

10 kV 直配线路单相接地故障测距的新算法

徐 斌, 赵军红, 王 涛

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要: 提出了 10 kV 直配线路的单相接地故障测距的新算法, 该算法利用故障时接地倒相开关将另一非故障相进行一次瞬时接地所构成的零序故障回路, 将单相接地故障转化为两点异相接地故障, 从而实现对单相接地故障的准确测距。该方法成功解决了中性点不接地系统单相接地故障时, 由于没有故障电流回路而造成测距困难的问题。理论分析和仿真结果证明本文提出的算法原理完善, 概念清楚, 具有很高的测距精度, 而且不受过渡电阻和负荷电流的影响, 具有很好的实用性。

关键词: 单相接地; 中性点不接地系统; 故障测距

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)22-0012-04

0 引言

我国的 10 kV 或 6 kV 配电网一般采用中性点非直接接地方式运行, 且网络结构多为辐射型, 由单端电源供电。单相接地故障是配电网发生几率最高的故障类型, 约占所有故障次数的 80%。中性点非直接接地系统在发生单相接地故障时, 流过故障点的电流是数值不大的电容电流, 系统三相线电压之间的对称性不受破坏, 对电网中电气设备的继续运行和对负荷的连续供电设备没有多大的影响。但由于单相接地故障可能会进一步发展为两点或多点故障, 从而引起跳闸停电事故。在小电流接地系统中发生单相接地故障时, 一般允许带一点接地继续运行 1~2 h, 由运行人员查找故障线路, 并采取相应的措施。然而对于架空输电线路, 如果不知道故障点的精确位置, 巡线工作将非常艰苦, 耗费巨大的人力物力; 相反, 则可以加快线路恢复, 提高系统运行的可靠性, 减少因事故停电而造成的损失。因此及时确定故障位置并排除故障显得非常重要。由于配电网是直接面向用户的, 特别是农村配电网, 各线路末端只联接降压变压器, 仅有供电端变电站具备测量、计算的条件, 因此在进行故障测距时最好采用单端电气量进行测量。本文采用了独特的故障测距装置, 提出了 10 kV 直配线路单相接地故障精确测距的新算法。

1 测距原理

对于中性点不接地系统的单相接地故障, 故障电流小, 而且没有电流回路, 传统的基于工频量的故障测距装置显得无能为力。为此我们研制了 10 kV

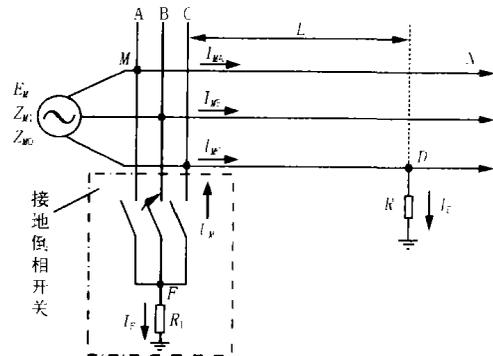


图 1 单相接地故障系统接线示意图

Fig. 1 Connection diagram of a single-phase-to-ground fault

架空输电线路故障测距装置及其配套的“输电线路故障测距接地倒相开关柜”。接地倒相开关柜与变电所的 10 kV 母线连接, 当故障测距装置判断发生单相接地故障时, 控制接地倒相开关柜, 使线路的某一非故障相进行一次瞬时接地, 构成两点异相接地的复故障, 这样可以形成测量回路, 由装置检测出故障点的距离。接地倒相开关电路中由于接入了限流电阻, 且电路接地时间短, 对电网不会造成影响。图 1 为线路 MN 上的 D 点发生 C 相单相接地故障时的系统接线原理图, 过渡电阻为 R_2 。

根据故障测距装置的设计方案, 在该装置检测到线路发生 C 相接地故障后, 控制接在变电所母线上的接地倒相开关, 对线路的 B 相进行一次瞬时接地。在 B 相接地期间, 可认为系统在 F、D 发生了两点异相接地故障, 可以按照两点异相接地故障对系统进行分析。分析时假定网络的正负序网络参数相同, 设线路的单位长度的正序阻抗和零序阻抗分别为 Z_1, Z_0 。

考虑到故障测距仪的实际安装位置,测量点 P 在故障点 F 、 D 之间,运用叠加原理及对称分量法,可将其分解为故障前状态(正序稳态)和故障(正序故障、负序、零序)状态之和。将限流电阻 R_1 和过渡电阻 R_2 归并到系统线路参数中,可以等效地看成是在 F 点和 D 点发生了单相金属性接地短路。由于中性点不接地系统,只在两故障点 F 、 D 之间构成零序回路,其序网图如图 2 所示。

