

分布式智能故障诊断系统在架空输电线路上的应用研究

首先介绍了分布式智能故障诊断系统的基本原理，该系统体系结构不同于传统行波定位系统，核心部件为智能故障监测终端，安装于输电线路导线上，可以近距离地捕捉故障瞬间的行波信号进行分析。然后，根据架空输电线路的特点，制定了该诊断系统的典型解决方案，通过在每20~30 km的线路上分别安装监测点，利用反射波实现故障点的精确定位。最后，介绍了该系统在北京电网的实例应用分析，进而验证了该系统在输电线路上的应用的稳定性和精准度。

姚磊 于立叁 施翔 雷蕾/国网北京市电力公司

0 引言

高压架空输电线路均为露天架设，线路的运行受自然因素影响较大，如雷电、大风及覆冰等恶劣天气都可能造成线路跳闸。除此之外，输电线路还可能遭到人类活动的破坏，如使用吊车等大型机械碰线、风筝线短路放电，等等。输电线路发生故障后，为快速找出故障原因并进行处置，恢复线路正常运行方式，对线路故障点位置的计算越精准越好。现有架空输电线路行波定位技术在某些情况下的实际应用中呈现了可靠性差、定位精度低等缺点。因此，对分布式行波测量技术进行了应用研究，通过减小行波定位区间以及减小行波衰减强度提高了故障点定位准确度，通过多个智能故障监测终端之间的冗余机制提高了故障定位的可靠性。此外，此技术还可对故障原因进行初步判断，可以判断出线路故障原因为雷击还是非雷击，如果是雷击故障，可以

判断出是绕击还是反击，并能辨识线路遭受雷击的次数及位置。

1 基本原理

分布式智能故障监测终端每隔20~30 km安装于线路导线上，其故障定位基本过程描述如下。

1) 通过流经各终端的电流相位判断故障区间。将智能故障监测终端装设在某输电线路的*i*、*j*、*m*、*n*杆塔上，若*j*-*m*杆塔间发生线路故障。此时，*i*、*j*处的工频故障电流相位与*m*、*n*处的工频故障电流相位是相反的，利用这一简单逻辑原理，可以十分准确地确定故障发生在*j*、*m*间。如图1所示。

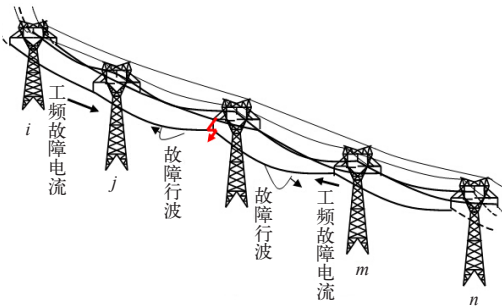


图1 分布式检测故障点示意图

2) 确定故障区间后实施行波精确定位。该系统为了进一步地提高故障行波的定位精度，采用了分布式行波波速在线测量技术，通过采集同一行波经过相邻两个监测终端的时间，应用公式计算出行波波速。在故障区间确定后，系统将实施行波精确定位。

3) 输电线路网络往往较为复杂，一条主线T接多条支线，支线又T接其他支线，这种情况下对故障的精确定位更具有实际意义。该系统可将复杂



姚磊/工程师

关键词/Keywords

分布式·
智能·
故障诊断·
输电线路·

的网络结构分解为多个简单的回路，分别应用区间判断法、行波精确定位法实施定位。

4) 各种不同原因造成的线路故障，其故障行波具有各自特征，可通过分析故障点就近两端的监测终端采集的行波电流，辨识引起故障的原因。较为典型的是雷击故障，其中绕击和反击的故障行波波形的(见图2)也具有一定规律特征，可以通过这些特征判断雷击故障为绕击还是反击。

