

配电系统单相接地故障行波特征仿真分析

小电流接地系统故障选线问题是关系到配电系统安全运行和可靠供电的一个重要问题。针对利用故障行波信号的选线方法,本文基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态分析软件,构建了三种接地模式下的配电系统行波仿真模型,对不同接地故障类型下的行波信号进行观测。通过仿真平台对配电系统单相接地的故障行波特性进行分析,从而为行波选线设备装置的选型及入网检测提供参考及相关性能要求。

俞小勇 周杨珺 李克文 欧阳健娜/广西电网有限责任公司电力科学研究院

0 引言

我国配电网通常采用中性点非直接接地系统又称作小电流接地系统,主要有中性点不接地系统、经消弧线圈接地系统及经电阻接地系统三种。在配电网中发生接地故障的 80% 为单相接地故障。小电流接地系统发生单相接地故障时,由于没有形成短路回路,接地电流较小且三相电压仍然对称,给选线判断造成很大困难。特别是配电网发生高阻性单相接地故障时,接地电流很小,不容易检测发现,而被经常当作正常线路长期运行,给人身财产安全带来极大的隐患。我国电力规程规定,发生单相接地故障时,小电流接地系统可带故障继续运行 1~2 h^[1]。在发生单相短路接地故障时系统的相电压上升为线电压,给系统的绝缘造成了严重威胁,因此要尽快选出故障线路,但是现在大部分供电部门仍然采用传统的人工试拉路方法选择故障线路、登杆摇测等办法查找故障点,效率极低,严重降低了配电网

网的安全稳定运行能力。国内选线装置类型繁多,如何选取性能优异的选线装置以提高选线的正确性已成为供电部门面临的一个迫切问题。

现有故障选线原理按照利用信号方式不同,主要可分为稳态信号分析法^[2]、注入信号分析法^[3]和暂态信号分析法。稳态信号分析法主要有:零序电流基波比幅法、零序电流基波比相法、零序电流五次谐波法和零序有功功率法等。由于稳态零序电流的幅值较小且有受系统运行方式、接地故障类型以及系统不平衡电流等因素的影响较大,因此基于稳态零序电流分量的选线装置在实际运行中选线效果不佳。注入信号分析法的原理是通过电压互感器(TV)二次侧接地相注入信号,该信号通过接地点构成回路,检测配电网出线端注入信号的强弱正确选出故障线路^[4]。注入信号分析法对金属性接地和低阻接地取得了较好的选线效果,但是辨识高阻接地的能力较弱,而配电网发生单相接地短路故障大部分为高阻接地故障,这是该方法的一个缺陷。暂态信号分析法较为稳态信号分析法的优势在于:暂态信号往往强于稳态信号,特征量明显并且基本不受中性点接地方式的影响,但是暂态量持续时间较短,对设备性能提出了更高的要求。基于暂态零序电流行波的选线方法是一种新型选线方法,它较传统的选线方法有特征明显和抗干扰能力强等优点,具有更好的可靠性和适应性^[5]。

当前研究的重点大多集中在用何种算法来提取暂态信号特征上,却很



俞小勇/工程师

关键词/Keywords

配电系统 ·
小电流接地 ·
PSCAD/EMTDC ·
选线 ·
故障行波特性 ·

少分析故障信号的暂态特性,而明确故障信号的暂态特性是进行故障选线的基础,本文将通过理论分析和仿真试验对暂态零序电流行波进行分析,并以此为基础提出了对行波选线装置性能指标的要求。

1 行波选线原理

故障线路发生单相接地故障时故障点将产生暂态电流行波,暂态电流行波将沿着故障线路向母线传导并在母线处发生折射和反射,接地线路的反射波和入射波在该分支线路上叠加,形成接地线路的初始行波^[6]。来自于接地点的初始行波经折射进入非接地线路,形成非接地线路的初始行波。当行波传导到母线节点的瞬间满足基尔霍夫电流定律^[7]

$$\sum_{k=1}^n i_{0k} = 0 \text{ 或 } i_{0f} = - \sum_{i=1; i \neq f}^n i_{0k}$$

式中, n 为配线的条数; i_{0k} 和 i_{0f} 分别为第 k 条线路和故障线路的零序电流行波。

由上述分析得出发生单相接地短路时各线路初始零序电流行波幅值和相位特征:①故障线路的初始零序电流行波等于非故障线路初始零序电流行波之和,从而故障线路初始零序电流行波幅值最大;②故障线路初始零序电流行波的相位和非故障线路相位相反。这两点特征是行波法选线的基本理论依据^[8]。

