

断线故障行波测距分析

由于绝缘导线的应用, 配电线路发生断线故障的概率大为增加, 且断线故障一直缺乏有效的定位或测距手段。阐述了电力线路开断时行波的产生机理, 分析了断线故障初始行波及其传输特征, 探讨了利用行波原理测量断线故障距离的可行性和方法, 分别对输电线路和配电线路中的测距可靠性进行了分析。利用行波原理能够测量断线故障距离, 其可靠性与断线时刻故障点电流的大小成正比, 因此测距可靠性不仅与总体负荷电流大小有关, 还与故障点位置有关。仿真验证了分析的正确性。

俞恩科¹ 薛永端² 李世强¹ 何旭涛¹ 林晓波¹ / 1. 国网舟山供电公司海洋输电技术研究中心 2. 中国石油大学(华东) 信息与控制工程学院



俞恩科/高级工程师

近年, 由于绝缘导线的大量应用, 配电线路雷击断线事故频繁发生^[1, 2]。受大气过电压影响, 输电线路也可能发生闪络断线故障^[3]。线路开断后, 保护装置并不跳闸, 悬垂的导线对人身及设备安全造成了很大威胁, 发现并及早消除断线故障十分必要。

断线作为一种常见的电力线路故障形式, 其故障定位或测距一直缺乏有效手段。对于配电线路, 由于支线或末端断线故障引起的电流变化相比于出线负荷电流较小, 不能有效利用, 一般是在变电站处利用三相电压的变化实现断线故障的识别, 对断线故障进行测距或定位的研究很少, 鲜见相关报道。而对输电线路, 由于断线故障发生概率很小, 也未见研究报道。

利用故障产生的行波信号可以确定故障距离, 该技术已经在输电线路得到成功应用, 基于行波原理的配电线路故障测距技术也在研究和应用之中^[4-8]。但这些研究和应用仅局限于短路和接地

故障, 而对于断线故障并未涉及。

利用行波原理同样可以测量断线故障的距离。本文阐述了电力线路断线故障后行波的产生机理以及行波特征, 探讨了利用行波原理测量断线故障距离的可行性和方法以及在不同线路中的应用特点。

断线故障行波的产生

在线路发生断裂时, 故障点电流从正常负荷电流瞬间降为零, 必然在线路上引起暂态行波过程。在线性电路的假设前提下, 断线故障暂态行波的产生机理可以利用叠加原理来分析。

断线故障等效于断线瞬间在故障点两侧并联接入两个幅值相同、相位相反的附加电流源。如果考虑故障电弧的出现(即断线时电流并不是瞬间降为零, 而存在一个很短时间的过渡过程), 还要在故障点两侧并联接入一个电弧电阻, 电弧电阻可以用非线性电阻来描述。图1a为单相线路断线的等效电路, 其中线路首端所连接的网络 A_M 为有源网络。假定附加电流源的电流 $i_r(t)$ 选取为断线前线路通过电流(为故障稳态电流)的反相电流, 则图1a中的网络可以分解为故障前稳态网络和故障附加网络, 分别如图1b、c所示。在故障附加网络中的 P_M 为无源网络。

由断线故障所产生的电弧暂态行波过程是在故障附加网络中进行的, 由此引起线路各点的电压和电流分量变化实质上就是无源分布参数网络对附加电流源的响应, 称为故障分量。

断线电弧暂态行波过程的波源就是

关键词/Keywords

电力线路·
断线故障·
行波·
故障测距·

在故障附加网络中突串于故障点两侧之间的附加电流源 $i_F(t)$ 。该附加电流源产生的初始行波浪涌将向两个相反的方向传播，并在线路末端、故障点和系统中其他波阻抗不连续点之间来回反射和透射，直到进入稳态。