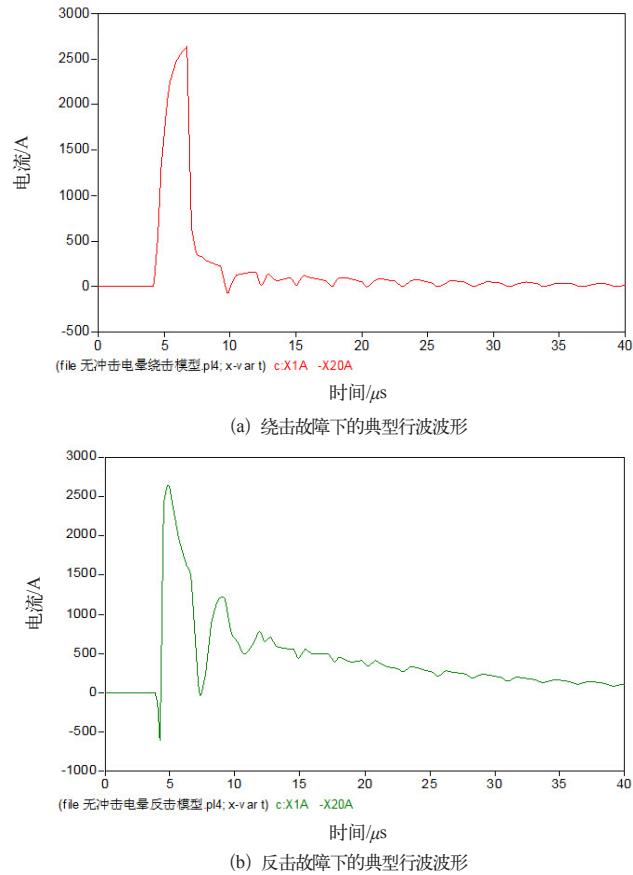


图2 绕击和反击行波电流波形

5) 该系统还具有开放式自学习平台，在发生非雷击的各类故障时，系统可自动采集故障行波各项参数，记录总结该类故障的相同或相似特征，特别是学习故障电流的高次谐波的频谱特征，最终可精确判断出故障的细分原因。

6) 该系统可分析各终端监测到的行波电流，由于雷击杆塔、避雷线、线路附近等不同位置时，在导线上引发电磁扰动的电磁暂态特性各不相同(见图3)，系统通过分析可判断出雷击线路的具体位置。

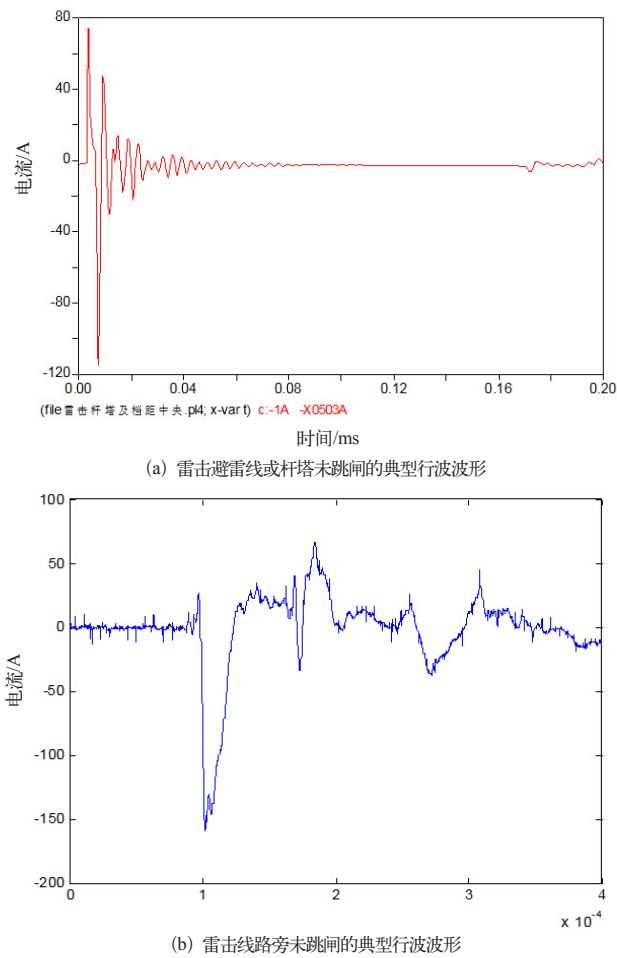


图3 雷击避雷线或杆塔及雷击线路旁行波电流波形

2 系统构成

2.1 系统体系结构

如图4所示，该系统由三大部分组成，第一部分是若干个安装在线路上的监测终端，用于采集故障发生时刻的暂态和稳态故障信号，以及线路运行参数、自身运行状态等；第二部分是数据中心，可实现数据的采集、统计和分析；第三部分是应用客户端，可通过局域网、Internet或无线网络实现查询功能。