2 基于 PSCAD 的模型的建立

如图 1 所示,针对某区域具体电网,通过 PSCAD 软件搭建典型的配电网模型,母线上接有 7 条出线,线路采用架空线路模型 Frequency Dependent (Phase) Model。长度依次为 5 km、18 km、6.5 km、3 km、4 km、6 km、7 km。将第二条线路设置为故障线路,故障点设置在线路末端距离母线 15 km 处。电源点采用理想模型内阻 $R=0$ 。变压器变比为 35 kV/10.5 kV,容量为 30 MW,为方便实现不同的中性点接线将变压器设置为 D/Y 接线。负荷模型采用三角形接法,排除负荷不平衡电流的影响。中性点接地方式分别设置为不接地,经高阻接地和经消弧线圈接地三种方式;故障类型分别设置为直接接地、经高阻接地,电弧接地三种类型。直接接地和高阻接

地的故障时间设置为: 0.124 s 发生 A 相接地短路,持续时间为 0.06 s。采样率设置为 1 MHz 即仿真步长设置为 1 μs。

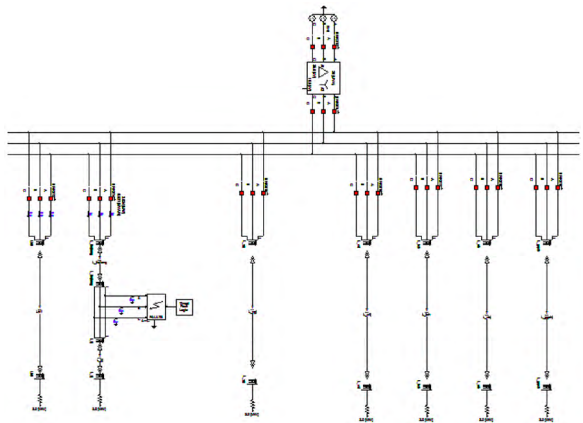


图 1 配电网拓扑图

3 接地故障的仿真

3.1 金属性接地故障的仿真

接地电阻设置为 10 Ω。仿真波形如图 2。

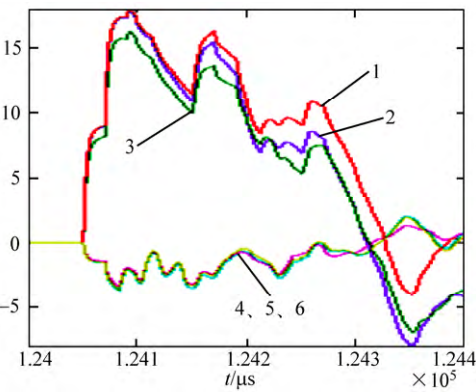


图 2 金属性单相接地故障时零序电流行波波形

图中曲线 1、2、3 分别为中性点经高阻接地系统、中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统发生单相金属性接地故障时故障线路 2 的零序电流行波。曲线 4、5、6 代表对应接地方式下健全线路 1 的零序电流行波。

由图 2 得:故障线路零序电流行波的幅值远大于健全线路且二者相位相反。比较各条故障线路和各条健全线路的行波波形可以看出:初始零序电流行波在形成初期的快速上升期波形高度吻合,中性点接地方式对行波快速上升期的波形影响很小,因而依据行波法原理选线方法较其它基于稳态分量和暂态分量的选线方法有更好的

适应性。

3.2 高阻接地故障的仿真

一般认为接地电阻大于 800 Ω即属于高阻接地，在实际运行中线路经草地、树枝、潮湿的墙壁等接地而发生的故障都属于高阻接地。在仿真中将接地电阻设置为 1 000 Ω。仿真波形如图 3。