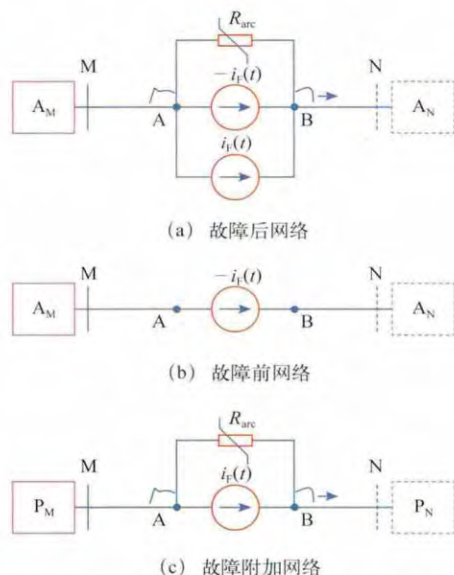


图1 单相线路断线故障行波产生示意图

断线故障初始行波特征分析

在故障附加网络中，根据断线故障（设为A相）时故障点的故障分量边界条件

$$\begin{cases} i_{BA} + \frac{u_{BA}}{R_{BF}} = i_{BF} \\ u_{BB} = u_{BC} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， u_{BA} 、 u_{BB} 和 u_{BC} 分别为A、B和C三相在断线处线路两端电压； i_{BA} 为故障点流入A相线路的电流； i_{BF} 为虚拟电源，等于故障前A相电流的反相电流； R_{BF} 为弧光等效电阻。可以得到模域的边界条件

$$\begin{cases} u_{B1} = u_{B2} = u_{B0} = \frac{u_{BA}}{3} \\ i_{B1} + i_{B2} + i_{B0} + \frac{3u_{B0}}{R_{BF}} = i_{BF} \end{cases} \quad (2)$$

式中， u_{B1} 、 u_{B2} 和 u_{B0} 分别为三相在断线处线路两端电压的1模、2模和0模分量； i_{B1} 、 i_{B2} 和 i_{B0} 分别为故障点三相电流的1模、2模和0模分量。

断线故障时初始电流行波的线模和零模分配如图2所示。

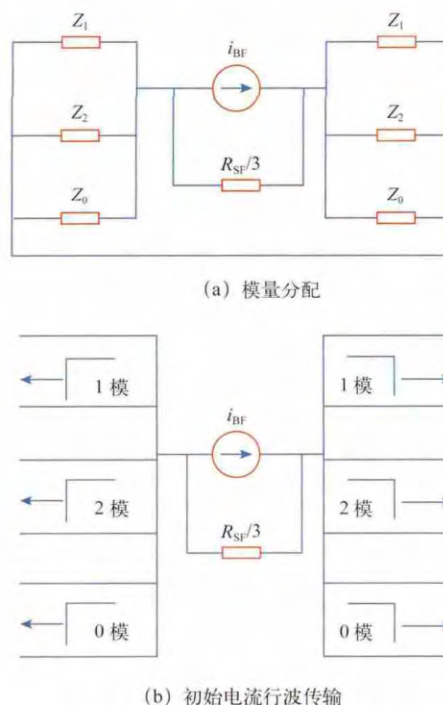


图2 断线故障初始电流行波模量分配及传输示意图

根据图2，故障点初始电流行波的线模和零模分量分别为

$$\begin{cases} i_{B1} = i_{B2} = \frac{Z_1 Z_0 R_{BF}}{Z_1 Z_0 R_{BF} + Z_1 Z_2 R_{BF} + Z_2 Z_0 R_{BF} + 6 Z_1 Z_2 Z_0} i_{BF} \\ i_{B0} = \frac{Z_1 Z_2 R_{BF}}{Z_1 Z_0 R_{BF} + Z_1 Z_2 R_{BF} + Z_2 Z_0 R_{BF} + 6 Z_1 Z_2 Z_0} i_{BF} \end{cases} \quad (3)$$

无论对于1模分量、2模分量还是0模分量，故障点左右两侧线路上的初始电流行波幅值均等于故障点初始电流幅值，但两侧电流行波的极性却相反（电流正方向为从故障点指向线路）。相应的，两侧线路上的初始电压行波的1模分量 u_{B1L} 、 u_{B1R} ，2模分量 u_{B2L} 、 u_{B2R} 和0模分量 u_{B0L} 、 u_{B0R} 可以表示为

