

# 改造录波系统提高故障定位准确度的实用方法研究

为了解决输电线路高阻接地测距误差较大问题,提出了一种改造录波系统提高故障测距准确度的实用方法。该方法在原有的故障录波屏柜中加入二次零序电压行波采集单元,利用保信网络将信息上送调度端;测距主站接收调度端保信主站硬件设备转发的行波信息及故障简报,并对故障信息进行计算、显示及存储。工程应用表明该方法实施简单,在节约测距设备方面有明显优势。

冯宗建<sup>1</sup> 彭锦凤<sup>2</sup> 刘 明<sup>1</sup> 郑 曦<sup>1</sup> 伍燕青<sup>1</sup> / 1. 广东省深圳供电局  
2. 深圳市双合电气股份有限公司

## 0 引言

输电线路是电力系统的重要组成部分,承担着传送电能的重要任务。输电线路工作环境比较恶劣,是电力系统中更容易发生故障的环节,快速、准确的故障定位对于提高供电质量、减少停电损失、寻找故障薄弱点以及提高系统运行可靠性具有重要意义。

## 1 故障测距技术

### 1.1 故障测距方法

根据采用的线路模型、测量设备不同,故障测距的原理和方法主要可以分为阻抗法、故障分析法和行波法三类<sup>[1-8]</sup>。

阻抗法利用线路长度与阻抗成正比的关系,用线路故障时测量到的电压和电流量计算故障回路的阻抗,根据故障时线路阻抗与正常运行时线路阻抗的比值,求取故障位置。阻抗法原理简单,在故障测距技术发展初期得到广泛应用。

故障分析法利用故障时记录的电压和电流量对故障线路进行分析计算,求

得故障点到设备安装处的距离。

行波法是利用波传播理论进行输电线路的故障测距,使用输电线路分布参数模型对线路故障后测量到的暂态行波信号进行分析计算,确定故障发生位置。

### 1.2 国内故障测距应用简介

国内输电线路故障测距设备包括线路保护、故障录波装置和行波测距装置等。

线路保护及故障录波装置主要采用单端故障分析法,成本低、测距可靠性较高,但在高阻接地情况下存在较大误差。

行波测距装置在500 kV以上线路及部分重要的220 kV线路中得到应用,测距准确度较高,但成本高、测距可靠性一般。某电网公司对2013年末~2014年初的行波故障测距情况进行调查,安装了行波测距装置的500 kV线路总计86跳,其中有测距结果的仅有42次。

### 1.3 二次电压行波测距技术

相对于电流行波法,电压行波法在构建基于整个电网的故障测距时有明显优势,但是电压行波在国内的应用并不多,理由是部分学者认为电压互感器不能很好地传变行波信号。国内对互感器的分析大多是沿用互感器在工频状况下的分析方法,没有考虑互感器内部的杂散电容,在此基础上得出电压互感器不能传变暂态高频信号,互感器二次信号难以直接用于行波保护与行波定位。研究及实验表明,电压互感器的线圈波过



冯宗建/工程师

#### 关键词/Keywords

故障测距·  
录波系统·  
电压行波·  
保信主站·

程包含静电感应、电磁感应和自由振动过程，能准确地传输行波波头信号和极性<sup>[9]</sup>，利用电压互感器的二次信号实现电压行波测距在技术上是可行的。

## 2 改造录波系统提高故障定位准确度的技术方案

### 2.1 整体方案设计

故障分析法与行波测距法各有优劣，两者能很好地形成互补，若能将两者结合起来，则对整个电网故障定位水平的提升十分有利。

故障录波系统由微机型故障录波装置、调度数据网、保护及故障录波信息主站构成。随着电网技术的发展，110 kV及以上电压等级变电站对故障记录的要求越来越高，故障录波系统的运行维护技术已十分成熟。

本文充分考虑了电力系统运行及管理现状，提出了一套改造录波系统提高故障定位准确度的解决方案。其整体设计方案示意图如图1所示。

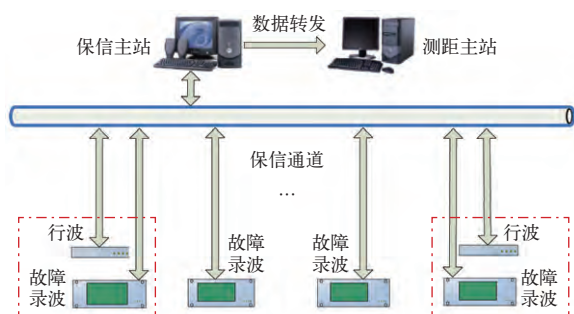


图1 改造录波系统提高故障定位准确度整体设计方案

整个方案由电压行波采集装置、故障录波装置、保信主站和测距主站组成。通过在原有故障录波屏柜内加入一套电压行波采集单元，行波采集单元与故障录波装置共用母线二次零序电压，借用保信系统多余的IP地址上调度数据网，通过调度端保信主站硬件设备将信息传至调度端测距主站。