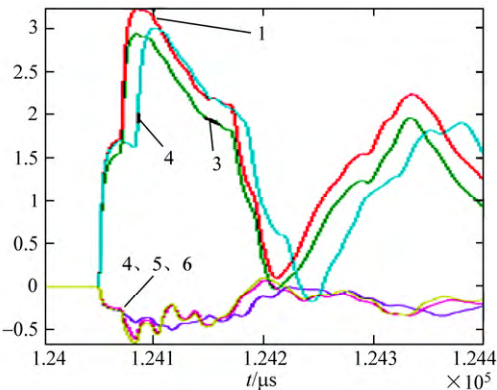


图 3 高阻单相接地故障时电流行波波形

图中曲线 1、2、3 分别代表中性点经高阻接地系统、中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统发生单相高阻接地时故障线路 2 的零序电流行波。曲线 4、5、6 代表对应接地方式下健全线路 1 的零序电流行波。

比较图 2、图 3 可已看出虽然发生高阻接地故障零序电流行波幅值远小于金属性接地时的幅值，但是故障线路波形仍然保持了幅值最大相位和与健全线路相位相反的特点，所以基于暂态零序电流行波的选线方法适用于单相高阻接地故障的选线。

3.3 电弧接地故障的仿真

间歇性电弧的仿真通过控制故障发生器的外部控制信号 FLT 来实现。故障发生器将在 FLT 突变为 1 时启动，在 FLT 变为 0 后第一次电流过零点切除故障。FLT 的波形如图 4。

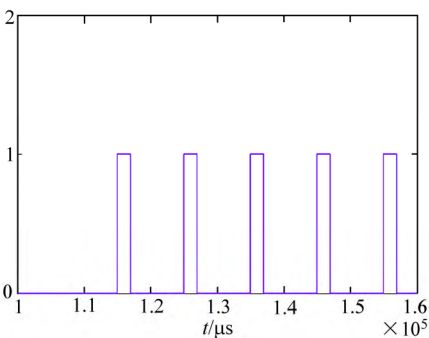


图 4 FLT 的波形图

不同中性点接地方式下电弧接地故障的零序电流如图 5。

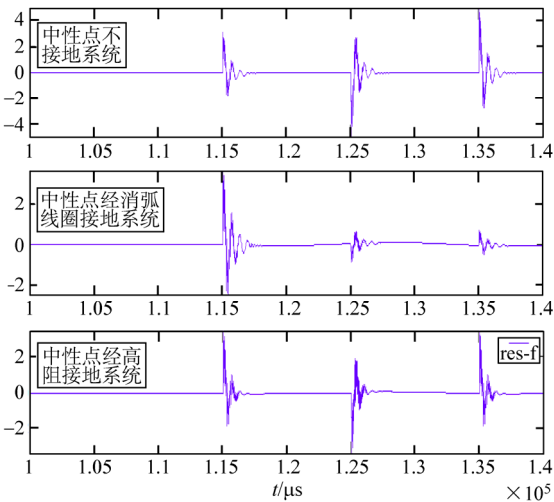
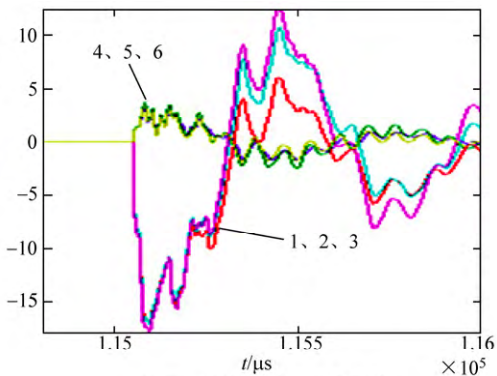
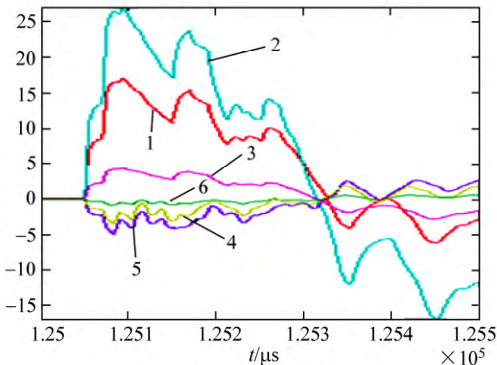