2.2 智能故障监测终端

智能故障监测终端是该系统的重要环节，是实现输电线路故障信号监测的装置。它分布安装于输电线路导线上，一般每间隔20~30 km安装一组智能故障监测终端。智能故障监测终端主要实现以下功能。

1) 监测量的检测和采集功能。分布安装在



图4 监测系统构成图

输电线路导线上，通过高速循环采集技术采集线路故障行波信号，检测工频故障信号，可实现全过程采集。

2) 数据处理功能。线路故障信息传输至数据中心后，数据中心可对相应的数据进行处理和分析。

3) 数据通信功能。上传采集信号，接收下传参数及控制命令。

4) 自检和自恢复功能。系统对监测终端的运行状态进行实时自检，并报送至数据中心；若系统出现死机等异常状态时，系统具有自恢复功能。

5) 软件升级功能。系统可通过下载、安装升级包，实现软件升级。

2.3 软件系统

输电线路智能故障监测系统在软件开发过程中，避开C/S结构的烦琐，直接采用易于使用的B/S结构，客户端具有计算机Web或手机WAP功能，可对监测信息和判断结果进行查询，可对系统的各项功能进行具体设置，还可对智能故障监测终端进行控制设置。

2.4 特点优势

常规定位系统和分布式诊断系统优缺点对比如下表所示。

3 典型解决方案及应用

3.1 典型解决方案

目前电力系统较为广泛采用的行波故障定

位系统，由于只能安装于变电站内，无法克服上述波长距离传播受衰减、弧垂以及干扰信号等因素的影响，常常难以可靠准确定位。本方案依托分布式输电线路智能故障监测终端灵活配置行波测量点的特点，将长线路划分为几个小区段，可实现故障点的准确定位。

对于小于30 km的短线路，往往安装一个监测点通过反射波也可实现故障点的准确定位。如图5所示，图中■代表现场监测终端，各终端沿线路分布安装。由于山区地形复杂，弧垂效应、波速效应影响显著，巡线的困难程度也较大，建议每20 km设置一监测点；对于平原路段，按照每30 km一个监测点的原则配置。

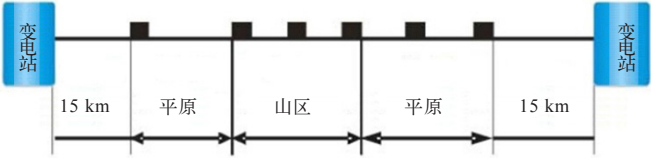


图5 长线路分布式故障行波精确定位现场终端配置方案

在架空线路经过不同管辖区域的交界处安装智能故障监测终端，即可有效明确故障发生的区域。如图6所示，图中■代表现场监测终端，当区域2发生故障时，区域2两侧的智能故障监测终端将会检测到流向相反的工频故障电流，从而准确判定故障区域。系统也可将故障行波的方向作为判断依据，以进一步保证故障区域的可靠性。

表1 常规定位系统和分布式诊断系统优缺点对比

项目	常规的故障点行波定位	分布式故障定位
故障精确定位	定位原理	工频区间定位与行波定位相结合
	监测点安装位置	分布于线路上
	行波信号	衰减小、畸变小
	定位弧垂的影响	影响小
故障性质识别	定位受波速的影响	实现行波波速在线测量:误差小
	雷击与非雷击	可准确判断
	反击与绕击	准确率90%以上
	其它非雷击故障	利用自学习平台实现非雷击故障的判断