### 2.2 电压行波采集单元

电压行波采集单元主要完成行波波头的辨识以及对外通信。为了使该方案在工程应用中得到推广，本文设计一款低成本的行波采集单元。

110 kV及以上电压等级输电线路普遍采用中性点直接接地的运行方式，在线路发生单相接地及两相接地短路时，会产生明显的零序电压行波；由于系统参数不完全对称、各相故障发生时刻不完全一致，则当线路发生两相短路及三相短路时，也会产生瞬时性的零序行波信号。

为了精简结构、方便改造，电压行波测距单元仅接入母线的二次零序电压信号，可实现对母线上所有线路行波信号的监测。

行波测距的核心在于行波波头的获取，国内电流行波法采用高速采样、记录并通过小波变换等算法识别波头，硬件成本比较高，不适合行波测距的大规模应用推广。

考虑到行波波头信号为一个瞬时性的上升沿或下降沿，本文设计研发了零序电压行波识别电路，如图2所示。该电路通过微分电路、电平比较、保持电路以及逻辑门实现暂态故障信息的初步识别，FPGA对初步辨识信号进行深入处理，区分出正常信息及故障信息，并接收GPS模块的对时信息，给每个故障信息打上时间戳，将暂态信息辨识结果传送至数据处理模块并进行进一步分析。为防止由于电磁干扰等因素造成故障测距装置频繁起动，电路内部进行相应的滤波及抗干扰处理。该硬件设计实现简单，避免了大量的A-D转换、存储和计算工作。

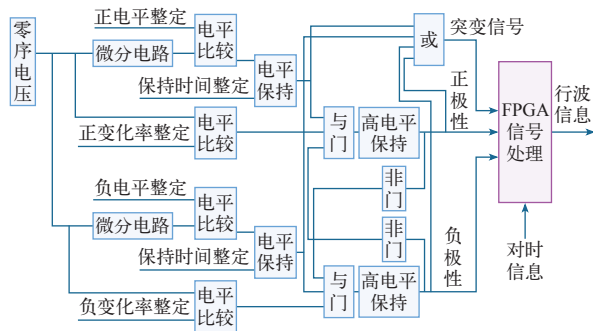


图2 零序电压行波识别原理

### 2.3 故障录波装置

故障录波装置具备标准的103规约或IEC 61850接入功能，通过调度数据网将故障简报及录波数据上传至保护和故障信息管理主站。因各站

录波装置厂家及型号不一，考虑项目改造的可行性，将行波测距采集单元安装在站内的其中一台录波装置屏柜内，共用母线零序电压信号，不对录波装置内部的软硬件细节进行改造。

## 2.4 保信主站

保信主站的主要功能包括存储及查询站端保护装置和故障录波器的动作事件、告警信息、定值和录波文件。本方案采用借保信通道方式，通过在保信主站运行行波通信模块，将各电压行波单元上传的数据转发到行波测距主站，由行波测距主站对行波数据进行统一处理。

## 2.5 测距主站

### (1) 功能

测距主站包含定值设置、数据处理及存储、信息查询、变电站拓扑图编辑以及电压行波采集单元状态监控等功能。

测距主站接收保信主站转发的故障录波器测距结果，并将故障简报中判为区内故障的测距结果显示出来；同时接收保信主站转发的行波信息，通过网络化故障测距算法计算行波测距结果，并对结果进行存储、筛选及显示。

### (2) 测距算法

输电线路发生故障后，行波将沿着线路向整个电网传播，其中，行波第一个波头在电网中传播最为强烈。由于故障行波第一波头到达各节点的时间对应故障行波第一波头由故障点向各节点传输的最短路径，因此在复杂网络中，根据最短路径的唯一性，总能通过寻找故障行波第一波头传输的最短路径，将复杂网络转化为简单网络（不含环路和多回线路）。

最短路径是图论研究中的经典算法问题，本文设计的测距主站选取Dijkstra算法作为最短路径算法，同时，采用加权系数法对故障定位结果进行处理，减少随机干扰造成的误差。

## 3 实例分析

### 3.1 概况

某220 kV以上电压等级局部电网地理位置示

意图如图3所示，该电网包含一个500 kV变电站（鲲鹏）及八个220 kV变电站（鼎盛、盘古石、坪山、白杨、骏康、宏图、交椅和灵芝），各站的故障录波装置通过调度数据网与保信主站通信。