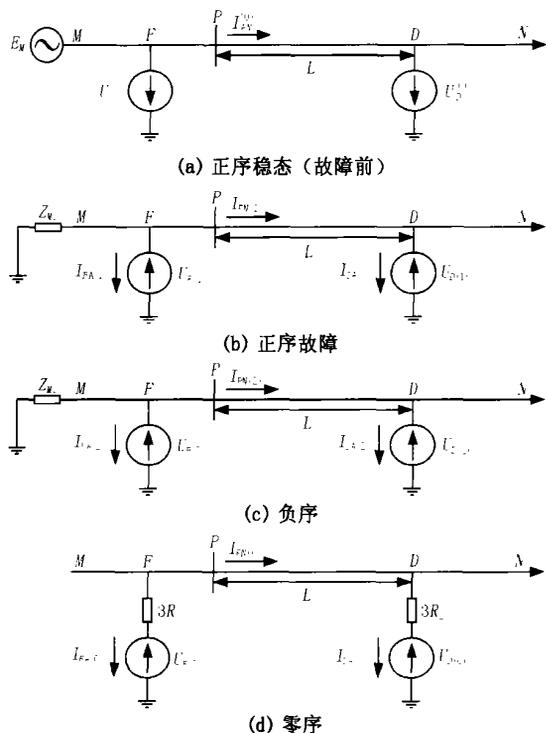


图 2 单相接地故障系统序网图

Fig. 2 Sequence network of a single-phase-to-ground fault

F 点 B 相接地,接地处 $U_B = 0$,以 A 相为参考相的边界条件为:

$$\begin{cases} a^2 U_{F(1)} + aU_{F(2)} + U_{F(0)} = 0 \\ a^2 I_{FA(1)} = aI_{FA(2)} = I_{FA(0)} \end{cases} \quad (1)$$

D 点 C 相接地,同理可得:

$$\begin{cases} aU_{D(1)} + a^2 U_{D(2)} + U_{D(0)} = 0 \\ aI_{DA(1)} = a^2 I_{DA(2)} = I_{DA(0)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U_{F(1)}$, $U_{F(2)}$, $U_{F(0)}$, $U_{D(1)}$, $U_{D(2)}$, $U_{D(0)}$ 分别为 F 、 D 点接地处 A 相正、负、零序电压; $I_{FA(1)}$, $I_{FA(2)}$, $I_{FA(0)}$, $I_{DA(1)}$, $I_{DA(2)}$, $I_{DA(0)}$ 分别为 F 、 D 点接地支路 A 相正、负、零序电流。

由序网分析知:

$$U_{PA(1)} = LZ_1(I_{PN}^{(0)} + I_{PN(1)}) + U_{D(1)} = LZ_1 I_{PN(1)} + U_{D(1)} \quad (3)$$

$$U_{PA(2)} = LZ_1 I_{PN(2)} + U_{D(2)} \quad (4)$$

$$U_{PA(0)} = LZ_0 I_{PN(0)} + U_{D(0)} + 3R_2 I_{DA(0)} \quad (5)$$

式中: $U_{PA(1)}$ 、 $U_{PA(2)}$ 、 $U_{PA(0)}$ 为测量点 P 的 A 相正、负、零序电压; $I_{PN(1)}$ 、 $I_{PN(2)}$ 、 $I_{PN(0)}$ 为从 P 向 N 端看去的 A 相正、负、零序电流; $I_{PN}^{(0)}$ 为从 P 向 N 端看去的 A 相正序稳态电流; $I_{PN(1)}$ 为从 P 向 N 端看去的 A 相正序故障电流; L 为测量点 P 到故障点 D 的距离。

由式(3)、(4)、(5),再考虑到相位关系和边界条件式(2),可得 P 点 C 相电压:

$$U_{PC} = aU_{PA(1)} + a^2 U_{PA(2)} + U_{PA(0)} = aLZ_1 I_{PN(1)} + aU_{D(1)} + a^2 LZ_1 I_{PN(2)} + a^2 U_{D(2)} + LZ_0 I_{PN(0)} + U_{D(0)} + 3R_2 I_{DA(0)} = aLZ_1 I_{PN(1)} + a^2 LZ_1 I_{PN(2)} + LZ_0 I_{PN(0)} + 3R_2 I_{DA(0)}$$

考虑到 $I_{PNC} = aI_{PN(1)} + a^2 I_{PN(2)} + I_{PN(0)}$,可得 P 点 C 相电压:

$$U_{PC} = LZ_1 \left[I_{PNC} + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_{PN(0)} \right] + 3R_2 I_{DA(0)} \quad (6)$$

式中: I_{PNC} 为从 P 向 N 端看去的 C 相电流;

对式(6)进行变换,取虚部可得:

$$I_m \left| \frac{U_{PC} - LZ_1 \left[I_{PNC} + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_{PN(0)} \right]}{I_{PN(0)}} \right| = 0 \quad (7)$$

