

城市轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术研究^{*}

戴丽君

(南京铁道职业技术学院, 210031, 南京//副教授)

摘要 提出了基于双端行波法、区段环流法、稳态差动法和GIS(地理信息系统)相结合的电力电缆在线故障定位系统。该系统由配电所电缆监测终端、电缆中间接头监测终端、电缆故障定位GIS展示平台和通信网络4部分构成。对于各种故障类型,系统均能够通过基于百度地图的地理信息系统展示故障点坐标位置。将多种在线故障定位方法和地理信息展示技术应用于城市轨道交通电力电缆在线故障定位,大大提高了电缆供电可靠性和运行维护管理水平。

关键词 城市轨道交通;供电系统;电力电缆;在线故障定位

中图分类号 U231.8; TM247

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.12.009

Research on Cable Online Fault Location Technology of Urban Rail Power Supply System

DAI Lijun

Abstract A power cable online fault location system based on the combination of double side electric wave method, segment circulation method, steady state differential method and GIS (geographic information system) is proposed. The system consists of four parts: cable monitoring terminal, cable intermediate connector monitoring terminal, cable fault location GIS display platform and communication network. For different fault types, the system can display the coordinate position of fault points through GIS based on Baidu map. The application of various online fault location methods and geographic information display technologies to the online fault location of urban rail transit power cable has greatly improved the reliability of cable power supply, the level of operation and maintenance management.

Key words urban rail transit; power supply system; power cable; online fault location

Author's address Nanjing Institute of Railway Technology, 210031, Nanjing, China

城市轨道交通的供电电源要求安全可靠,通常由城市电网的高压(110 kV)降压后以相应的电压等级(35 kV或10 kV)分别供给沿线的牵引变电所和降压变电所。目前,我国城市轨道交通的供电一般有3种方式,即集中供电方式、分散供电方式及分散与集中相结合的混合供电方式。各种供电方式中,供电电缆发挥着非常重要的作用,它保证了电能安全、可靠、稳定地进行传输。

对于分散供电方式而言,由于需要从城市电网分散引入多路中压电源,且其与城市电网关系紧密,因接口多且独立性差,导致运营管理相对复杂。特别是采用电缆线路供电,因线路路径较长,每回线路往往设有若干中间接头。统计数据表明,电缆中间接头故障在电缆故障中占90%以上,这对城市轨道交通的安全运行造成很大影响。长距离供电电缆故障的判别诊断和处置,一直是城市轨道交通供电系统运营维护的难题。

现有的电缆故障判别处理方式都是在离线状态下进行的,对于人员的业务素质要求较高,而且长距离电力电缆运行保护方式的特殊性和天窗作业时间限制也给电缆故障测试和处理带来困难,难以保证故障处理时效。因此,采用现代化技术手段对城市轨道交通的电力电缆故障进行在线监测并准确定位,对于保证城市轨道交通正常运行具有重要意义。

适用于电力电缆的在线故障监测方法主要包括工频量法和行波法两大类。工频量法通过求解基于线路工频参数模型的故障测距方程获得故障距离^[1],其主要问题是受线路结构、线路参数和互感器精度的影响,测距误差大;行波法利用暂态行波信号在线路上的传播特性实现故障测距^[2-4],其主要优点是测距精度高,并且适用于各种线路。

^{*} 江苏省轨道交通研发中心开放基金重点课题(KFJ1702);中国铁路上海局集团有限公司2018年度科研开发(示范性推广)(2018168)

行波法不仅需要解决行波信号传变、采集、时间同步和通信等关键技术问题^[5],而且还要通过对暂态行波波形的深入分析才能获得准确的行波到达时刻。为此提出了一系列现代数字信号处理算法,主要包括小波变换^[6-7]、数学形态学^[8]、Hilbert-Huang 变换^[9]、经验模态分解^[10],但这些算法基本停留在理论研究阶段。

文献[11]针对电力架空线-电缆混合线路行波测距,提出一种分段计算的双端行波故障测距算法;文献[12]提出基于 C 型行波法的电力电缆故障定位方法,但都只针对电缆主绝缘故障,而未考虑电缆金属护层的绝缘故障。