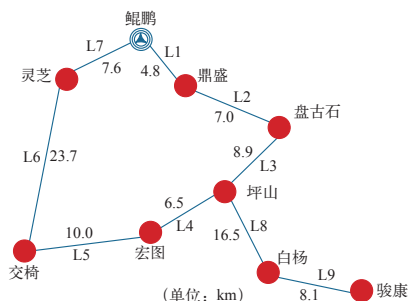


图3 220 kV电网子系统

### 3.2 最优配置

电网中故障行波定位装置的配置与电网结构和故障行波的传输路径直接相关<sup>[10-11]</sup>。通过寻找所有输电线路在任意故障点处行波第一波头传输的最短路径，保证最短路径中故障点两侧的变电站至少各安装一台行波采集装置，即可完成对整个网络输电线路行波测距的监控。具体实现时，网络中的输电线路支路依次设置为故障线路，得到输电线路两侧安装的站点数组 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 和 $J_1, J_2, \dots, J_n$ ，其中， $n$ 为线路数， $I$ 和 $J$ 的最小公共集的并集，即为整个电网需要配置行波采集装置的最少站点。

深圳供电局220 kV子网各故障线路两端的站点数组如表1所示。

表1 故障线路两端的变电站数组

| 故障线路 | 站点数组 $I$     | 站点数组 $J$           |
|------|--------------|--------------------|
| L1   | 鲲鹏、灵芝和交椅     | 鼎盛、盘古石、坪山、白杨和骏康    |
| L2   | 鼎盛、鲲鹏和灵芝     | 盘古石、坪山、白杨和骏康       |
| L3   | 盘古石、鼎盛、鲲鹏和灵芝 | 坪山、白杨、骏康、宏图和交椅     |
| L4   | 交椅、宏图        | 坪山、盘古石、鼎盛、白杨和骏康    |
| L5   | 交椅、灵芝        | 坪山、盘古石、鼎盛、白杨和骏康    |
| L6   | 灵芝、鲲鹏        | 交椅、宏图              |
| L7   | 鲲鹏、鼎盛和盘古石    | 灵芝、交椅              |
| L8   | 白杨、骏康        | 坪山、盘古石、鼎盛、宏图和交椅    |
| L9   | 骏康           | 白杨、坪山、盘古石、鼎盛、宏图和交椅 |

表1中， $I$ 和 $J$ 最小公共集的并集为骏康、坪

山、鲲鹏和交椅，因此，要实现该电网所有线路的行波监控，仅需对四个站进行升级改造。相对于电流行波测距，电压行波法节约了五台装置，且站点越多，基于网络的电压行波优势越明显。

### 3.3 试验验证

验证方案如图4所示。



图4 试验方案

行波传感器分别安装在线路末端、行波信号发生器侧。将故障点电缆线剥开，行波信号发生器一极接芯线、一极接屏蔽线。故障距离设定为413 m。得到的六组试验结果如表2所示。

表2 试验结果

| 编号 | 末端波头时间/ns   | 始端波头时间/ns   | 试验测距 |
|----|-------------|-------------|------|
| 1  | 339 001 240 | 338 998 980 | 434  |
| 2  | 681 023 260 | 681 020 990 | 436  |
| 3  | 977 136 040 | 977 133 790 | 432  |
| 4  | 87 077 140  | 87 074 890  | 432  |
| 5  | 461 514 500 | 461 512 250 | 432  |
| 6  | 441 492 690 | 441 490 450 | 430  |

表2中只展示了纳秒级的时间，因其他级时间相同故省略。从试验结果可以看出，试验得到的测距结果与理论值413很接近，最大测试误差不超过30 m，因此，本项目研发的提高故障定位准确度的方法是可行的，且故障定位准确度高。

## 4 结束语

电力系统技术的发展对故障测距提出了更高的要求。故障分析法及行波法作为当前输电网主流的故障测距方法，其技术特点存在互补性。本文对故障分析法及行波法的实际应用情况进行分析，针对电网现状，提出了改造录波系统提高故障测距准确度的解决方案。该方案在原有故障录波屏柜上加入一套低成本的零序电压行波采集装置，并借用保信通道及保信主站，将行波数据及故障分析法结果上传至行波主站，由行波主站完

成故障数据处理、分析及显示。该方案兼有故障分析法稳定性好、行波法测距准确度高等优点，同时，在节约设备数目、设备成本以及减少安装维护工作量方面也有明显优势。

### 参考文献

- [1] 尹晓光, 宋琳琳, 尤志. 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.
- [2] 吴刚, 林湘宁. 通用行波测距修正方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (34): 142-147.
- [3] 郑州, 绿艳萍, 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 王志华, 尹项根, 张小波, 等. 利用CVT 捕捉电压行波实现故障测距的分析与实践 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (22): 63-68.
- [7] 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.
- [8] 覃剑, 陈祥训, 郑健超. 行波在输电线路上传播的色散研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (9): 27-30.
- [9] 曾祥君, 刘正谊, 屈明志, 等. 互感器暂态行波传输特性仿真分析和实验测试 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2004, 1 (1): 71-75.
- [10] 邓丰, 陈楠, 曾祥君, 等. 基于图论的电网故障行波定位装置最优配置算法 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (11): 87-91.
- [11] 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, 2009, 28 (31): 48-53.

(收稿日期: 2015-12-07) EA