

基于行波检测的水电配电网单相接地故障定位

王哲¹, 迟福建¹, 赵志斌², 孙阔¹

(1. 国网天津市电力公司, 天津 300000; 2. 华北电力大学
电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要:对单相接地故障进行精准定位有利于提高水电配电网供电质量、减少断电造成的损失。为此,针对传统定位方法存在的定位误差大、检测耗时长的问题,设计了基于行波检测的水电配电网单相接地故障定位方法。定位过程共分为两个阶段:一是水电配电网单相接地故障选线,确定发生故障的线路。二是针对行波信号中存在噪声的特性,将行波检测法中的双端法与二进小波变换过程相结合,借助于二进小波变换的消噪作用和异常点定位能力,对单相接地故障位置进行精确定位。实证结果表明:与传统定位方法相比,利用行波检测方法后的定位误差更小、故障检测时间更短,为水电配电网单相接地故障的及时修复奠定了重要的基础。

关键词:行波检测;水电配电网;单相接地故障;故障定位;行波选线;双端法;二进小波变换

中图分类号:TM125 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22382

Single-phase Ground Fault Location of Hydropower Distribution Network Based on Traveling Wave Detection

WANG Zhe¹, CHI Fujian¹, ZHAO Zhibin², SUN Kuo¹

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300000, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Accurate positioning of single-phase ground fault can improve the power supply quality of hydropower distribution network and reduce the loss caused by power failure. Therefore, in view of the problems of large positioning error and long detection time in traditional positioning methods, a single-phase ground fault positioning method for hydropower distribution network based on traveling wave detection was designed. The positioning process was divided into two stages: first, the single-phase grounding fault of the hydropower distribution network was selected and the fault line was determined. Second, in view of the characteristics of the noise in traveling wave signal, the double-end method in traveling wave detection method was combined with the process of binary wavelet transform. By virtue of the denoising effect of binary wavelet transform and the locating ability of abnormal points, the single-phase ground fault location was accurately located. The empirical results show that: compared with the traditional positioning method, the positioning error is smaller and the fault detection time is shorter after using the traveling wave detection method, which lays an important foundation for the timely repair of single-phase ground fault in the hydropower distribution network.

Key words: traveling wave detection; hydropower distribution network; single-phase ground fault; fault location; line selection of travelling wave; double-end method; binary wavelet transform

随着社会经济的飞速发展,电力需求的规模也日益加大,电力系统必须不断提高稳定性和安全性的重要性也日益明显^[1]。水电建设的投资少、建设周期短,可实现资源的循环利用,其作为一种清洁能源对环境可持续发展具有重要意

义^[2]。水电配电网在迅速发展的同时也改变了传统配电网的模式。但是,水电的接入易影响配电网的无功电压、继电保护等环节,且水电具有的出力不稳定、季节性明显等特性,易导致配电网电压质量下降或造成配电网故障。单相接地故

基金项目:国网天津市电力公司管理咨询项目(KH19010279)

作者简介:王哲(1984—),男,硕士,高级工程师,Email:1156110508@qq.com

障是水电配电网最常见的故障类型之一,多发生在潮湿、多雨天气。单相接地故障除了会对供电过程造成影响外,还可能因产生过电压而造成电力设备的损坏^[3]。因此,对水电配电网单相接地故障进行有效定位对于故障修复和及时止损都具有重要的现实意义。

目前,可应用于水电配电网的单相接地故障定位方法有:阻抗法^[4]、信号注入法^[5]和行波折反射特征法^[6]等。其中,阻抗法的定位原理是在已知配电网线路参数以及故障发生后测定的配电线路中的电流、电压值的基础上,根据欧姆定律算出故障点、测量点的线路阻抗,最后结合故障距离函数,得出单相接地故障距离,从而明确故障发生位置。信号注入法定位原理是通过配置专用注入信号源对故障线路输入信号,然后利用辅助检测装置对其进行跟踪、检测,分析信号的路径和变化特征,从而实现故障定位。行波折反射特征法定位原理是采用故障行波线路,反射分支点和线路末端规律,获得故障线路行波,利用希尔伯特黄变换标定初始波和各反射波到达时刻,计算反射波和初始波的路程差,结合配电网拓扑,确定行波传播路径,从而判断故障区段。然而,现阶段,由于配电网线路分支较多、结构复杂,再加上单相接地故障发生时故障信号本身非常微弱、难以识别,导致经传统方法计算出的故障距离误差较大,且对故障检测的时间较长,耽误了故障修复。