本研究将双端行波法、区段环流法、稳态差动法和地理信息系统(GIS)相结合,研制开发了一套实用的电力电缆在线故障定位系统,对于快速判断、准确定位电缆故障位置、缩短抢修时间及降低供电安全风险具有重要意义。

1 电力电缆在线故障定位系统构成

电力电缆在线故障定位系统的总体架构如图 1 所示,整个系统由 4 部分构成。

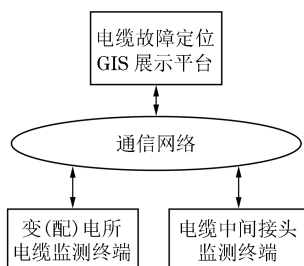


图 1 电力电缆在线故障定位系统构成

1.1 配电所电缆监测终端

配电所电缆监测终端由主控单元、高速数据采集单元、GPS(全球定位系统)授时模块、通信模块及电源模块等构成。监测终端通过外置式高频电流传感器实时采集电缆三相芯线和三相金属护层接地线的高频暂态行波电流信号,并具有行波录波功能。

为保证行波测距的分辨率,设计采样频率为 50 MHz,同时 GPS 授时模块保证各配电所监测终端之间的时钟误差不超过 50 ns。

为了监视电缆金属护层绝缘故障,监测终端还通过专门研制的外置式低频电流传感器实时采集电缆三相金属护层接地线的工频电流信号,并具有故障检测功能。

当电缆主绝缘或金属护层绝缘发生故障时,监测终端通过通信模块自动将记录到的波形数据上传到远端的电缆故障定位 GIS 展示平台。

1.2 电缆中间接头监测终端

电缆中间接头监测终端通过专门研制的外置式低频电流传感器实时采集电缆中间接头两侧三相芯线和三相金属护层接地线的工频电流信号,具有接头内部主绝缘故障检测和接头外部金属护层绝缘故障检测功能。

当电缆中间接头的内部主绝缘或外部金属护层绝缘发生故障时,监测终端自动将记录到的监测数据上传到远端的电缆故障定位 GIS 展示平台。

电缆中间接头监测终端通过 CT(电流互感器)取电方式供电,并将自带的蓄电池作为后备电源。

1.3 电缆故障定位 GIS 展示平台

电缆故障定位 GIS 展示平台可以部署在供电中心的专用服务器上,也可以部署在公网的云服务器上,其应用软件系统基于 B/S(浏览器/服务器)架构,具有行波故障定位分析、电缆中间接头故障分析、电缆故障位置 GIS 展示、历史数据统计与查询及电缆故障告警(短信、弹窗)等功能。

电缆运维人员可以通过短信方式实时获得电缆故障告警信息,也可以随时通过浏览器登陆云服务器进入电缆故障定位 GIS 展示平台页面,进而实时查看被监视电缆的当前运行状态 and 所有历史故障信息。

1.4 通信网络

通信网络可直接采用铁路供电远动系统(SCADA)数据通信网,亦可采用 4G 无线通信网。

2 电缆故障定位原理

2.1 电缆主绝缘故障定位——双端行波法

当电缆某相主绝缘发生故障时,在故障点将产生高频暂态行波,而且故障暂态行波将在故障相的芯线和金属护层之间传播,其传播路线如图 2 所示。

根据双端行波原理,故障点 F 到电缆两端配电所 M 、 N 的距离 D_{MF} 、 D_{NF} 分别表示为:

$$\begin{cases} D_{MF} = \frac{L + v(t_M - t_N)}{2} \\ D_{NF} = \frac{L - v(t_M - t_N)}{2} \end{cases}$$

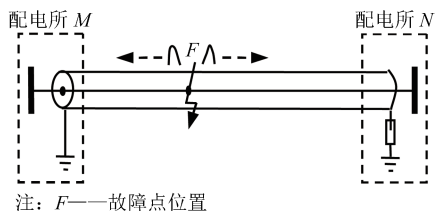


图 2 电缆主绝缘故障暂态行波传播示意图

式中:

ν ——行波波速;

L ——电缆线路全长;

t_M, t_N ——分别表示故障初始行波到达 M 端和 N 端配电所监测点的绝对时间。

在本系统中,首先通过安装在电缆两端配电所的电缆监测终端检测故障初始行波触发设定门限时的绝对时刻,进而在电缆故障定位 GIS 展示平台通过对故障行波波波形进行分析来获得校准后的故障初始行波到达时刻。

