

基于相电流的配网单相接地故障准确测距法

分析了现有的故障测距算法用于小电流接地系统单相接地故障测距时所面临的困难。针对单相接地这一配电网最为常见的故障，提出了一种在线路末端健全相设置人为接地点，进而完成测距的算法。该算法依靠单侧信息实现；可以在小电流接地系统中获得幅值较大的特征量；理论推导与Simulink仿真实验证明了该算法能在全网星形线路中通过测得的两相或者一相电流数据完成测距，且具有很高的测距准确度。

罗与锋^{1,2} 卢继平¹ 钟 璐³ / 1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 2. 国网重庆市电力公司北碚供电分公司 3. 国网重庆市电力公司江北供电分公司



罗与锋/硕士研究生

关键词/Keywords

小电流接地系统 ·
单相接地故障 ·
人为接地点 ·
相电流 ·

小电流接地系统主要包括中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统。配电网多采用小电流接地方式^[1]。各种各样的短路故障对配电网而言总是难以避免，这些故障中尤以单相接地短路最为常见^[2]。

故障测距可以实现故障点的快速查找，减小停电损失。现有的故障测距算法大致可以分为四类：①行波测距^[3-5]。通过测量行波在故障点与观测点之间的传播时间实现故障测距，但检测行波需要高性能的设备，因此成本较高。②智能测距^[6]。它们以各种智能算法为基础，用计算机模拟专家作出决策，系统运行方式变化时，这类算法易受影响。③注入信号测距。该算法除了需要信号采集设备以外还需信号发生器。④阻抗测距^[7-9]。这类算法所需的特征量可以是工频的电压、电流，因此对测量设备采

样频率等要求较低，从而具有成本方面的优势；但小电流接地系统发生单相接地故障后，故障回路阻抗值很高，故障附加电流很小，在工程实际中测量误差较大^[10-12]。

相较于传统的阻抗测距法，文献[13]采用了全新的思路：以节点电流方程代替回路电压方程，在建立模型的过程中避免了引入大小未知的故障电阻，有效解决了“伪根”问题。但与此同时，该算法对电流量检测准确度的要求更高。因此，故障附加电流测量误差太大这一核心问题仍然有待解决。

文献[14]提出了增大故障附加电流的算法。单相接地故障发生后，在线路首端母线选择一个健全相设置人为接地点，从而将单相接地故障转化为两相异点接地故障。在小电流接地系统中使用该算法进行单相接地故障测距可以获得足够大的故障附加电流。该算法所采用的特征量包含有零序电流，在装有三相电流互感器的配电线路中，零序电流可以通过三相电流间接求出。然而工程实际中为了缩减成本，配电线路普遍只在A、C两相安装电压、电流互感器，构成不完全星形接线方式。这种情况下运用此算法就必须装设零序电流互感器，从而带来额外的设备与安装成本。

本文以在小电流接地系统中实现经济性与准确性均较好的单相接地故障测距为目的，通过广泛而深入的研究，提出了一种有效的故障测距算法。因其可以获得幅值较高的特征量且可无须外加设备直接应用于不完全星形线路，使得

重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目（2007DA10512712205）。

准确度与经济性均较好, 所以其具有较强的工程实际意义。

采用相电流的准确测距法

1. 算法一

以中性点不接地系统线路C相发生单相接地故障为例, 该线路采用不完全星形接线方式。在工程实际中可以按照以下方案实施准确故障测距。

1) 线路发生单相接地故障后, 断开故障线路首末两端的断路器, 使三相线路与电源和所有负荷断开, 然后在故障线路的健全相A相末端通过电阻 R_S 设置人为接地点。 R_S 的阻值按照限制短路电流及保证足够的检测准确度取值, 通常取0~100 Ω 之间的某个值。

2) 闭合线路首端三相断路器, 记录线路首端C相电压 U_C 与A、C相电流 I_A 、 I_C 波形, 随后由继电保护装置将三相断路器断开。即: 测得的数据与如下图所示的测距原理图对应。此时, 故障点与人为设置的接地点通过大地连通, 从而形成了故障回路。