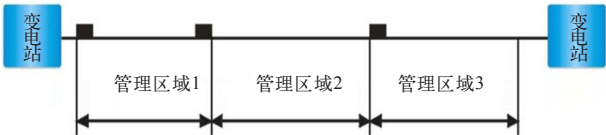


图6 跨区域线路故障属地定位现场终端配置方案

3.2 北京电网故障诊断应用案例分析

国网北京市电力公司于2014年6月，在500 kV 架混线路昌海线上安装了输电线路分布式故障监测装置。在2014年11月12日6时15分8秒,发生了一次AC两相跳闸故障，该系统发出了跳闸告警，并诊断出故障点位于102号杆塔，故障性质为非雷击故障。以此信息为指导，运维人员直接赶赴102号杆塔，随即发现漂浮物引起的闪络痕迹。

500 kV 昌海线架空段全长81 km，在1#、98#和186#杆塔分别安装了输电线路分布式故障诊断终端，如图7所示。

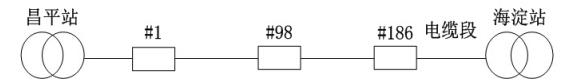
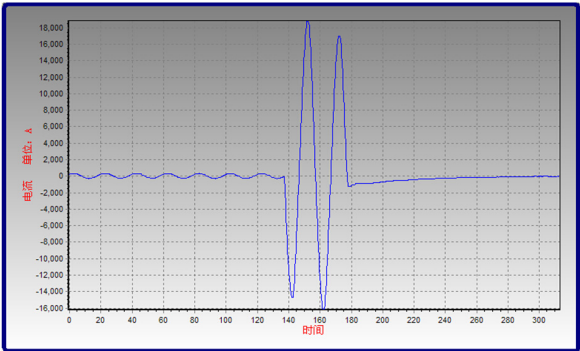


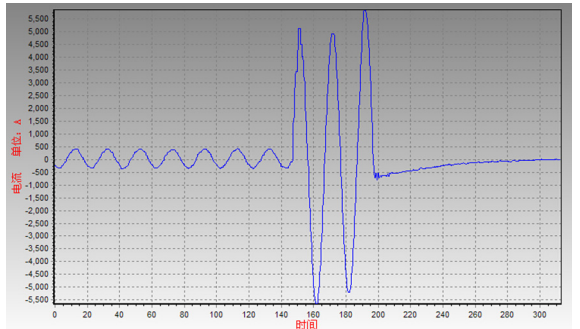
图7 500 kV昌海线故障诊断终端安装示意图

(1) 故障区间定位

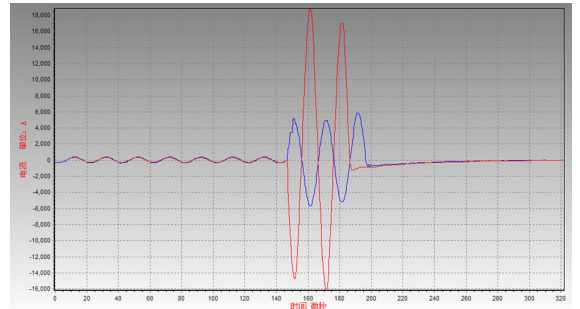
如图8所示，输电线路分布式故障诊断终端在2014-11-12 06:15:08于昌海线上监测到工频分闸电流波形，波形中故障电流增大两个周期后归零，符合线路发生故障时工频电流特征，因此系统判断昌海线于2014-11-12 06:15:08发生跳闸故障。96#杆塔与186#杆塔工频进行比对相位角相反，确认故障区间在区间内。186#为架空段与电缆段分界点因此可判断故障点位于架空段。



(a) 96号杆塔A相故障分闸工频电流波形 (2014-11-12 06:15:08 814毫秒447微秒)



(b) 186号杆塔A相故障分闸工频电流波形 (2014-11-12 06:15:08 814毫秒080微秒)



