

基于故障分量的配电网单端量测距方法

张国平¹, 王翠霞¹, 杨明皓²

(1. 福州电业局, 福建 福州 350004; 2 中国农业大学电力工程系, 北京 100083)

摘要: 为了消除负荷电流对配电网单相接地故障测距精度的影响, 提出了基于故障分量的单端量测距方法。该方法根据横向故障电流的特征构造了测距函数, 利用线路单端电压、电流的故障分量来计算故障距离。大量的 ATP-EMTP 仿真结果表明该方法不受负荷电流的影响, 可以有效地搜索到配电网多分支线路的故障点或故障范围。

关键词: 故障测距; 故障分量; 单相接地故障

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)12-0006-04

0 引言

配电网发生单相接地故障后, 容易引发两相短路接地故障, 破坏系统的安全运行, 必须尽快找到故障点并予以切除。随着配电网规模的不断扩大和用户供电质量要求的不断提高, 单相接地故障定位问题更加突出, 迫切需要从根本上予以解决。

一般来说, 故障测距方法分为单端量测距方法和双端量测距方法。文献 [1] 提出的双端量测距算法虽然在原理上可以保证一定的测距精度, 但需要大量的测量点获取线路双端的故障信息。由于配电网分支众多、测量点较少, 双端量测距方法实用性不强, 研究单端量测距方法比较现实。文献 [2, 3] 假设接地阻抗是纯电阻, 利用线路首端的测量电压、电流, 根据单相接地故障点处正、负、零序电流的模值和相角均相等的条件, 通过构造接地阻抗与线路首端序分量电流的关系函数来计算故障距离。文献 [4] 利用线路首端的测量电压、电流, 根据正、负、零序电流的模值和相角均相等的条件构造测距函数计算故障距离。以上这些方法都根据故障点特征构造测距函数, 然后搜索故障点, 但无法克服负荷电流、过渡电阻等因素的影响, 没有有效地处理多分支线路的故障点定位问题。

本文从消除负荷电流影响的角度出发提出基于故障分量的单端量测距方法, 解决配电网多分支线路的故障点定位问题, 并利用 ATP-EMTP 进行单相接地故障仿真实验, 从而验证单端量测距方法的可行性。

1 建立分布参数模型

应用于故障测距的线路模型主要有两种: 集中

参数模型和分布参数模型。对于一条实际的线路, 在分析过程中应该考虑线路的分布参数特性, 所以本文采用如图 1 所示的长线路等效电路, z 为线路的单位长度复阻抗, y 为线路的单位长度复导纳, U_1 、 I_1 为首端电压、电流相量, U_2 、 I_2 为末端电压、电流相量, L 为线路长度。

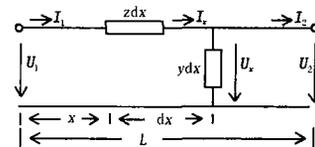


图 1 长线路的等效电路

Fig 1 Equivalent circuit of long line

已知始端电压、电流相量 U_1 、 I_1 , 可求得距离始端 x 处的电压 U_x 、电流 I_x ^[5]:

$$\begin{cases} U_x = U_1 \cosh(\gamma x) - Z_c I_1 \sinh(\gamma x) \\ I_x = I_1 \cosh(\gamma x) - \frac{U_1}{Z_c} \sinh(\gamma x) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\gamma = \sqrt{z \cdot y}$ 为线路的传播常数; $Z_c = \sqrt{z/y}$ 为线路的特性阻抗。式 (1) 是在三相对称条件下形成的, 而电力系统的故障绝大多数为不对称故障, 三相电压、电流中含有大量谐波和非周期分量, 因此需要用对称分量傅式算法^[6]将它们分解成序分量, 才可用式 (1) 计算。

2 横向故障电流分析

假设线路三相参数平衡, 长为 L 的故障线路如图 2 所示。H 为线路首端, M 为线路末端, F 为故障点, a、b、c 为三相线路, a 相线路发生了单相接地故障, Z_f 为接地阻抗, x 为故障点至 H 端的距离。

在正、负、零序网中一般存在负荷电流, 其不确定性难免影响故障定位方法的准确性, 本文将故障

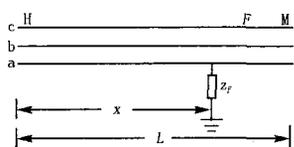


图 2 故障线路
Fig 2 Faulty line

分量理论^[7]引入到故障测距方法中,利用故障状态分解建立了故障附加状态下的正、负、零序网,如图 3 所示, Z_f 为故障附加电阻, $-U_f$ 为故障电动势,大小等于故障前的故障点电压,相位相反。