图 5 电弧接地故障的零序电流

为分析电弧重燃形成时零序电流行波和初次形成电弧时波形的不同分别提取前两次电弧形成时的波形如图 6a、6b 所示。



(a) 第一次电弧形成时的波形



(b) 第二次电弧形成时的波形

图 6 前两次电弧形成时的零序电流行波波形

图 6a、6b 中曲线 1、2、3 分别代表中性点

经高阻接地系统、中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统发生单相电弧接地故障时故障线路 2 的零序电流行波。曲线 4、5、6 代表对应三种中性点接地方式下健全线路的零序电流行波。

对比分析图 6a、6b 表明：①两次电弧形成时的零序电流行波满足故障线路和非故障线路零序初始电流行波极性相反，故障线路幅值远大于非故障线路的基本特征，利用极性比较法和幅值比较法的选线原理适用于电弧接地故障选线。②第二次电弧形成时，对于不同中性点接地方式下零序电流行波幅值有明显不同，中性点不接地系统零序电流行波幅值最大，中性点经高阻接地系统次之，中性点经消弧线圈接地系统幅值最小。这是因为经消弧线圈接地后，接地故障线路零序电流明显减小，降低了恢复电压速度。在实际系统中，接地电流的减小将降低弧光接地过电压的幅值，有利于电弧熄灭，避免了单相瞬时接地故障的跳闸，大大提高了供电可靠性^[9]。③间歇性电弧接地故障由于每次电弧重燃时都会产生零序电流行波，在初次选线失败后仍有机会正确选线，从而大大提高了选线的成功率。

4 初始电流行波特性及对选线设备的要求

为分析初始电流行波的波形的变化规律，分别提取故障行波形成 4 μs 时的幅值和 20 μs 时行波到达峰值时的幅值。初始零序电流行波变化情况如表 1 所示。

分析表中 9 种情况下故障行波幅值得：初始电流行波在形成初期上升极为迅速，在 4 μs 即可到达峰值的 75%左右，在之后的 16 μs 时间变化较为缓慢。这表明小电流接地故障发生时初始零序电流行波的上升率相同而幅值受接地电阻的影响较大。选线装置要有较高的采样率才能正确捕捉到快速上升的零序电流行波，这要求选线设备有较高的数据采集性能。依据采样定理选线装置的 ADC 采样率必须在 500 KHz 以上才能满足有效采样的要求。转换时间对初始电流行波波头的捕捉有重要影响，转换时间过长将导致 ADC 不能对初始电流行波有效采样造成选线装置拒动甚至勿动。由于行波的极速上升时间为 4

μs 要求 ADC 的转换时间小于 2 μs。

表 1 初始电流行波幅值

中性点接地方式	单相接地故障类型	故障线路初始电流行波形成 4 μs 时的幅值/A	健全线路初始电流行波形成 4 μs 时的幅值/A	故障线路初始电流行波峰值/A	4 μs 幅值占峰值百分比
不接地	金属性接地	6.785 1	-1.130 8	9.024 2	75.2
	高阻接地	1.275 0	-0.212 6	1.700 8	75.0
	电弧接地	-6.444 9	1.074 7	-8.559 4	75.3
高阻接地	金属性接地	6.810 5	-1.107 4	9.060 1	75.2
	高阻接地	1.281 7	-0.208 5	1.726 7	74.2
	电弧接地	-6.468 9	1.052 3	-8.593 1	75.3
消弧线圈接地	金属性接地	6.159 0	-1.026 5	8.200 5	75.1
	高阻接地	1.159 9	-0.193 4	1.563 9	74.2
	电弧接地	-6.815 4	1.134 2	-9.043 7	75.4

