多且接线复杂，存在监测信息分散的缺陷；另外，不同装置之间采集不同步，也会影响监测分析结果的准确性和可靠性。

本文提出一套配电网电缆故障在线监测及定位系统，采用高集成“四合一”方案，可实现故障前的局部放电监测预警、护层环流监测预警，故障后的行波选线、行波测距功能。该系统采用高精度对时同步技术、行波可靠启动和无死区记录技术、行波波头准确识别和测距模式选择技术，系统集成度高，适用于复杂的配电网系统。

### 1 系统架构

#### 1.1 整体架构

配电网电缆故障在线监测及定位系统由三部分构成，包括监测定位装置、主站和通信网络。对于城市配电网，监测定位装置一般安装在环网柜、变电站母线处，主站一般安装在控制中心，监测定位装置和主站之间可以通过光纤网或无线网络通信，监测定位装置之间通过高精度全球定位系统(global position system, GPS)或北斗对时系统进行时钟同步。城市配电网系统架构如图 1 所示。

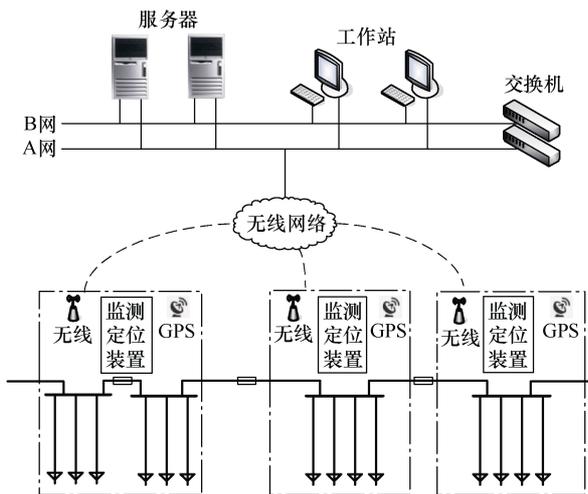


图 1 城市配电网系统架构

对于工矿企业电网，监测定位装置和主站一般安装在就地的屏柜，监测定位装置和主站之间可以通过光纤网或以太网通信，监测定位装置之间通过

外部时钟源实现精确时间同步。以 35kV 电压等级电缆为例，工矿企业电网系统架构如图 2 所示。

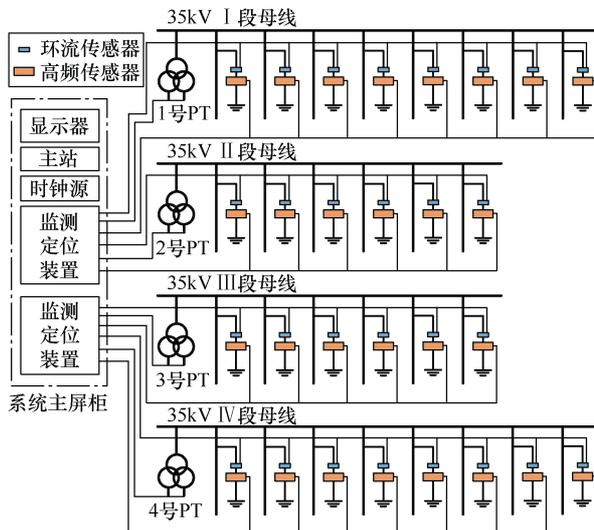


图 2 工矿企业电网系统架构

#### 1.2 监测定位装置硬件架构

监测定位装置硬件架构如图 3 所示，包括给装置供电的电源板卡、中央处理器（center processing unit, CPU）板卡、环流信号监测板卡、电压行波监测板卡、电流行波监测板卡、对时板卡，各板卡均通过高速总线相连，并通过高速总线传递信息。监测定位装置可以外接采样所需的高频传感器、环流传感器和母线电压互感器(potential transformer, PT)二次信号。其中，高频传感器可以根据现场情况配置局部放电高频传感器或电流行波传感器，接入电流行波监测板卡后经过处理形成局部放电信号或电流行波信号。单台监测定位装置最多支持 24 条配电网电缆的环流信号、电流行波信号或局部放电信号的接入，还可支持两段母线三相和零序电压行波信号的接入。