$$\begin{aligned} u_{B1R} &= -u_{B1L} = i_{B1} Z_1 \\ &= \frac{Z_1 Z_2 Z_0 R_{BF}}{Z_1 Z_0 R_{BF} + Z_1 Z_2 R_{BF} + Z_2 Z_0 R_{BF} + 6 Z_1 Z_2 Z_0} i_{BF} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u_{B2R} &= -u_{B2L} = i_{B2} Z_2 \\ &= \frac{Z_1 Z_2 Z_0 R_{BF}}{Z_1 Z_0 R_{BF} + Z_1 Z_2 R_{BF} + Z_2 Z_0 R_{BF} + 6 Z_1 Z_2 Z_0} i_{BF} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u_{B0R} &= -u_{B0L} = i_{B0} Z_0 \\ &= \frac{Z_1 Z_2 Z_0 R_{BF}}{Z_1 Z_0 R_{BF} + Z_1 Z_2 R_{BF} + Z_2 Z_0 R_{BF} + 6 Z_1 Z_2 Z_0} i_{BF} \end{aligned} \quad (6)$$

故障点两侧线路上初始电压行波满足

$$u_{B0L} = u_{B1L} = u_{B2L} = -u_{B0R} = -u_{B1R} = -u_{B2R} \quad (7)$$

即无论对于线模分量还是零模分量,故障点两侧初始电压行波的幅值相等,极性和传输方向则相反。

上述分析过程中,实际上已经假设在故障点两侧线路上行波和电流的正方向均为从故障点指向线路的方向。这与习惯上的定义不同,本章以下部分均以此定义为准。本定义的优点是在分析初始电压和电流行波特性时,两个方向的初始行波均为正向行波。同时,由于在线路两端行波和电流的正方向均为从母线指向线路,这样的定义也可以使检测装置不用再做极性转换。

而故障点虚拟电源 i_{BF} 两端的电压 u_{BF} 可以表示为

$$u_{BF} = -u_{BA} = 3u_{B1} = 3(u_{B1L} - u_{B1R}) \\ = \frac{6Z_1Z_2Z_0R_{BF}}{Z_1Z_0R_{BF} + Z_1Z_2R_{BF} + Z_2Z_0R_{BF} + 6Z_1Z_2Z_0} i_{BF} \quad (8)$$

可见,单相断线故障产生的初始电流行波和初始电压行波特征分别与单相接地故障产生的初始电压行波和初始电流行波特征相似。

也可以推出,单相断线故障时只在故障相与健全相之间产生行波信号,而两个健全相之间并无行波信号产生。

由于电缆线路波阻抗小于架空线路波阻抗,同等条件下,电缆线路发生断线故障后初始电压行波幅值较小。

从式(3)~式(7)还可以得出,鉴于一般线路零模波阻抗大于线模波阻抗,断线故障初始电流行波的线模分量将大于其零模分量;而其初始电压行波的线模分量和零模分量则完全相等。由于零模线路电阻较大,相应的零模信号损耗也大,经过长距离的传输后电流行波和电压行波的零模分量都将小于其线模分量。

断线故障行波测距的基本模式

1. 测距方法的选取

行波故障测距主要利用了故障时产生的电压、电流行波信号,根据行波在测量点与故障点往返一次的时间差(单端法)或者初始行波到达

线路两端的时间差(双端法)测量故障距离。单端法必须识别出故障点的反射波,双端法只检测故障产生的初始行波波头到达时间,不需要考虑后续的反射与透射行波,测距结果更可靠。

2. 测距信号的选取

对于测距信号的选取,输电线路主要应用电流行波实现故障测距。配电线路系统运行方式发生变化,线路结构复杂,需要根据其结构特点选择合适的测距信号。

一般配电系统母线端出线较多,所用变压器和互感器中存在分布电容,线路也带有并联的无功补偿电容,行波在母线处产生反射时,电流行波反射系数为正,而电压行波反射系数为负,电流行波容易获取,电压行波不易获取,应该选用电流行波作为测距信号。为用户和企业供电的线路末端带有变压器负荷,对于高频行波信号,其交流阻抗很大,近似为开路状态,应该利用初始电压行波作为测距信号。