针对上述问题,本研究提出一种新的方法,即结合行波检测理论对配电网单相接地故障进行定位,采用行波检测,通过故障点产生的暂态行波,模拟母线故障、记录故障行波到达时间,能够从复杂的配电网结构中选出故障线路,并利用双端法,计算两端行波的时间差,可以确定故障距离,明确故障位置,结合二进小波变换,将信号进行更高效的滤波消噪,实现精确、高效率的故障定位。

1 定位方法设计

在小电流接地系统中,配电线路多为10 kV配电线路。由于在实际运行中,配电线路受到雨季、大风和雪等恶劣天气的影响,极易发生单相接地故障。当配电网中存在单相接地故障时,故障点所在线路的电压降低,与之相邻的非故障两相电路却相对升高,因而在短时间内不影响对用

户的连续供电,系统仍可运行1~2 h,这就是小电流接地系统的优点和被广泛应用的原因。

配电网单线接地故障虽然在短时间内不会影响正常供电,但是若不及时进行修理,配电网长时间在有故障的状态下运行,会造成变电设备的损坏或提前老化,从而影响配电网的安全和稳定。为此,本研究利用行波检测原理,设计水电配电网单相接地故障定位过程,研究思路如下:

第一阶段:故障选线,即确定故障发生的线路;

第二阶段:故障准确定位,即确定故障发生在线路上的具体位置。

1.1 配电网单相接地故障选线

配电网单相接地故障选线基本流程如图1所示。

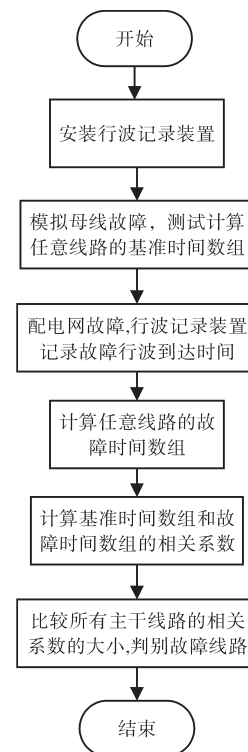


图1 故障选线基本流程示意图

Fig.1 Basic flow diagram of fault line selection

为满足社会生产和生活需要,配电网规模逐渐扩大,线路分支众多,结构越来越复杂,出现了环型、放射型和两端型等众多形式的配电网拓扑结构^[6]。因此,若想直接从中确定故障发生的具体位置,无疑十分困难。为方便后续操作,首先进行配电网单相接地故障选线,即从复杂的配电网结构中选出出现故障的线路^[7]。

水电配电网单相接地故障发生后,故障点处会产生暂态行波,暂态行波会沿着与故障点相连

的线路传播。传播过程分为两种:第一种是故障线路上的传播路径:以故障发生点为起点,向与之相连的最短配电网线路的各个分支传播暂态行波,并通过安装在分支末端的各个行波记录装置,记录行波从故障点到分支末端的时间^[8]。第二种是非故障线路上的传播路径:以故障发生点为起点,向变电站母线传播暂态行波,然后再由母线传输到非故障线路的各分支末端,最后记录行波到达的时间^[9]。在非故障线路上的传播路径上,由于母线与故障点之间的距离非常短,因此在该段上的行波传播时间非常短,则这段行波传播时间可以忽略不计,仅需要计算母线到各分支末端行波传播的时间即可。

1.2 故障准确定位

在故障选线后并不能确定配电网单相接地故障发生的精确位置,因此,需要通过行波检测法,确定故障的具体位置,利用双端测距法,计算两端行波时间差,确定故障距离,结合二进小波变换,识别故障分量,高效滤波消噪信号,从而准确确定故障位置^[10-11]。