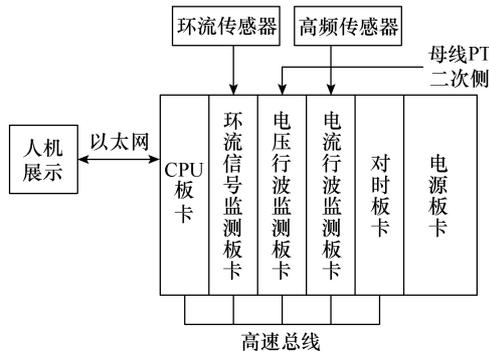


图 3 监测定位装置硬件架构

## 2 主要功能

### 2.1 局部放电监测预警

国内外研究成果和运行经验表明：交联聚乙烯（cross linked polyethylene, XLPE）电力电缆绝缘介质的树枝状老化能够决定电缆的使用寿命，建议采用局部放电测量等有效手段来定量分析电缆绝缘的树枝状老化程度<sup>[10]</sup>。

通过在电缆终端的屏蔽层接地线上安装高频传感器，用于采集局部放电信号；高频传感器和监测定位装置之间通过同轴电缆相连。该监测方案可以对电缆终端头和电缆本体进行局部放电监测。

当局部放电的幅值、频次有异常变化时，监测系统及时发出警报，还可通过监视局部放电信号的长期变化趋势，进行趋势报警，在电缆故障前提前发出警告。

### 2.2 护层环流监测预警

当电缆正常带电运行时，会在电缆的金属护层上感应出环流，正常情况下护层环流很小。当发生电缆外护套绝缘下降、接地不良、金属护层接地错误等问题时，护层环流会异常增大，对电缆运行安全造成威胁。

护层环流传感器安装在电缆终端的金属屏蔽层接地线上，用于采集护层环流信号，然后送给监测定位装置。

当护层环流有异常变化时监测系统及时发出警报，还可通过监视护层环流的长期变化趋势，进行趋势报警，保障电缆安全运行。

### 2.3 行波选线

对于中性点非有效接地系统，当变电站的母线上发生单相接地或同一母线上所接的多条馈线之一发生单相接地故障时，单纯依靠零序电压无法判断故障线路<sup>[11]</sup>。

小电流接地系统尤其是经消弧线圈接地系统，单相接地故障特征不明显，基于稳态零序电流的选线算法无法准确选取。由于单相接地故障的暂态过程很短，基于暂态零序电流的选线算法，要求装置采样率很高，且能准确提取暂态的故障特征，才能保证接地故障选线的准确率。

基于行波暂态波形和小波算法的接地故障选线技术，分析行波暂态波形的幅值和极性特征，本文研制的系统可以准确区分故障点位于母线还是某条电缆，实现接地故障选线。

### 2.4 行波测距

现场排查电缆故障往往需要花费大量人力物力，精确定位故障点能够有效减轻人工巡线的负担并缩短排查时间，减少停电导致的经济损失，具有重大意义。

故障引起的电磁场突变沿线路行进，称为行波，行波测距原理如图 4 所示。

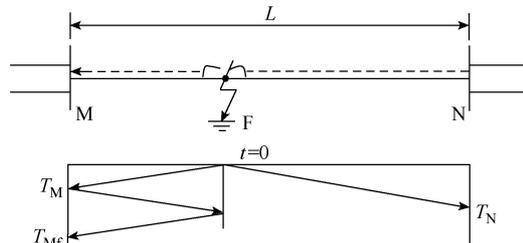


图 4 行波测距原理

利用行波往返于故障点的时间差，可以实现单端行波测距。

$$D_{MF} = \frac{1}{2}v(T_{MF} - T_M) \quad (1)$$

式中： $v$  为行波在电缆中的传播速度； $T_M$  为初始行波浪涌到达测量端 M 的时刻； $T_{MF}$  为经故障点反射后到达测量端 M 的时刻； $D_{MF}$  为故障点 F 距离测量端 M 的距离。