由于是单端电源供电, N 侧无电源,有 $I_{PN(0)} = I_{DA(0)}$ 。对于中性点不接地系统, $I_{DA(0)} = -I_{FA(0)}$ 。所以式(7)可以化为:

$$I_m \left| \frac{U_{PC} - LZ_1 \left[I_{PNC} + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_{PN(0)} \right]}{I_{PN(0)}} \right| = 0 \quad (8)$$

在式(8)中,除了 L 以外,其余各量要么已知,要么可以通过测量或由测量值进行计算求得,只需解一个一次方程就能解得 L 。

推广到一般情形,有

$$I_m \left| \frac{U_{Pi} - LZ_1 \left[I_{Pni} + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_{PN(0)} \right]}{I_{PN(0)}} \right| = 0 \quad (9)$$

式中: i 为发生单相接地的故障相,取值可以是 A 或 B 或 C 。

2 滤波器的设计

输电线路发生故障后的暂态过程中,除了基频分量外,还混有衰减的直流分量和复杂的谐波成分。而故障测距的算法是利用基频量来进行计算的,因此必须在计算故障距离之前,对采样值进行滤波处理。由于故障测距本身对算法的可靠性和精度要求

较高,而对算法的时间没有太高的要求。因此在选择滤波算法时,主要考虑的是滤波精度和可靠性,其次才是计算量和速度。

本装置采用一阶差分滤波加全周傅氏算法。全周傅氏滤波是一种比较好的用于从输入信号中提取基频分量的算法,它不仅能求得电气信号的实部和虚部,而且可以完全滤除各种整次谐波和纯直流量,对非整次谐波分量和按指数衰减的非周期分量所包含的低频分量也有一定的抑制能力。所以在设计数字滤波器时,主要采用全周傅氏算法。考虑到全周傅氏算法对由衰减直流量引起的低频分量抑制能力有限,加入了一阶差分滤波器。将这两种滤波方法结合起来,能得到较好的滤波特性。其计算公式如下:

$$A_1 = \frac{2}{NG} \sum_{k=1}^N y(k) \sin \left[\frac{2}{N} k + \right] \quad (10)$$

$$B_1 = \frac{2}{NG} \sum_{k=1}^N y(k) \cos \left[\frac{2}{N} k + \right] \quad (11)$$

式中: $y(k) = S(k) - S(k - 1)$, $S(k)$ 为输入信号; $G = 2 | \sin f_1 T |$; $= (1 - 2f_1 T) / 2$; T 为采样间隔; f_1 为工频频率。

经式(10)、(11)滤波后输出的基波分量的幅值和相位为:

$$\begin{cases} y_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \\ \varphi_1 = \arctan(A_1 / B_1) \end{cases} \quad (12)$$

3 暂态仿真

为了检验所提出的故障测距算法,我们进行了数字仿真实验。实验采用 Matlab 的 Power System Blockset 计算出线路模型上不同地点发生故障时,故障测距装置安装处的电压电流瞬时值,将其代入用 Matlab 编制的程序中,求出故障距离。比较计算值和实际值之间的误差,用以检验算法是否正确以

及影响其精度的因素。模型如图 3 所示,模型参数为:电源电势 $E = 38.5 \text{ kV}$,电阻 $0.724 \text{ } / \text{ km}$,电感 $1.92 \times 10^{-2} \text{ H}$;变压器 T1 额定容量 2000 kVA,接法 Y,d11,额定电压 35 kV/10.5 kV;变压器 T2 额定容量 400 kVA,接法 Y,yn0,额定电压 10 kV/400 V;线路参数为正序电阻 $0.259 \text{ } / \text{ km}$;零序电阻 $0.345 \text{ } / \text{ km}$;正序电感 0.0003 H/km ,零序电感 0.0006 H/km ;线路全长 $L = 20 \text{ km}$ 。

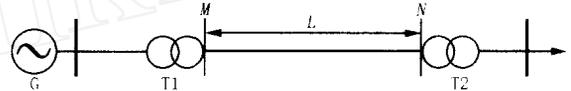


图 3 仿真线路模型

Fig. 3 Line simulation model

故障测距装置装在 M 端,变压器 T2 低压侧接负载。接地倒相开关的限流电阻为 100 Ω 。设置仿真启动时间和终止时间分别为 0 s 和 0.3 s;接地时刻为 0.02 ~ 0.8 s;接地倒相开关柜的瞬时接地时刻为 0.04 ~ 0.3 s。计算故障距离时,取 0.06 ~ 0.3 s 之间共 12 个周期的数据,分别对每个周期的数据进行故障距离计算,然后将各个周期的计算值相加取平均值,得到最终结果。