1.2.1 双端测距定位

根据定位原理的不同,可将行波法分为单端法和双端法两种。单端法的原理是利用检测到的初始行波与来自故障点的第一个反射波之间的时间差来进行测距^[12]。双端法的原理是设置两端行波记录点,然后在已知行波传播波速和相关参数的基础上,通过计算两端行波的时间差来确定故障距离,从而明确故障位置^[13-14]。

目前,常用双端法实现故障定位。双端法测距原理示意图如图2所示。

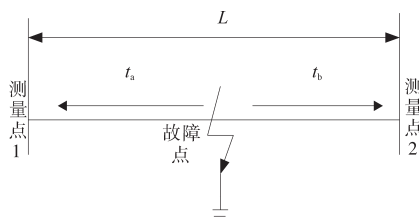


图2 双端法测距原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of double-end method

双端法原理计算过程如下:

$$Y = \frac{(t_a - t_b)v + L}{2} \quad (1)$$

式中:Y为故障点距离; t_a 为行波从故障点到达测量点1的时间; t_b 为行波从故障点到达测量点2的时间; v 为行波传播速度; L 为线路总长。

双端法通过设置两端行波记录点,使得测距结果

的可靠性比单端法更强^[15]。

1.2.2 二进小波变换与行波故障定位

一般来说,行波信号是一种频率较高的暂态信号,其特点是不易与噪声信号区分开,导致测距定位结果不可靠,也在一定程度上增加了测距定位的时间。而双端法不易区分行波信号与噪声信号,也使得双端测距定位法还存在一定程度的定位误差。

小波变换是一种信号分析与处理方式,通过对信号与小波基作卷积运算,将信号分解为不同成分。小波变换具有消噪性,可以用于识别故障分量,且小波变换模极大值还能够表示在相应频带下的信号强度,从而实现对故障特征的检测。小波变换具有多种形式,其中,二进小波变换是由二进制小波完成的变换,是一种连续小波变换半离散化的结果,具有更高效的滤波消噪作用。由于本文研究的目的是为了实现更为精确、高效率的故障定位,因此,将双端测距定位法与二进小波变换过程相结合,更有效实现水电配电网单相接地故障定位。

一般来说,小波变换的模极大值与信号异常位置直接相关。对行波检测信号实施二进小波变换后,当其模极大值的位置与故障点(异常点)的位置重合时,可说明行波到达检测点的时间。

假设水电配电网单相接地故障的初始行波信号为 $s(t)$,对其实施二进小波变换后可得到:

$$W_2s(t) = s(t)\omega_2(t) \quad (2)$$

其中
$$\omega_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} k_{ij}(t) dt$$

式中: $\omega_2(t)$ 为基本小波函数; $k_{ij}(t)$ 为小波基函数; i 为尺度参数; j 为时移参数。

式(2)表示当二进小波变换过程的输入信号为 $s(t)$ 时, $\omega_2(t)$ 对应的响应。

对 $s(t)$ 进行二进小波变换,可根据不同频率对信号进行分解,再以不同尺度 q 对分解后的信号进行离散处理从而得到二进小波模极大值。这一二进小波变换过程即为一个频率可变的滤波消噪装置。

在此基础上,利用二进小波变换的模极大值判断信号的异常点。一般来说,二进小波变换的模极大值点与 $s(t)$ 经二进小波函数变换后的信号 $W_2s(t)$ 的极值点是相对应的。因此,根据 $W_2s(t)$ 的极值点位置确定行波信号 $s(t)$ 到达线路两端的

时间 T , 将这一结果与双端法原理计算结果相结合, 从而得到最终的故障点距离 Z , 过程如下:

$$Z = \frac{Tv + L + 2Y}{4} \quad (3)$$

综上所述, 本研究在完成行波检测和选线的基础上, 结合双端法和二进小波变换过程的故障定位具体流程如下:

步骤 1: 确定存在单相接地故障的水电配电网的拓扑结构;

步骤 2: 在待检测的水电配电网设置行波记录装置;

步骤 3: 启动装置, 采集两端行波;

步骤 4: 判断采集的行波是否为故障行波。若不是故障行波, 则回到步骤 3, 重新采集;

步骤 5: 若检测到故障行波, 根据故障行波传输到两端检测点的时间量的不同, 计算故障距离;