利用行波到达线路两端的时间差，可以实现双端行波测距。

$$D_{MF} = \frac{1}{2}[v(T_M - T_N) + L] \quad (2)$$

式中： $T_M$  和  $T_N$  分别为故障初始行波浪涌到达 M 端和 N 端母线的时刻； $L$  为电缆全长。

## 3 关键技术研究

配电网电缆分支众多，行波的折反射比架空线更加复杂。架空线的行波测距只需定位到两杆塔之间，要求精度几百米；而修复地下电缆时要挖开土壤，要求定位精度在 20m 以内。这些因素都增加了配电网电缆的在线测距难度。

针对上述难点，需要研究高精度对时同步、行波可靠启动和无死区记录、行波波头准确识别和测距模式选择等关键技术。

### 3.1 高精度对时同步

XLPE 电缆的行波波速约为 200m/ $\mu$ s，由行波测距公式（1）和式（2）可知，为了满足电缆定位精度在 20m 以内的要求，需要提高对时精度至 0.2 $\mu$ s 以内。

监测定位装置对时板卡支持外接 GPS/北斗时钟信号,也支持接入外部时钟源的 B 码 (inter range instrumentation group-B, IRIG-B) 信号。对时板卡硬件采用温补晶振来提高时钟精度,软件对秒脉冲 (pulses per second, PPS) 的边沿抖动进行算法补偿<sup>[11]</sup>,然后通过低延迟时钟总线,输出 PPS 时钟给不同的行波监测板卡。行波监测板卡通过现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 芯片控制高速模数转换器 (analog digital converter, ADC) 芯片对行波信号进行 25MHz 的高速采样,所采集的数据可打上精度为 40ns 的时间标签。各行波监测板卡的波形数据送到 CPU 板卡后会进行波形对齐处理,确保不同板卡之间、同一板卡的不同通道之间数据采集同步。

样机测试表明,本文设计的时钟同步方案接口简洁、结构可靠、时间准确度高,可以满足配电网电缆定位准确度需求。

### 3.2 无死区记录和行波启动确认

为了检测比较微弱的行波信号,行波启动门槛通常设置得较为灵敏;但电网中的开关操作、负荷投切、雷击导线等外部干扰,都可能导致行波误启动<sup>[12]</sup>。为了提高配电网电缆的定位精度,监测定位装置对行波信号进行 25MHz 的高速采样,导致行波数据缓存及传输压力大,如果不采取措施,在外部干扰频繁的情况下,监测定位装置可能错失真正的故障时刻,形成记录死区。可通过如下两项关键技术解决以上问题。

1) 基于大容量双倍速同步动态随机存储器 (double data RAM, DDR) 的二级缓存技术和总线传输技术,实现无死区记录<sup>[12]</sup>。

首先,电流或电压行波监测板卡的 FPGA 将行波采集数据实时推送到本板卡的大容量 DDR 进行一级数据循环缓存,可保存 30ms 以内的数据,使 CPU 板卡有足够时间进行行波启动确认。当行波监测板卡检测到行波突变启动时,FPGA 将启动前后的一段录波数据 (2~10ms) 从一级循环缓存区搬运到 DDR 的二级缓存中,循环缓存最近 16 次行波录波数据块,以供行波监测板卡进行初步分析。最后,行波监测板卡将初步分析结果和有效的行波录波数据块通过装置内部高速总线分帧传输到 CPU 板卡,最终保存到非易失性存储介质中。

2) 利用工频电压和保护启动信息进行行波启动确认。

在行波启动后 30ms 内 CPU 板卡通过工频电压或保护启动信号进行确认,当满足零序电压高、负序电压高、相间电压低等条件,或接收到保护装置启动信号时,才认为此次行波启动是有效的,否则丢弃此次行波启动的缓存数据。CPU 板卡通知行波监测板卡只传送有效的行波录波数据块,无效的行波数据在行波监测板卡上被自动循环覆盖。

通过上述两项关键技术,既可实现行波数据的无死区记录,又可避免无效行波数据的传输和保存。

### 3.3 行波波头准确识别和测距模式选择

通过相模变换实现三相系统解耦,利用小波变换模极大值理论获取故障行波波头,模极大值点对应行波波头的到达时刻<sup>[13]</sup>。由于采用 3.1 节所述的高精度对时同步技术,行波波头的时间分辨率小于 40ns,可以有效提高定位精度。