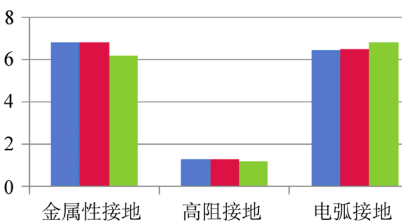


图 7 故障线路 4 μs 时行波幅值

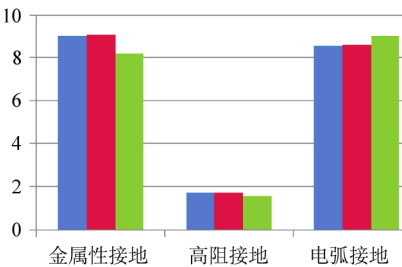


图 8 故障线路初始行波电流峰值

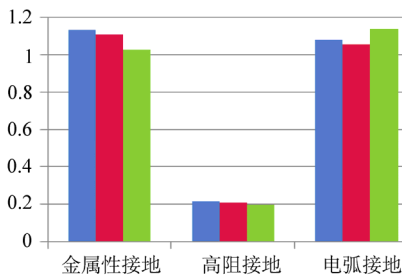


图 9 健全线路 4 μs 时行波幅值

根据图 7~图 9 比较不同接地故障下的故障行波的幅值表明 :故障线路和健全线路的初始零序电流行波幅值受接地电阻影响较大。故障线路行波幅值在-10~10 A 之间,最小幅值约为 0.2 A。考虑到实际运行的配电网母线所接馈线数量较多,以及接地电阻、接地点位置以及接地时刻的影响零序电流行波的幅值范围会更高,最小零序电流幅值会更小。设行波幅值范围为-15~15 A,对不同分辨率转换器误差分析如表 2 所示。

表 2 AD 转换器误差分析

AD 转换器分辨率	分辨的最小电流/A	最大量化误差/A	全程相对误差
10 位	0.029 30	0.014 60	0.097 33%
12 位	0.007 30	0.003 65	0.025 47%
16 位	0.000 46	0.000 23	0.001 53%

综上所述,基于上述分析总结出初始零序电流行波的特点 :①行波波形不受中性点接地方式的影响;②行波的幅值受到接地电阻的影响,接地电阻越大行波幅值越小 ;③行波上升率不受中性点接地方式和故障类型的影响。

由此对选线装置的性能要求 :①ADC 采样率不得低于 500 kHz ;②ADC 分辨率不得低于 10 位 ;③ADC 的转换时间小于 2 μs。

5 结束语

初始零序电流行波波形受中性点接地方式和故障类型的影响较小,依据初始零序电流行波比幅、比相法的选线原理适应于不同接线方式、不同故障类型的单相接地故障的选线。在此本文针对某区域具体电网,基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态分析软件,构建了三种接地模式下的配电系统行波仿真模型,观测、分析不同接地故障类型下的行波信号。对配电系统单相接地的故障行

波的特性进行了深入分析,为下一步测试基于行波原理的选线设备,确定准确的测试波形和提出具体选线设备性能指标,打下了良好的基础。

参考文献

[1] 王艳松,谢飞. 配电网单相接地故障的仿真分析[J]. 高电压技术, 2008, 34 (1): 123-127.

[2] 徐丙垠等. 小电流接地故障选线技术综述[J]. 电力设备, 2005, 6 (4): 1-7.

[3] 桑在中,张慧芬,潘存贞. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护. 电力系统自动化, 1996, 20 (2): 11-12.

[4] 程路,陈乔夫. 小电流接地系统单相接地选线技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33 (18): 219-224.

[5] 齐郑,杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J], 电力系统自动化, 2004, 28 (14): 1-5.

[6] 党锴钊. 行波技术在配电线路接地故障检测中的应用[J]. 广西电业, 2013, 161: 94-96.

[7] 董新洲,毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 1-5.

[8] 高立克,俞小勇,李克文,等. 小电流接地系统行波法选线的 RTDS 测试可行性分析[J]. 电力系统自动化, 2012. 36 (17): 113-118.

[9] 侯玉强,高建成,张晓. 基于 PSCAD 的经消弧线圈接地系统仿真分析[J]. 煤矿机电, 2011: 60-64.

作者简介

俞小勇 (1985-), 男, 工程师, 主要研究方向为配电自动化及配网保护。

(收稿日期: 2015 - 12 - 10) EA
(编辑: 朱金凤)