步骤 6: 利用二进小波变换过程的滤波消噪作用, 根据其模极大值判断信号的异常点。

步骤 7: 将双端法与二进小波变换定位结果相结合, 然后验证得到的故障点是否为“伪故障点”。若不是伪故障点, 则输出结果, 否则则返回步骤 3。

2 实例分析

为验证基于行波检测的水电配电网单相接地故障定位方法的实际应用性能, 设计如下仿真对比实验。

2.1 仿真环境及方法设计

利用 Matlab 仿真系统搭建仿真实验环境、搭建三相线路, 设置模拟单相接地故障后, 通过 ANALOG DEVICES 数据转换和信号处理, 利用开口式行波传感器、行波定位装置及不同的定位方法共同完成对比实验, 并利用 Matlab 仿真系统将所得数据转换成 .mat 格式文件, 然后对行波进一步处理。

仿真实验时间为 30 s, 装置采样间隔为 1 ms。实验选用的输电线路为三相线路, 图 3 为在仿真环境下搭建的 10 kV 配电线路在无故障状态下的仿真模型。

配电线路相关参数设置如下: 配电线路总长 20 km, 电阻 1Ω , 电感 1.08 mH, 电容 $0.011 \mu\text{F}$, 线间电感 $0.1 \mu\text{F}$, 线间电容 0.1 nF 。

实验所用的行波采集与定位装置如图 4 所示。

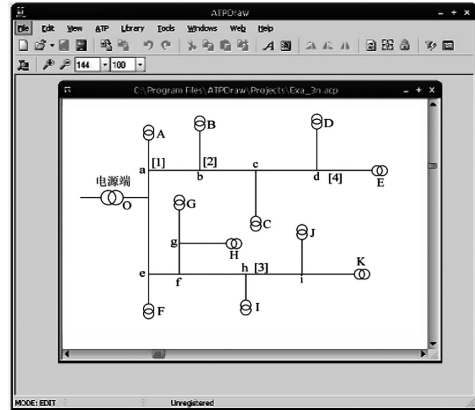


图 3 无故障状态下配电线路仿真模型

Fig.3 Simulation model of distribution line under no fault condition



(a) 开口式行波传感器



(b) 行波定位装置

图 4 行波采集与定位装置

Fig.4 Wave acquisition and positioning device

2.2 测试结果与分析

由于单相接地故障的发生具有很多的随机性, 即可能发生在任何时间、任何位置, 因此在这里假设故障发生的初相角为 30° , 金属性接地, 故障分别发生在图 3 中 [1], [2], [3], [4] 四点。在此基础上, 分别利用本文所提的行波检测法和传统的阻抗法、信号注入法以及行波折反射特征法, 计算这四个故障点距离与实际故障距离的误差以及故障检测定位所花费的时间。

首先对比不同方法的故障定位误差, 结果如表 1 所示。分析表 1 可知, 利用本研究设计的行波检测法对水电配电网四个位置的单相接地故障进行定位, 定位误差分别为 1.2 m, 1.9 m, 3.8 m, 2.6 m。

上述结果均小于阻抗法、信号注入法和行波

表1 不同方法对配电网单相接地故障定位的误差对比
Tab.1 Error comparison of different methods for single phase to ground fault location in distribution network

项目	故障位置	实际距离/m	测试距离/m	误差/m
行波检测法	[1]	356.4	355.2	1.2
	[2]	125.6	123.7	1.9
	[3]	268.5	272.3	3.8
	[4]	458.2	455.6	2.6
阻抗法	[1]	356.4	341.2	15.2
	[2]	125.6	136.8	11.2
	[3]	268.5	284.3	15.8
	[4]	458.2	436.0	22.2
信号注入法	[1]	356.4	333.6	22.8
	[2]	125.6	148.6	23.0
	[3]	268.5	255.4	13.1
	[4]	458.2	483.9	25.7
行波折反射特征法	[1]	356.4	354.6	1.8
	[2]	125.6	123.3	2.3
	[3]	268.5	264.0	4.5
	[4]	458.2	455.0	3.2

折反射特征法的测量误差,表明行波检测法能够有效实施对配电网单相接地故障的定位,且定位结果精准度较高。在此基础上,对比以上四种方法对故障的检测定位时间,结果如图5所示。