2.2 电缆护层绝缘故障定位——区段环流法

考虑到电缆沿线可能存在多个中间接头将整条电缆划分成若干电缆区段,而且每个电缆区段两端的金属护层采用不同的接地方式,即一端金属护层直接接地,另一端金属护层经保护间隙接地,如图 3 所示。

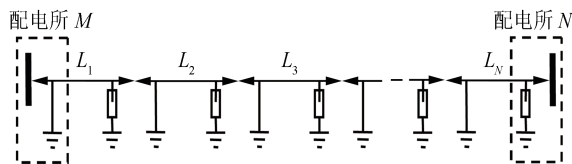


图 3 电缆金属护层绝缘故障定位示意图

在正常运行情况下,每个电缆区段的芯线负荷电流通过电容效应感应到金属护层接地回路的工频电流(即环流)非常小。当某电缆区段的金属护层发生接地故障时,护层接地线上的工频电流将发生突变,据此可以检测金属护层接地故障,并将其定位到具体的电缆区段。

在本系统中,配电所的金属护层接地环流由配电所电缆监测终端负责采集,而其它各电缆区段的金属护层接地环流则由电缆中间接头监测终端负责采集。配电所电缆监测终端和电缆中间接头监测终端基于环流法实时检测电缆金属护层绝缘是否发生故障。

2.3 电缆中间接头故障检测——稳态差动法

电缆中间接头的故障检测原理如图 4 所示。

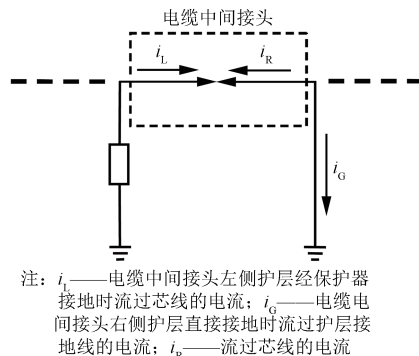


图 4 电缆中间接头故障检测示意图

由图 4 可知,在正常情况下,电缆中间接头外部(虚框以外)发生故障时,流过接头两侧芯线的电流完全相同,因而在图 4 所示参考方向的前提下,两侧芯线电流的矢量和为零;当电缆中间接头内部发生故障时,两侧芯线电流的矢量和不再为零,而是必然超过设定的数值,据此可以检测电缆中间接头故障。

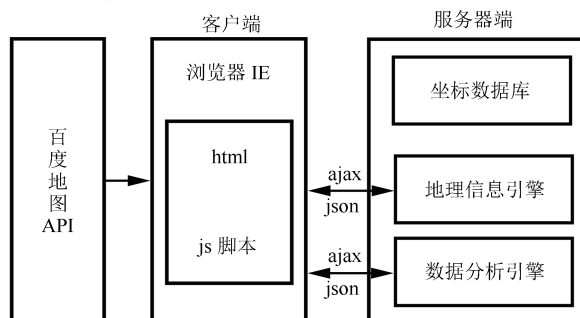
在本系统中,电缆中间接头两侧芯线的三相电流由电缆中间接头监测终端负责采集,并基于稳态差动法实时检测电缆中间接头内部是否发生故障。

3 电缆故障位置的 GIS 展示

3.1 软件系统架构

电缆故障定位 GIS 展示平台软件布置在服务器端,主要实现电缆故障在线监测数据的存储、分析和基于百度地图的 GIS 展示等功能,其软件系统包括数据分析引擎、数据库引擎及地理信息引擎等。

GIS 展示平台软件与客户端的加载关系如图 5 所示。其中,客户端网页的静态部分基于 html(超文本标记语言)编写,动态部分则基于 js(直译式脚本语言)编写。网页与服务器之间的数据交互基于 ajax(异步直译式脚本语言和可扩展标记语言)技术实现,数据采用 json(直译式脚本语言对象标记)格式。