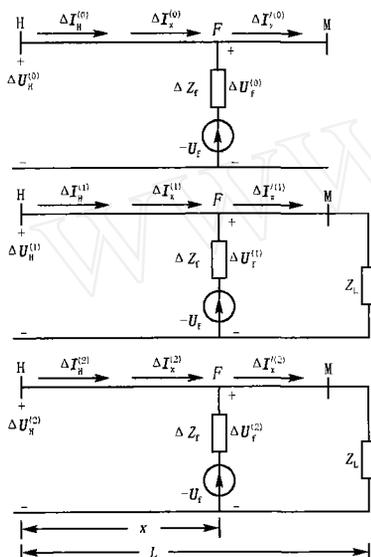


图 3 故障分量序网

Fig 3 Sequence network of fault components

故障附加状态下故障分量电流独立于负荷电流,因此基于故障分量的故障定位方法可以不受负荷电流影响。设图 2 中线路首端电气量可测,即 H 端三相电压 U_{Ha} 、 U_{Hb} 、 U_{Hc} 和电流 I_{Ha} 、 I_{Hb} 、 I_{Hc} 为已知量,根据一周波延时法^[7]对它们进行故障分量提取,利用对称分量傅式算法^[6]分解提取后的故障分量得到故障分量的序电压 $U_H^{(i)}$ 和序电流 $I_H^{(i)}$ ($i = 0, 1, 2$)。然后根据式 (1) 可以计算距离 H 端 x 处的电压 $U_f^{(i)}$ 、电流 $I_x^{(i)}$ 和距离末端 $L - x$ 处的电流

$$I_x^{(i)} \text{ 为: } \begin{cases} U_f^{(i)} = U_H^{(i)} \cosh^{(i)} x - Z_c^{(i)} I_H^{(i)} \sinh^{(i)} x \\ I_x^{(i)} = I_H^{(i)} \cosh^{(i)} x - \frac{U_H^{(i)}}{Z_c^{(i)}} \sinh^{(i)} x \end{cases} \quad (2)$$

$$I_x^{(i)} = \frac{U_f^{(i)} (\cosh^{(i)} (L - x) + \frac{Z_L}{Z_c^{(i)}} \sinh^{(i)} (L - x))}{Z_L \cosh^{(i)} (L - x) + Z_c^{(i)} \sinh^{(i)} (L - x)} \quad (3)$$

其中: $\gamma^{(i)} = \sqrt{z^{(i)} y^{(i)}}$ 是线路传播常数; $Z_c^{(i)} = \sqrt{z^{(i)} / y^{(i)}}$ 是线路特性阻抗; $z^{(i)}$ 是线路单位长度的复阻抗; $y^{(i)}$ 是线路单位长度上的复导纳, $i = 0, 1, 2$ (对应零、正、负序)。

横向故障电流计算式如下:

$$I_f^{(i)} = I_x^{(i)} - I_x^{(i)} \quad (4)$$

将式 (2)、(3) 代入式 (4) 就建立了正、负、零序横向故障电流与故障距离 x 的关系。

3 单端量故障测距方法

3.1 无分支线路的测距方法

当配电网发生单相接地故障时,当且仅当故障点处的正、负、零序电流模值、相位均相等。本文根据这个特点构造了判据函数 $P(x)$,它等于正、负、零序横向故障电流模值、相位的两两之差的平方和,判据函数如式 (5) 所示。

$$P(x) = \sum_{\substack{i=0,1 \\ j=1,2}}^2 (|I_f^{(i)}| - |I_f^{(j)}|)^2 + (\arg(I_f^{(i)}) - \arg(I_f^{(j)}))^2 \quad (5)$$

将式 (4) 代入式 (5), 即可根据不同的 x 计算得到一系列的 $P(x)$, 显然 $P(x) \geq 0$ 。如果故障点在 x 处, 那么理论上 $P(x) = 0$ 。在计算过程中, $P(x)$ 可能会受到计算误差的影响, 并不能严格等于零, 本文参考了相关文献的做法^[3]: 从线路首端开始, 沿线路按一定步长 Δx 逐次计算, 得到一系列的 $P(x)$, 然后搜索 $P(x)$ 的最小值 $P(x_0)$, 认为 x_0 就是故障距离。

3.2 带分支线路的测距方法

配电网分支多且结构复杂, 利用单端量测距方法确定故障点位置的难点在于如何解决多分支线路的故障点定位问题。运行单位并不严格要求把故障点的位置丝毫不差地确定下来, 只要能根据计算的故障距离估计可能的故障点或故障范围, 就可以给运行人员的巡线工作和排除故障工作带来很大方便, 因此本文考虑到这些因素研究了如何解决多分支线路的故障点定位问题。