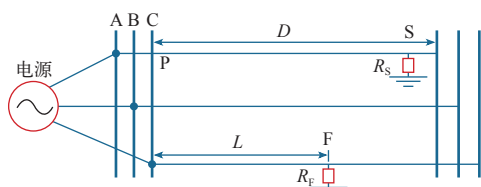


图 测距原理图

3) 计算故障距离。设故障点与线路首端的距离为 L , 根据基尔霍夫电压定律得到回路电压方程

$$U_C = Z_m L I_A + Z_s L I_C + R_F I_C \quad (1)$$

式中, 单位长度线路的互阻抗 Z_m 与单位长度线路的自阻抗 Z_s 为已知量。由式(1)整理得

$$U_C = (Z_m I_A + Z_s I_C) L + R_F I_C \quad (2)$$

令

$$U_P = Z_m I_A + Z_s I_C \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得到

$$U_C = U_P L + R_F I_C \quad (4)$$

将式(4)中的相量展开为复数形式, 得到

$$U_{CR} + jU_{CI} = (U_{PR} + jU_{PI})L + R_F(I_{CR} + jI_{CI}) \quad (5)$$

由式(5)可得

$$\begin{cases} U_{CR} = U_{PR}L + R_F I_{CR} \\ U_{CI} = U_{PI}L + R_F I_{CI} \end{cases} \quad (6)$$

式中, I_{CR} 为 I_C 的实部; I_{CI} 为 I_C 的虚部; U_{CR} 为 U_C 的实部; U_{CI} 为 U_C 的虚部; U_{PR} 为 U_P 的实部; U_{PI} 为 U_P 的虚部。

由式(6)消去 R_F , 可以得出测距公式

$$L = \frac{I_{CR}U_{CI} - I_{CI}U_{CR}}{I_{CR}U_{PI} - I_{CI}U_{PR}} \quad (7)$$

若线路A相发生单相接地故障, 则将人为接地点设在线路C相末端, 测距公式与式(7)类似。

算法一所需测量的特征量包含故障相电压、电流, 这就要求故障相装有电压、电流互感器, 因此上述算法适用于不完全星形接线线路A相或C相发生单相接地故障时的情况。

2. 算法二

在采用不完全星形接线方式的配电线路中, 若B相发生故障, 因为B相没有装电压、电流互感器, 不能检测故障相的电压和电流, 所以算法一并不适用。不过线路故障相与人为接地相之间存在耦合关系, 这就给通过人为接地相的回路方程解决该问题提供了可能, 具体方法如下。

故障发生后, 将人为接地点设在线路A相或者C相末端。以接地点设在线路A相末端为例, 设线路全长 D 为已知量, 对A相建立如下回路电压方程

$$U_A = Z_m L I_B + Z_s D I_A + R_S I_A \quad (8)$$

对于中性点不接地系统, 可以引入条件

$$I_B = -I_A \quad (9)$$

在经消弧线圈接地系统中, 可以暂时断开消弧线圈, 式(9)依然成立。将式(9)代入式(8)得

$$U_A - Z_s D I_A = -Z_m I_A L + R_S I_A \quad (10)$$

令

$$\begin{cases} U_H = U_A - Z_s D I_A \\ U_K = -Z_m I_A \end{cases} \quad (11)$$

则

$$U_H = U_K L + R_S I_A \quad (12)$$

将式(12)展开为复数形式

$$U_{HR} + jU_{HI} = (U_{KR} + jU_{KI})L + R_S(I_{AR} + jI_{AI}) \quad (13)$$

式中, I_{AR} 为 I_A 的实部; I_{AI} 为 I_A 的虚部; U_{HR} 为 U_H 的实部; U_{HI} 为 U_H 的虚部; U_{KR} 为 U_K 的实部; U_{KI} 为 U_K 的虚部。