注: API ——应用程序编程接口

图 5 电缆故障定位 GIS 展示软件系统架构

3.2 基于 GIS 的电缆监测网页页面加载

实际应用时,首先需要将实际电缆线路和设备节点的经纬度信息按照一定精度输入平台,并由服务器数据库引擎存入数据库。这样,客户端就可以随时通过浏览器加载 GIS 展示平台的 Web(万维网)页面。

具体加载时,浏览器首先通过 ajax 从服务器的 GIS 数据引擎获取电缆线路和设备坐标数据,然后通过百度地图 API 接口加载对应坐标区域的地图,并将电缆线路坐标按照顺序以实线形式绘制于地图中,将设备节点坐标以标注形式绘制于地图中,从而加载完毕。

3.3 电缆故障位置展示

在正常情况下,浏览器定时通过 ajax 向服务器数据分析引擎查询电缆故障告警信息。当服务器接收到来自配电所电缆监测终端或电缆中间接头监测终端的故障数据时,首先,根据电缆故障定位原理分析确认故障点位置;然后,生成电缆故障告警信息并存入数据库;进而通过数据分析引擎将故障点位置信息打包,并以 json 对象形式发送至浏览器;浏览器再通过脚本中的数据处理引擎计算出实际故障点坐标,并通过百度地图 API 接口将故障点坐标位置以彩色标注形式展示于 Web 地图中。

2019 年 1 月,基于本文提出的原理和技术研发的电缆故障在线定位系统在南京地铁 1 号线南京南站顺利投入试运行。电力电缆在线故障定位系统负责监测南京南站站配电所进线电源电缆。电缆全长 3.5 km,沿线布设 4 个中间接头。

各监测点的工频电流实时监测界面如图 6 所示。其中,电缆线路下方的数据为 A、B、C 3 个监测点的环流值,电缆线路上的数据为电缆中间

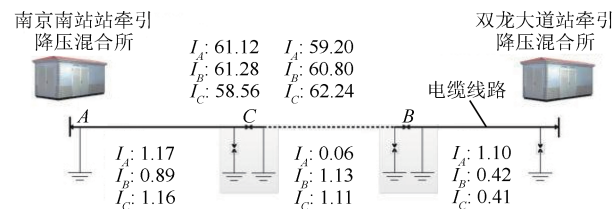


图 6 各监测点的工频电流实时监测界面

接头 C 两侧的芯线电流值。到目前为止,整个系统运行情况良好。

4 结语

研发了基于 GIS 的电缆在线故障定位系统,并投入实际运行。该系统将双端行波法、区段环流法、稳态差动法和 GIS 展示融为一体,实现了对电缆主绝缘、电缆金属护层绝缘和电缆中间接头的全面在线故障监测。

本系统的推广应用,可以大大缩短城市轨道交通电缆故障的修复时间,从而提高供电可靠性,提升运行维护水平。

参考文献

- [1] 葛耀中.新型继电保护和故障测距的原理与技术[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2007.
- [2] 陈平.输电线路现代行波故障测距及其应用研究[D].西安:西安交通大学,2003.
- [3] 苏方林.客运专线电力电缆行波故障定位方法综述[J].电气化铁道,2009(3):4.
- [4] 洪滨,王大文,林春泉.基于行波的电力电缆故障探测技术[J].电线电缆,2011(3):38.
- [5] 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(23):62.
- [6] 李骏,范春菊.基于小波分析的电力电缆行波故障测距[J].继电器,2005(14):15.
- [7] 周淦,卢毅,廖瑞金.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(1):1.
- [8] 宋彦坤.基于数学形态学的电力电缆行波故障测距研究[D].石家庄:河北科技大学,2015.
- [9] 廖晓辉,赵肖健,梁恒娜.一种基于 Hilbert-Huang 变换的电力电缆故障测距方法[J].电力系统保护与控制,2017(3):20.
- [10] 刘洋,曹云东,侯春光.基于经验模态分解及维格纳威耳分布的电缆双端故障定位算法[J].中国电机工程学报,2015(16):4086.
- [11] 何正友,杨建维,周超.电力架空线-电缆混合线路行波测距[J].大连海事大学学报,2007(3):46.
- [12] 张殊,何正友,赵云翮,等.基于 C 型行波法的 10 kV 客运专线电力电缆贯通线故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2012(14):51.

(收稿日期:2019-05-08)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704