对有些特殊的配电系统,母线出线较少(1条或2条),如铁路贯通/自闭线路,其线路末端,一般不带负荷,相当于开路状态,应该利用初始电压行波作为测距信号。

对于母线端和线路末端都有较多出线的配电线路(比如开闭所),线路两端都应该利用初始电流行波作为测距信号。

3. 行波分量的选择

对于行波模分量的选择,考虑到零模行波分量在传播过程中将发生严重的衰减和畸变,其传播速度也不稳定,因此,应该选择损耗较小、参数比较稳定的线模分量实现故障测距。

断线故障的检测可靠性分析

对属于串联故障的断线故障,其故障点为虚拟电流源。由于线路中电流分布的不均衡性,使得故障位置对初始电流和电压行波有较大的影响。

线路中的电流由负荷电流和分布电容电流构成。由于负荷主要是沿线分布,负荷电流随出线距离增加呈阶梯性下降。在纯架空线路或纯电缆线路中,分布电容电流呈线性下降趋势。在架空

电缆混合线路中,分布电容电流呈分段线性下降趋势。图3为一个线路电流的典型分布示意图(以单相为例)。总体而言,线路电流随到电源距离的增加而不断减小,线路末端电流接近于零。

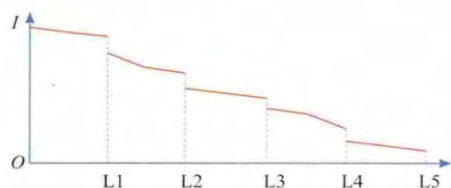


图3 线路电流幅值随到电源距离变化示意图

图3中, L1~L5为沿线路分布的小型负荷位置。因此,断线故障产生的初始电压电流行波幅值随故障位置有很大的变化。一般情况下,断线位置距离母线越近,初始电压电流行波幅值越大,测距的可靠性越高;相反,断线位置离母线越远,测距的可靠性越低。由于分支线的电流一般非常小,分支线发生断线故障时测距的可靠性相应的也非常低。

对比接地故障和断线故障。设接地故障的过渡电阻为0,断线故障的过渡电阻为无穷大,其他条件相同。如果故障点故障前线路电流 i_p 与线路电压 u_p 满足关系

$$i_p > \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0}{(Z_1 + Z_2 + Z_0) Z_2 Z_0} u_p \quad (9)$$

则断线故障产生的初始电压电流行波线模分量大于同点接地故障的初始电压电流行波线模分量,否则前者将小于或等于后者。

同样的过程,对比短路故障和断线故障。故障点故障前线路电流 i_p 与两相间电压 u_l 如果满足关系

$$i_p > \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0}{3(Z_1 + Z_2) Z_2 Z_0} u_l \quad (10)$$

则断线故障产生的初始电压电流行波线模分量大于同点发生短路故障的初始电压电流行波线模分量。

对于10 kV系统,相电压的峰值为 $U_{pmax} = 8.16$ kV,线电压的峰值为 $U_{lmax} = 14.14$ kV。设架空线路模波阻抗典型值为300 Ω 、零模波阻抗典型值为500 Ω ,式(9)和式(10)可以分别写为

$$i_p > 19.3 \text{ A} \quad (11)$$

$$i_p > 20.4 \text{ A} \quad (12)$$

设电缆线路模波阻抗典型值为60 Ω 、零模波阻抗典型值为100 Ω ,式(9)和式(10)可以分别写为

$$i_p > 96.4 \text{ A} \quad (13)$$

$$i_p > 102.1 \text{ A} \quad (14)$$

当满足上述条件时,断线故障的检测可靠性会高于接地和短路故障。

一般线路的线路电流为几十安培到几百安培,因此断线故障测距的总体可靠性较高,甚至可能高于接地和短路故障。

仿真验证

利用电磁暂态计算程序(ATP)建立10 kV架空线路的故障暂态行波仿真模型,设线路两端分别为S端和R端,线路的长度为15 km,模型中架空线参数参见文献[9],根据正序参数计算得架空线波阻抗 $Z_0 = 385.10$ Ω ,波速度为 $v_0 = 295.08$ m/ μ s。仿真步长为0.1 μ s。