对于工矿企业电网,一般为单端电源供电,结构相对简单,行波反射波较容易识别,可采用单端行波测距。对于母线上电缆馈线数量较多的情况,电流行波比电压行波故障特征更明显,采用单端电流行波测距方法定位故障;对于只带负荷变压器的单出线系统,电压行波比电流行波故障特征更明显,采用单端电压行波测距方法定位故障<sup>[14]</sup>。

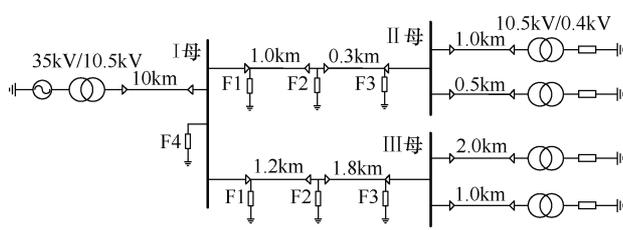
对于城市配电网,一般为环网供电,每个开闭所和环网柜均有多个电缆间隔,结构相对复杂,很难准确识别行波的反射波<sup>[15]</sup>,但行波的首波头识别相对容易,宜采用双端行波测距。如图 1 所示,在每个开闭所和环网柜均安装监测定位装置,装置外接 GPS/北斗天线并进行高精度对时同步,然后将打上高精度时标的电流或电压行波数据上送给主站。主站根据配电网电缆的拓扑结构分析行波暂态波形的幅值和极性特征,定位故障线路;最后对故障线路两端进行双端行波测距,从而准确定位故障位置。

## 4 试验验证

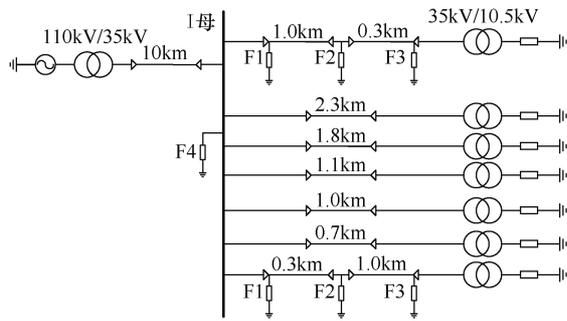
为验证监测定位系统的性能,本文进行仿真测试和模拟电缆故障测试。

### 4.1 仿真测试

利用电力系统仿真软件 PSCAD 进行 35kV/10kV 配电网电缆故障仿真测试,采用 YJV32 型电缆,铜芯导体截面积为 300mm<sup>2</sup>,绝缘标称厚度 3.4mm,外径 42.4mm。针对城市配电网和工矿企业电网的架构,分别搭建仿真模型如图 5 所示。