的虚部。则

$$\begin{cases} U_{HR} = U_{KR}L + R_S I_{AR} \\ U_{HJ} = U_{KJ}L + R_S I_{AJ} \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)消去 R_S ，可得测距公式

$$L = \frac{I_{AR}U_{HJ} - I_{AJ}U_{HR}}{I_{AR}U_{KJ} - I_{AJ}U_{KR}} \quad (15)$$

算法二只需要测量人为接地点所在相电压、电流。在不完全星形接线线路中，这是可以实现的。因此算法二适用于不完全星形接线线路B相故障时的情况。

算法一与算法二相结合，可以实现不完全星形接线线路任意相故障时测量故障距离。

本文提出的算法是在切除了负荷的情况下进行故障测距。这是因为切除负荷不会切断构造的相间回路，并且可以在保护负荷的同时消除负荷阻抗对测距准确度的影响。

目前，微机保护装置和变电站综合自动化装置已经被广泛地安装在配电网中。测距算法所需的相电流的波形可以由微机保护装置记录，相电压的波形可以由变电站综合自动化装置记录，因此使用本文提出的测距算法时无须外加设备。由此看来，上述算法在提高测距准确度的同时降低了设备投资成本以及安装成本。

对测距算法的仿真验证

为验证本文所提算法的可行性与准确性，现使用Matlab/Simulink搭建仿真网络。变压器电压比设为110 kV/10.5 kV；内阻标么值为 $0.006 + j0.153$ ；容量基准值为100 MV·A；额定值为63 MV·A^[15]；电阻 R_S 设为30 Ω；单位长度线路正序、零序电阻分别设为0.17 Ω、0.23 Ω；单位长度线路正序、零序电感分别设为7.6 mH、34.4 mH。文献[16]给出了线路自阻抗 Z_z 与互阻抗 Z_h 的计算公式。

$$\begin{cases} Z_z = \frac{1}{3}(Z_0 + 2Z_1) \\ Z_h = \frac{1}{3}(Z_0 - Z_1) \end{cases} \quad (16)$$

式中， Z_0 为线路零序阻抗； Z_1 为线路正序阻抗。由式(16)可知，单位长度线路的自阻抗 $Z_z = (0.21 +$

$j5.2)\Omega$ ，单位长度线路的互阻抗 $Z_m = (0.02 + j2.81)\Omega$ 。

采用上文提出的测距算法分别对总长为10 km的线路进行仿真试验，故障点与线路首端的距离分别取为1 km，2 km，3 km，…，9 km； R_F 分别取为0.1 Ω，20 Ω，40 Ω，60 Ω，…，160 Ω；故障相分别设为A相、B相或者C相。

在仿真实验一中，变压器中性点设为不接地。单相接地故障发生在A相或者C相时，采用算法一计算故障距离，单相接地发生在B相时，采用算法二计算故障距离。实验结果如表1所示。

表1 仿真实验一结果

故障距离/km	故障相	R_F/Ω	无人为接地点时故障相电流幅值/A	有人为接地点时故障相电流幅值/A	采用算法	测距结果/km
1	A	0.1	0	231.8	—	0.999
2	B	20	0	196.5	二	1.998
3	C	40	0	172.3	—	2.998
4	A	60	0	154.7	—	3.997
5	B	80	0	131.6	二	4.996
6	C	100	0	105.5	—	5.996
7	A	120	0	93.1	—	6.995
8	B	140	0	82.7	二	7.994
9	C	160	0	73.8	—	8.994

中性点经消弧线圈接地系统同样是常见的配电系统，为了验证本文所提算法在该系统中的可行性与准确性，仿真实验二在线路参数不变的情况下，设置变压器中性点经电感值为0.5 H^[2]的消弧线圈接地，实验结果记录如表2所示。