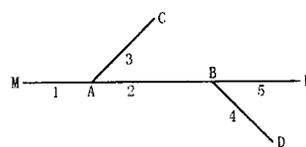


图 4 带分支的线路

Fig 4 Line with branches

一个简单的带分支配电线路如图 4 所示,其中 M 点是可测点, A、B 点是分支点, C、D、E 为负载点。由于存在众多的分支,而测点只有一个 M 点,这样难以用式 (5) 方法确定故障点位置。

本文进行如下的简化处理:从线路首端开始,沿线搜索各个分支到各个负载点,计算各线路的长度,找到长度最长的线路,以该线路的线路长度、线路参数、首端可测点数据等作为计算数据,然后采用式 (5) 的测距方法计算故障距离,最后按照计算的故障距离从线路首端开始,沿线在各个分支上查找可疑故障点。

为了清楚说明带分支线路的测距方法,这里举例说明。假设图 4 中各线路分支长度为: $L_1 = 1.2$ km, $L_2 = 1.6$ km, $L_3 = 2.1$ km, $L_4 = 0.8$ km, $L_5 = 1.3$ km。

这样,沿线搜索到各条线路长度为: $L_{MC} = 3.3$ km, $L_{MD} = 3.6$ km, $L_{ME} = 4.1$ km。

假设在分支 AB 中距离 A 点 0.2 km 处发生单相接地故障,那么实际故障距离等于 1.4 km。长度最长的线路是 ME,以 L_{ME} 为计算长度,根据式 (5) 计算出故障距离。如果故障距离计算值等于 1.32 km,那么根据计算的故障距离沿线查找出的可疑故障点共有两个,如图 5 所示。

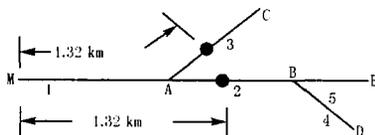


图 5 可疑故障点位置

Fig 5 Location of possible fault point

4 仿真分析

本文考虑了过渡电阻、故障时刻等因素,利用 ATP-EMTP 仿真软件对带分支线路进行单相接地故障仿真实验后,在 Matlab 中利用单端量测距方法进行数据分析来计算故障距离,确定可疑故障点的位置,从而验证方法的可行性。仿真分析步骤如下:

(1) 提取故障分量。测量单相接地故障发生前、后各一周线路首端 H 的三相电压和电流的瞬时值,采用一周波延时法^[7]提取三相电压、电流的故障分量。

(2) 分解正、负、零序分量。利用对称分量傅式算法^[6]将三相电压、电流的故障分量分解为正、负、零序分量 $U_H^{(i)}$ 和 $I_H^{(i)}$ 。

(3) 计算横向故障电流。将式 (2)、式 (3) 代入

式 (4) 计算横向故障电流 $I_f^{(i)}$, $i = 0, 1, 2$ (对应零、正、负序)。

(4) 确定故障点。从线路首端 H 开始,沿线路按步长 x 逐次计算 ($x = L/n$), 将 $I_f^{(i)}$ 的模值、相位代入式 (5), 得到一系列的 $P(k \cdot x)$, 搜索其最小值 $P(x_0)$, 根据 x_0 搜索可疑故障点个数及其位置。

以图 6 所示的配电网多分支线路为例,各分支线路的长度为: $L_1 = 0.845$ km, $L_2 = 0.480$ km, $L_3 = 0.200$ km, $L_4 = 0.370$ km, $L_5 = 0.865$ km。线路参数为: $r_1 = r_2 = 0.3316$ Ω /km, $r_0 = 0.4816$ Ω /km; $l_1 = l_2 = 1.1288$ mH/km, $l_0 = 5.1032$ mH/km; $c_1 = c_2 = 0.0099$ μ F/km, $c_0 = 0.0041$ μ F/km。

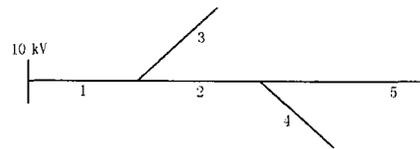


图 6 带分支的线路

Fig 6 Line with branches

仿真实验中采用内阻为零的电源模拟 10 kV 变电站母线,仿真时间为三个周波,在线路末端加电动机模型当作负载,在线路首端加三相电压、电流测量元件,仿真系统如图 7 所示。