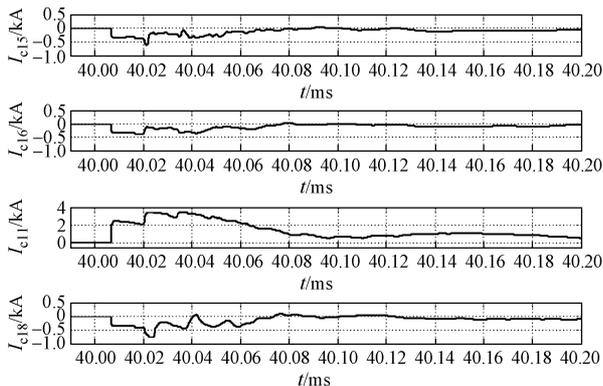
(a) 城市配电网



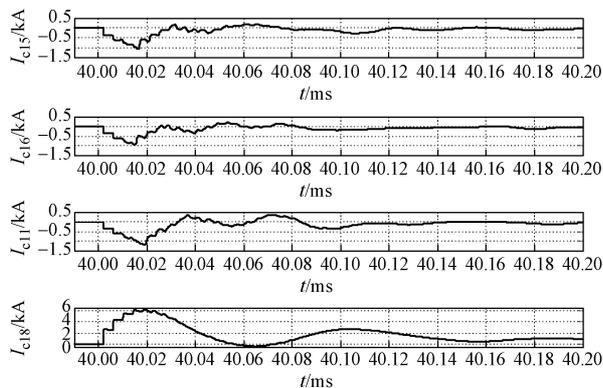
(b) 工矿企业电网

图5 PSCAD 仿真模型

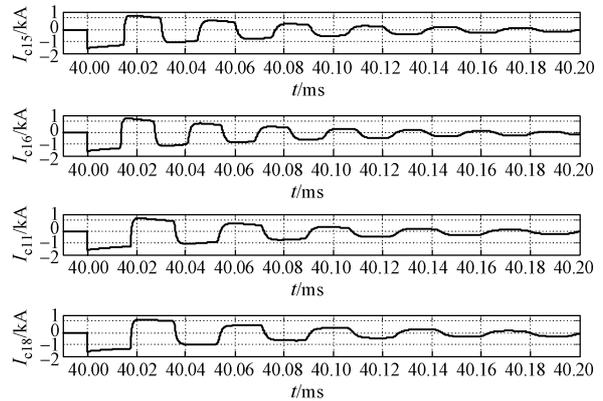
针对1号电缆(单芯)和8号电缆(三芯),分别在电缆首端、中间和尾端位置模拟单相接地故障;为了区分电缆接地和母线接地,还模拟了母线接地故障。部分仿真波形如图6所示,其中横轴是故障



(a) 1号电缆 C 相接地故障



(b) 8号电缆 C 相接地故障



(c) 母线 C 相接地故障

图6 PSCAD 仿真波形

时间,纵轴是电流行波幅值,从上至下分别是5号电缆 C 相电流行波、6号电缆 C 相电流行波、1号电缆 C 相电流行波、8号电缆 C 相电流行波。

利用行波测距校验仪对仿真波形数据进行故障回放,测试监测定位系统的行波选线性能,得到各种故障情况下的行波选线结果见表1。行波特征和仿真波形一致,验证了该系统可以准确区分故障点位于母线还是某条电缆。

表1 行波选线结果

故障类型	行波特征	行波选线结果
母线 C 相接地	同一母线上所有电缆首端电流初始行波极性相同、幅值相当	母线 C 相
1号电缆 C 相接地	1号电缆 C 相的电流初始行波幅值远大于非故障电缆,其行波极性与非故障电缆相反	1号电缆 C 相
8号电缆 C 相接地	8号电缆 C 相的电流初始行波幅值远大于非故障电缆,其行波极性与非故障电缆相反	8号电缆 C 相

## 4.2 动模测试

为了测试监测定位系统的行波测距性能,搭建配电网电缆行波定位动模系统,该系统由两台配电网电缆故障监测定位装置、501m 试验电缆(电缆型号 ZC—YJVP2—0.6/1kV)、信号发生器、示波器、同步时钟源五个部分及其之间的连接电缆组成。动模试验系统结构如图7所示。

分别设置故障点1,距试验电缆首端375m处;故障点2,距试验电缆首端450m处。信号发生器分别输出脉冲信号到故障点1和故障点2来模拟电缆故障。两台配电网电缆故障监测定位装置分别在电缆首端和尾端采集行波信号,利用同步时钟源对两台装置进行时钟同步。首端和尾端的行波信号接入

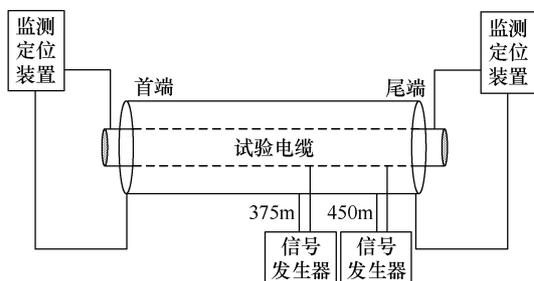


图7 动模试验系统结构

示波器，可以测定电缆的行波波速为 $206.8\text{m}/\mu\text{s}$ 。在每个故障点均进行若干次测试，分别进行首端、尾端的单端行波测试和双端行波测试，其中三次行波测距结果见表2。