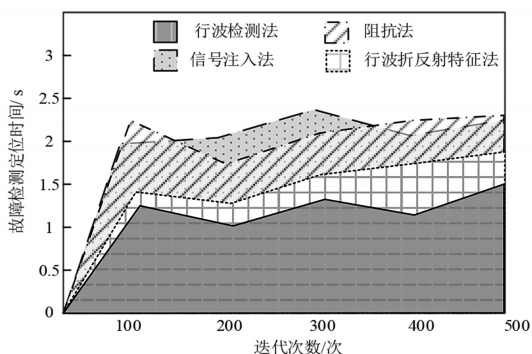


图5 不同方法对故障检测定位时间对比
Fig.5 Comparison of fault detection location time by different methods

分析图5可知,与传统的基于阻抗法的故障定位方法、基于信号注入法的故障定位方法和基于行波折反射特征法的故障定位方法相比,利用行波检测法进行故障定位,可以明显缩短故障检测定位时间,最高的故障检测定位耗时仅为1.5 s,说明行波检测法具有较高的检测定位效率。

综上所述,本研究设计的基于行波检测的水电配电网单相接地故障定位方法无论是在定位结果准确性方面,还是在故障检测定位时间方面均具有较强的实用性。

3 结论

随着小电流接地系统的广泛应用,单相接地故障时有发生,不仅给电力企业带来经济损失,也给用户正常用电带来了严重影响。因此为减少该故障带来的损失,有必要进行有效的配电网单相接地故障定位研究。为此,针对当前阻抗法、信号注入法定位误差大,时间长的问题,提出一种基于行波法进行单相接地故障定位的方法,并将其应用于水电配电网中。经实例测试,该方法定位误差和检测定位耗时均更小,证明了方法的有效性。

参考文献

- [1] 杨婧,辛明勇,欧家祥,等. 基于大数据的配电网线损定位与评估方法研究[J]. 中国测试,2019,45(7):19-24.
- [2] 杨铁涵,张靖,何宇,等. 电力系统概率小扰动稳定性研究进展[J]. 电测与仪表,2019,56(18):57-65.
- [3] 李卫国,王旭光,卢广旗,等. 基于DOST能量相似度的有源配电网故障区间定位方法[J]. 电测与仪表,2019,56(6):50-55.
- [4] 马伟,裘愉涛,丁冬,等. 基于阻尼最小二乘法的单相接地故障定位方案[J]. 电网技术,2018,42(9):3049-3054.
- [5] 袁佳歆,李响,张哲维. 基于注入信号的有源配电网单相接地故障选线方法[J]. 电测与仪表,2020,57(5):44-49.
- [6] 何锐,韩涛,顾泽玉,等. 基于行波折反射特征的单相接地故障区段定位方法[J]. 智慧电力,2018,46(1):77-82.
- [7] 程启明,高杰,王晓卫,等. 基于优化双稳态去噪的小电流接地系统故障选线方法[J]. 高压技术,2018,44(11):3483-3492.
- [8] 许冲冲,罗勋华,张维,等. 基于频谱序列峭度分析的小电流接地故障区段定位研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(20):52-58.
- [9] 彭楠,杨智,梁睿,等. 一种半波长输电线路的分布式行波测距方法[J]. 电机与控制学报,2019,23(8):35-42.
- [10] 彭道刚,赵晨洋,关欣蕾,等. 基于IEC61850的智能配电网主站级通信系统研究[J]. 电气传动,2018,48(12):46-50.
- [11] 胡福年,张认,葛苗苗. 基于FTU的闭式配电网故障测距研究[J]. 控制工程,2019,26(5):864-871.
- [12] 张乃刚,张加胜,郑长明,等. 基于零序电流幅值分布相似性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(13):120-125.
- [13] 邓丰,李欣然,曾祥君,等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4399-4409.
- [14] 陈平,梁凤强,孟超,等. 基于组合行波测距原理的T型线路测距方法[J]. 山东大学学报(工学版),2016,48(1):117-123.
- [15] 李芳芳,杜明田,赵泉刚,等. 基于分层试拉的配电网小电流接地故障定位方法[J]. 电子设计工程,2018,26(21):21-25.

收稿日期:2020-09-03

修改稿日期:2021-01-27