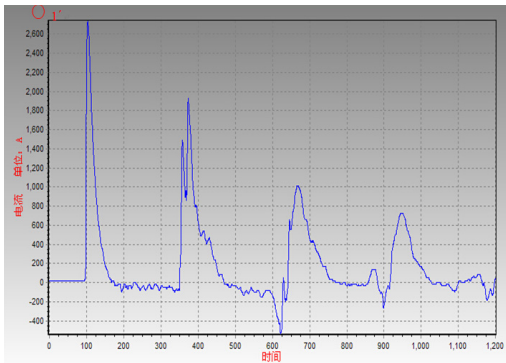
(c) 波形对比

图8 500 kV昌海线故障分闸工频电流波形

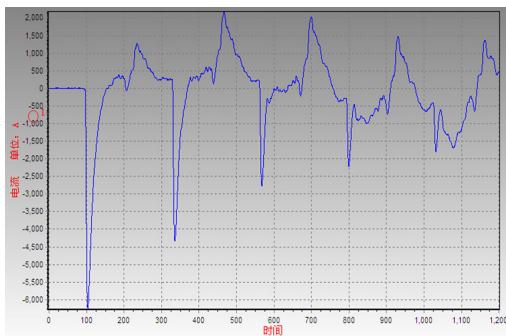
(2) 故障点行波精确定位

如图9所示，故障点电流行波从故障点传至96#杆塔与186#杆塔时间差为107 μ s，距离差为31.03 km，96#杆塔与186#杆塔的距离为

36.705 km，因此可判断故障点距离96#杆塔2 248 m，约等于102#杆塔到96#杆塔的距离，因此，此次昌海线故障点最终定位102#杆塔附近。故障定位示意图如图10所示。



(a) 96号杆塔A相故障分闸高频电流波形 (2014-11-12 06:15:08 814毫秒312微秒)



(b) 186号杆塔A相故障分闸高频电流波形 (2014-11-12 06:15:08 814毫秒419微秒)

图9 500 kV昌海线故障分闸高频电流波形

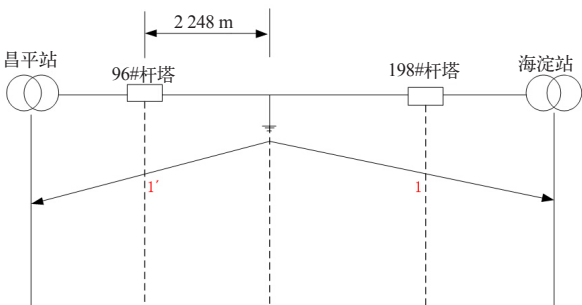
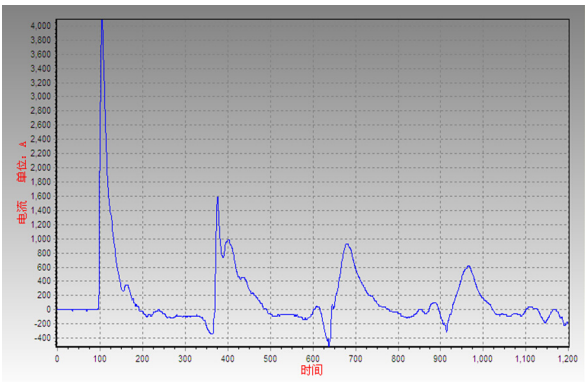


图10 500 kV昌海线故障定位示意图

(3) 故障原因分析

根据系统记录的电流波形（见图11），故障时刻电流行波波尾持续时间大于20 μ s，符合非雷击特征。因此，此次昌海线故障性质最终确定为非雷击故障。



1号杆塔A相故障分闸高频电流波形 (2014-11-12 06:15:08 814毫秒438微秒)

图11 500 kV昌海线故障分闸高频电流波形

4 结束语

本文针对输电线路受自然因素影响易发生故障掉闸的情况，采用了分布式智能故障诊断系统，根据输电线路实际情况制定了典型解决方案，最后以北京电网输电线路为监测对象进行了实线。分布式智能故障诊断系统在运行期间准确进行了输电线路故障定位与故障原因辨识。该系统的应用表明，分布式行波测距技术可以有效提高输电线路故障定位精度、减小定位误差，为线路故障点查找提供可靠依据，可实现故障线路快速恢复正常运行方式，提升系统运行稳定性。

参考文献

[1] 黄志都.基于分布式行波测距的输电线路故障诊断技术研究与应用[J].广西电力, 2013.
[2] 彭向阳, 钱冠军, 李鑫, 等.架空输电线路跳闸故障智能诊断[J].高电压技术, 2012.
[3] 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.

作者简介

姚磊 (1984-), 男, 研究生, 高级技师/工程师, 从事高压架空输电线路运行维护管理工作。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**

(编辑: 杨得润)