表2 行波测距结果

单位: m

项目	故障位置	第1次测试		第2次测试		第3次测试	
		结果	误差	结果	误差	结果	误差
首端单端测距	375m处故障	366	-9	371	-4	380	5
	450m处故障	445	-5	454	4	442	-8
尾端单端测距	126m处故障	132	6	118	-8	129	3
	51m处故障	55	4	45	-6	48	-3
双端测距	375m处故障	372	-3	380	5	378	3
	450m处故障	453	3	447	-3	445	-5

测试结果表明，无论是单端行波测距还是双端行波测距，测距误差均小于 $10\text{m}$ ，双端测距相比单端测距误差更小，能够满足配电网电缆故障定位精度在 $20\text{m}$ 以内的需求。

## 5 结论

本文提出了一套配电网电缆故障在线监测及定位系统，并通过仿真测试和模拟电缆故障测试验证了该系统的可行性。本文得出结论如下：

1) 该系统采用高集成“四合一”方案，可实现电缆故障前的局部放电监测预警、护层环流监测预警，故障后的行波选线、行波测距功能。

2) 利用电缆首端电流初始行波的幅值和极性特征，可以实现单相接地故障选线，区分故障点是位于母线还是某条电缆。

3) 针对不同的配电网电缆架构，可以选择单端行波测距或双端行波测距；针对母线上电缆馈线数量的不同，可选择电流行波测距或电压行波测距。

4) 通过高精度定时同步、行波可靠启动和无死区记录、行波波头准确识别和测距模式选择等关键

技术的应用，本系统的行波测距误差小于 $10\text{m}$ ，能够满足工程应用需求。

该系统集成度高，适用于复杂的配电网系统，可在线监视电缆的绝缘状态，提前预警；电缆发生接地故障后可准确定位，有效减轻现场故障排查和检修的工作量，具有较高的推广价值。

## 参考文献

- [1] 孙东, 仇志华, 赵倩鹏, 等. 基于配网自动化的电缆配电网短路故障定位与隔离方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(10): 21-27.
- [2] 胡昕, 王礼. 开闭所侧配网电缆故障指示器的接地故障定位研究[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2013, 18(6): 38-41.
- [3] 宋勤, 王媛媛. 考虑金属护套和铠装结构的电缆故障测距方法[J]. 电气技术, 2020, 21(10): 71-76.
- [4] 陶宇航, 张熹, 宫祥龙. 10kV 电缆故障测距及定位典型案例研究[J]. 电气技术, 2022, 23(2): 88-93.
- [5] 时振堂, 孙进, 颜廷纯, 等. 交联聚乙烯电缆故障行波测距新方法研究[J]. 电气技术, 2019, 20(4): 56-60.
- [6] 黄超, 姚森敬, 张炜, 等. 配网 10kV 电缆脉冲电流法局放测试及定位技术的探讨[J]. 华东电力, 2014, 42(9): 1961-1965.
- [7] 吴明. 基于 GPRS 的 XLPE 电缆接地环流在线监测系统的设计与研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [8] 王建元, 朱永涛, 秦思远. 基于方向行波能量的小电流接地系统故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4085-4096.
- [9] 刘红文, 郭辉, 王科, 等. 高精度配网单相接地故障检测与定位系统研发[J]. 电气技术, 2020, 21(1): 60-66.
- [10] 张强. 电力电缆局部放电检测与模式识别的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [11] 中性点非有效接地系统单相接地故障行波选线装置技术要求: GB/T 35791—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [12] 丁晓兵, 陈玉林, 史泽兵, 等. 线路保护行波测距一体化装置设计与关键技术研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(6): 57-62.
- [13] 董新洲, 王珺, 施慎行. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 154-160.
- [14] 季涛. 基于暂态行波的配电线路故障测距研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [15] 苏珊珊. 电缆-架空线混合配电线路短路故障定位研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.

收稿日期: 2022-07-08

修回日期: 2022-08-19

作者简介

郭自刚(1979—), 男, 湖北省随州市人, 硕士, 高级工程师, 从事电气设备绝缘在线监测及故障诊断产品研发及开发工作。