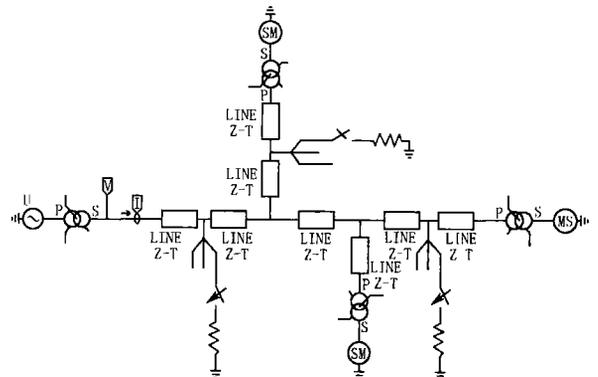


图 7 带分支线路的仿真系统

Fig 7 Simulation system of line with branches

假设系统初始时正常运行,在分支线 3 上距离线路首端 1.0 km 处在 A 相分别设定故障条件为:

(1) 金属性单相接地故障,时控开关在 A 相电压达到最大时合闸; (2) 过渡电阻为 $R_F = 5$ Ω 和 2 000 Ω , 时控开关在 A 相电压达到最大时合闸; (3) 过渡电阻为 $R_F = 2 000$ Ω , 时控开关在 A 相电压过零点时合闸。故障定位结果如表 1 所示。这里,以在故障相电压最大、 $R_F = 0$ 、采样点数为 256 的故障定位结果为例绘制可疑故障点位置,如图 8 所示。

表 1 和图 8 表明无论是金属性故障、经过渡电阻接地,还是电压过零点发生单相接地故障,基于故障分量的单端量测距方法虽然不能准确确定故障点

位置,但是可以确定多个可疑故障点,给运行人员查找故障工作带来了很大方便,能够满足一定的实际要求,具有一定的现实意义。

表 1 故障定位结果

Tab 1 Result of fault location

故障相电压	过渡电阻	计算故障分支	256点计算值		128点计算值		64点计算值	
			故障距离	相对误差	故障距离	相对误差	故障距离	相对误差
最大	$R_F = 0$	2, 3	1.023	2.30%	1.027	2.70%	0.974	2.60%
	$R_F = 5$	2, 3	1.025	2.50%	1.030	3.00%	1.038	3.80%
	$R_F = 2000$	2, 3	0.977	3.30%	1.024	2.40%	0.971	2.10%
过零	$R_F = 2000$	2, 3	1.029	2.90%	1.031	3.10%	1.035	3.50%

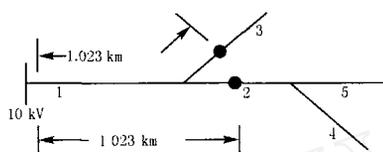


图 8 可疑故障点位置

Fig 8 Location of possible fault point

5 结论

本文将故障分量理论引入到了配电网单端量测距方法中,根据单相接地故障点的特征构造了判据函数,提出了基于故障分量的单端量测距方法。利用该方法不受负荷电流的影响,可以有效地搜索到配电网多分支线路的故障点或故障范围。

参考文献:

[1] 安艳秋,高厚磊. 基于分布参数线路模型的精确故障测距算法 [J]. 继电器, 2003, 31 (6): 42-45.
AN Yan-qiu, GAO Hou-lei An Accurate Fault Location Algorithm Based on Distributed Parameter Line Model [J]. Relay, 2003, 31 (6): 42-45.

[2] 贾文超,王妍哲. 基于验证法的树形配电线路单相接地故障测距算法的研究 [J]. 电网技术, 1999, 23 (9): 43-45.
JIA Wen-chao, WANG Yan-zhe Study on Algorithm for Single Line-to-ground Fault Location in Radial Distribution Network by Voltage Verification Method [J]. Power System Technology, 1999, 23 (9): 43-45.

[3] 谈伟. 中压配电网故障测距及供电恢复研究 (硕士学位论文) [D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
TAN Wei Research on Fault Location and Service Resto-

ration of Distribution Network, Thesis [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2001.

[4] 邵洪亮,杨学昌. 一种配电线路单相接地故障测距算法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1999, 39 (9): 33-36.
GAO Hong-liang, YANG Xue-chang Location Algorithm for Line-to-ground Fault on Power Distribution Lines [J]. Journal of Tsinghua Univ (Sci&Tech), 1999, 39 (9): 33-36.

[5] 邱关源. 电路 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
QIU Guan-yuan Circuit [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.