表2 仿真实验二结果

故障距离/km	故障相	R_F/Ω	无人为接地点时故障相电流幅值/A	有人为接地点时故障相电流幅值/A	采用算法	测距结果/km
1	A	0.1	11.3	240.0	—	0.999
2	B	20	10.1	207.4	二	1.998
3	C	40	8.9	181.8	—	2.998
4	A	60	7.7	166.5	—	3.997
5	B	80	6.5	140.7	二	4.996
6	C	100	5.1	119.7	—	5.996
7	A	120	4.3	104.6	—	6.995
8	B	140	3.9	91.7	二	7.994
9	C	160	3.2	81.8	—	8.994

由于负荷电流为0，表1、表2中测得的故障

相电流就是故障附加电流。由表1、表2可见,设置人为接地点以前,故障附加电流幅值很低,尤其是在中性点不接地系统中,故障附加电流幅值为0,传统的阻抗测距算法已经不可能在这种情况下测出故障距离。设置人为接地点以后,故障附加电流幅值增大,对其进行准确测量的难度明显降低。

本文提出的测距算法解决了不完全星形接线线路任意相发生单相接地故障时的故障测距问题,中性点接地方式的不同对测距准确度的影响不大。

结束语

不完全星形接线方式限制了测距算法可用特征量为A、C两相的电压和电流,本文提出的测距算法有效解决了采用这种接线方式的配电线路的单相接地故障测距问题,并且得出以下结论。

1) 设置人为接地点可以增大接地相电流,以回路电压方程为基础可以推导出利用该电流的测距公式。

2) 本文针对故障相是否安装电压、电流互感器,提出了相应的算法。在不完全星形接线线路中,算法一可以解决A、C相故障时的测距问题,算法二可以解决B相故障时的测距问题。

3) 上述算法所需特征量波形的记录可以由配电网已有的微机保护装置和变电站综合自动化装置完成,无须外加设备,从而降低了成本,有利于实现大范围推广。

4) 本文所提算法适用于中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统,中性点接地方式的不同对测距准确度的影响不大。

本文所提算法是针对不完全星形接线线路提出的,该算法还可以推广到完全星形接线线路中。综上所述,本文算法对电力系统配电技术领域而言具有很好的应用价值。

参考文献

- [1] 杨炎龙. 配电网故障定位研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [2] 张林利. 小电流接地故障定位方法及其应用研究

[D]. 济南: 山东大学, 2013.

- [3] 方敏, 崔丽珍. 基于小波变换的行波故障测距系统 [J]. 电力环境保护, 2008, 24 (2): 60-62.
- [4] 季涛. 基于暂态行波的配电线路故障测距研究 [D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [5] Inoue N, Tsunckage T, Sakai S. On-line fault location system for 66 kV underground cables with fast O/E and fast A/D technique [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9 (1): 579-584.
- [6] Kuan K K. Real-time expert system for fault location on high voltage underground distribution cables [J]. IEEE Proceedings C, 1992, 139 (3): 235-240.
- [7] 王玮, 蔡伟, 张元芳, 等. 基于阻抗法的电力电缆高阻故障定位理论及试验 [J]. 电网技术, 2001, 25 (11): 38-41.
- [8] 李为. 配网电力电缆故障测距研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [9] 张利. 中性点非有效接地系统单相接地故障定位方法的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [10] 季涛, 孙同景, 薛永瑞, 等. 配电网故障定位技术现状与展望 [J]. 继电器, 2005, 33 (24): 32-37.
- [11] 马士聪, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网故障定位技术综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2009 (11): 119-124.
- [12] 陈玥云, 覃剑, 王欣, 等. 配电网故障测距综述 [J]. 电网技术, 2006, 30 (18): 89-93.
- [13] 李志民, 陈学允. 基于单侧信息的输电线路故障测距新方法 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17 (6): 416-420.
- [14] 徐斌, 赵军红, 王涛. 10 kV直配线路单相接地故障测距的新算法 [J]. 继电器, 2004, 32 (22): 12-15.
- [15] 电力工业部电力规划设计总院. 电力系统设计手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1989.
- [16] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.

(收稿日期: 2015-03-26) EA