设在距离S测量点4 km处发生A相断线故障,选用电压行波AB线模分量进行测距,则两端接收到的行波波形如图4所示。

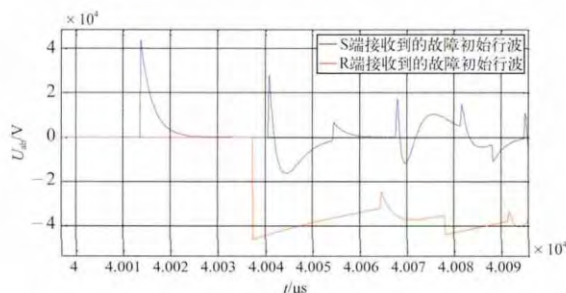


图4 两测量点接收到故障行波图

由图4可以看出,对于单相断线故障,能准确检测出故障初始行波到达线路两侧的绝对时刻, $t_s = 4.00140 \times 10^4$ μ s, $t_R = 4.00377 \times 10^4$ μ s,利用双端公式^[6]计算故障点F到S测量点的距离, $L_{SF} = \frac{1}{2} [v(t_s - t_R) + L] = 4003$ m,与理论值相差3 m。

结束语

线路发生断线故障后,会在线路上引起暂态行波过程,但单相断线故障只在故障相与健全相

之间产生行波信号，而两个健全相之间并无行波信号产生。鉴于一般线路零模波阻抗大于线模波阻抗，断线故障初始电流行波的线模分量将大于其零模分量；而其初始电压行波的线模分量和零模分量则完全相等。

利用行波原理能够测量断线故障距离，测距方法可以选取单端法或双端法。对于测距信号的选取，输电线路主要应用电流行波，配电线路系统运行方式发生变化，线路结构复杂，需要根据其结构特点选择合适的测距信号。测距模量一般选择损耗较小、参数比较稳定的线模分量。

断线故障的行波测距可靠性不仅与总体负荷电流大小有关，还与故障点位置有关。由于很多线路结构复杂、沿线环境恶劣，为进一步提高行波测距的可靠性和准确度，仍需要进行大量的研究工作。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [2] 陈维江, 沈海滨, 陈秀娟, 等. 10 kV配电网架空绝缘导线雷击断线防护[J]. 电网技术, 2007,

31 (27): 34-37.

- [3] 肖重金, 罗俊华, 李敏. 架空输电线路闪络断线事故原因辨析[J]. 高电压技术, 2001, 27 (3): 83-84.
- [4] 徐丙垠. 配电自动化远方终端技术[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (5): 41-44.
- [5] 伊贵业, 杨学昌, 吴振升. 配电网接地故障定位的传递函数法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40 (7): 31-34.
- [6] 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, 25 (23): 62-65.
- [7] 和敬涵, 季英业. 小电流接地系统单相接地故障测距方法的研究[J]. 华北电力技术, 2004 (1): 1-3.
- [8] 严凤, 杨奇逊, 齐郑, 等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (9): 37-43.
- [9] 王奎鑫, 陈平, 唐毅, 等. 基于组合行波原理的高压架空线—电缆混合线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (10): 90-94.

(收稿日期: 2014-04-11) EA

(上接第88页)

在线路传输功率相同的情况下，如当输电线路功率约为1 450 MW·A功率时，无串联电抗器时非全相运行的零序电流为1.35 kA，有串联电抗器时非全相运行的零序电流为1.56 kA，可见串联电抗器投入与退出对非全相运行时零序电流的影响不大。

结束语

通过对对纵江—宝安双回线路增加串联电抗器前后重合闸过程的仿真分析，可以得出以下结论。

1) 串联电抗器是否投入运行对潜供电流的熄弧时间基本没有影响，因此重合闸的重合时间整定无须专门考虑串联电抗器的投入运行与否。

2) 由于三相串联电抗器阻抗值完全相同，

而且串联电抗器采用空心电抗，不存在饱和等问题，因此在重合闸时不存在不平衡电流的情况，不影响重合闸的成功率。

3) 由于串联电抗器的投入运行可能减小正常运行时输电线路的传输功率。但在输电线路传输功率相同的情况下，串联电抗器投入与退出对非全相运行时零序电流没有影响。

参考文献

- [1] 薛敏. 泗泾站装设500 kV高压串联电抗器的过电压分析[J]. 华东电力, 2007, 35 (6).
- [2] 庄侃沁, 陶荣明, 尹凡. 采用串联电抗器限制500 kV短路电流在华东电网的应用[J]. 华东电力, 2009, 37 (3): 440-443.

(收稿日期: 2014-02-17) EA