[6] 李佑光,林东. 电力系统继电保护原理及新技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
LI You-guang, LN Dong Power System Protective Relaying Theory and New Techniques [M]. Beijing: Science Press, 2003.

[7] 葛耀中. 新型继电保护原理与故障测距原理与技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
GE Yao-zhong New Types of Protective Relaying and Fault Location Their Theory and Techniques [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1996.

收稿日期: 2005-12-09; 修回日期: 2006-02-13

作者简介:

张国平 (1979 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护及配电网自动化方面的研究; E-mail: zh - guoping@126.com

王翠霞 (1980 -), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护及自动装置方面的研究工作;

杨明皓 (1953 -), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为配电网自动化、配电网系统规划与运行。

An accurate single terminal fault location algorithm based on fault components for power distribution system

ZHANG Guo-ping¹, WANG Cui-xia¹, YANG Ming-hao²

(下转第 19 页 continued on page 19)

- tion Research on Expert System in Protective Relay Setting Calculation[J]. Relay, 2004, 32(8): 15-18
- [13] 陈青, 黄德斌, 唐毅, 等. 一种新的继电保护整定计算及管理系统——高级编程语言 HT[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 59-61.
- CHEN Qing, HUANG De-bin, TANG Yi, et al A New Protection Relay Calculation and Management System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 59-61.
- [14] 韩学军, 朱涛, 韩学山. 供电网继电保护可视化整定计算与动作仿真系统 [J]. 电网技术, 2004, 28(14): 28-31.
- HAN Xue-jun, ZHU Tao, HAN Xue-shan Visualized System of Setting Calculation and Action Simulation for Protective Relaying in Power Supply Network [J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 28-31.
- [15] 刘健, 赵海鸣. 继电保护整定计算及定值仿真系统 [J]. 继电器, 2002, 30(9): 47-49.
- LIU Jian, ZHAO Haiming System of Setting Calculation and Simulation of Relay Protection [J]. Relay, 2002, 30(9): 47-49.
- [16] 王慧芳, 何奔腾. 继电保护整定计算软件的交互设计方法研究 [J]. 继电器, 2005, 33(11): 59-62.
- WANG Hui-fang, HE Ben-teng Study of Interaction Design Method in Relay Protection Setting-calculation Software [J]. Relay, 2005, 33(11): 59-62.

收稿日期: 2005-12-23; 修回日期: 2006-04-28

作者简介:

王慧芳 (1974-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事电力系统继电保护研究。

On some problems about protection setting calculation software

WANG Hui-fang

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The status of setting calculation software is detailed. The problems are pointed out, such as the validity of calculation results, usability, universality and developability of software. The methods to solve these problems are four steps. First, it takes operating condition as the combination of running mode of plant or station, power supply topological and rules of equipment maintenance. It is useful at simplifying setup and choice of operating conditions and ensuring calculation result correction. Second, the functions of achieving integrated setting list is offered, setting examination and rectification are setting to enhance software's practicality and interaction design method is employed to ensure software's usability. Third, it introduces software structure with insert mode to actualize the common platform. With this structure, the software can be used in various levels of power networks by switching function groupware with corresponding edition. It is important to solve software's universality. Fourth, the theory of software engineering is studied and the management of development course is strengthened to ensure the developability of software.

Key words: power system; protective relays; setting calculation; operation condition

(上接第 9 页 continued from page 9)

(1. Fuzhou Power Supply Bureau, Fuzhou 350004, China; 2. China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To remove the effect on the line-to-ground fault location of power distribution system by load current, an accurate single terminal fault location algorithm based on fault components is proposed in this paper. The algorithm constructs a fault location function according to the characteristic of fault current, and the fault location is directly calculated by using fault components of voltages and currents derived at only line head. It has been confirmed that the algorithm can locate the fault or fault area effectively by a lot of simulations on fault lines with ATP-EMTP, and is not influenced by the load currents.

Key words: fault location; fault components; line-to-ground fault

(上接第 13 页 continued from page 13)

Abstract: Alloy is a kind of formal language which has a succinct syntax and allows specification and automatic analysis of a wide variety of systems. On the other hand, the Unified Modelling Language (UML) is a semi-formal language, which is accepted by the software engineering community as the de facto standard for modelling, specification and implementation of object based systems. This paper takes advantage of the positive aspects of both the UML and Alloy to outline a method for modelling the discrete behavior of protection relay by using UML, and also presents a case study of modelling and analysis of a prototype three-step distance relays. A discussion for transforming the case from UML to Alloy and analysis for the transformed case is also presented in the end.

Key words: UML; protection relay; discrete event; OCL; Alloy; model transformation