在变压器 T2 低压侧开路的情况下,在不同的地点经不同的过渡电阻发生单相接地故障时,得到的测距结果和相对误差如表 1 所示。表 2 为在变压器 T2 低压侧接不同负载的情况下,距 M 端 18 km 处经过渡电阻发生 C 相接地故障时的测距结果和相对误差。由表 1 和表 2 可以看出:本文提出的单相接地故障测距算法的精度不受过渡电阻的影响,在变压器 T2 低压侧开路的情况下,即使经高阻接地时也有很高的精度,能够做到准确测距。从单相接地故障的测距公式中也可以看出算法与过渡电阻无关。在变压器 T2 低压侧负载变化的情况下,测距结

表 1 单相接地测距结果(空载)

Tab. 1 Results of single-phase-to-ground faults location(unloaded)

实际故障 距离/km	$R_2 = 0.1$		$R_2 = 1$		$R_2 = 10$		$R_2 = 100$	
	测距/km	误差/%	测距/km	误差/%	测距/km	误差/%	测距/km	误差/%
2	2.0000	-0.000	2.0000	-0.000	2.0000	-0.000	2.0000	-0.000
5	5.0000	-0.000	5.0000	-0.000	5.0000	-0.000	5.0000	-0.000
10	10.0000	-0.000	10.0000	-0.000	10.0000	-0.000	10.0000	-0.000
15	15.0000	-0.000	15.0000	-0.000	15.0000	-0.000	15.0000	-0.000
18	18.0000	-0.000	18.0000	-0.000	18.0000	-0.000	18.0000	-0.000

表 2 不同负载情况下的单相接地故障测距结果(18 km 处)

Tab. 2 Results of single-phase-to-ground fault location with different loads (at 18km)

负载	$R_2 = 0.1$		$R_2 = 1$		$R_2 = 10$		$R_2 = 100$	
	测距/ km	误差/ %	测距/ km	误差/ %	测距/ km	误差/ %	测距/ km	误差/ %
T2 低压侧开路	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000
$P = 50 \text{ kW}, Q = 10 \text{ kvar}$	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000
$P = 300 \text{ kW}, Q = 60 \text{ kvar}$	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000
$P = 300 \text{ kW}, Q = 200 \text{ kvar}$	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000	18.0000	- 0.000

果也不受影响,消除了负载(负荷电流)对测距结果的影响。

4 结论

本文提出的单相接地故障测距算法中利用接地倒相开关构成瞬时的零序回路,用两点异相接地的故障测距算法来求解单相接地问题。算法只采用故障后的电流和电压值,有利于简化硬件和软件编程。而且算法采用集中参数模型,只需求解简单的一次方程即可得到正确结果,消除了常规算法的不收敛及伪根问题。经过大量的仿真表明,该算法具有很高的测距精度,而且不受过渡电阻和负荷电流的影响。

参考文献:

[1] 邱建国,钟岷秀(QIU Jianguo, ZHONG Minxiu). 小电流

接地系统两点异相故障测距(Fault Location of Two-point Earth-fault with Different Phases in Low Earth-fault Current System) [J]. 继电器(Relay), 1999, 27(2): 13-16.

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

收稿日期: 2004-03-11; 修回日期: 2004-04-24

作者简介:

徐斌(1978-),男,硕士,主要研究方向为输电线路故障测距; E-mail: ugly-men@163.com

赵军红(1961-),男,副教授,主要研究方向为配电网自动化和继电保护;

王涛(1977-),男,硕士,主要研究方向为智能仪器的设计。

New algorithm for single-phase-to-ground fault location on 10 kV direct distribution line

XU Bin, ZHAO Junhong, WANG Tao

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: A new algorithm for single-phase-to-ground fault location on 10 kV direct distribution line is proposed in this paper. The algorithm utilizes the zero-sequence circuit formed by a switch, which can ground another nonfault phase for a minute when a single-phase fault occurred, to locate the fault distance. This method has successfully solved the difficulty of the single-phase-to-ground fault location for the neutral point ungrounded system owing to the fact that there is no fault current circuit. The theory analysis and computer simulation experiment results indicate that the method is simple, effective and non-affected by fault resistance and load current.

Key words: single-phase-to-ground fault; neutral point ungrounded system; fault location

我国要求燃煤电厂严格控制二氧化硫排放

国家环保总局有关负责人近日表示,随着新一轮电厂改扩建工程的开工,我国将采取更严格措施控制电厂的二氧化硫排放,重点加强对火电机组的监督管理,力保实现国家确定的大气污染防治目标。

国家环保总局科技司副司长罗毅表示,酸雨和二氧化硫污染控制十五计划要求 27 个省、自治区、直辖市的 175 个城市,要调整能源结构、降低城市燃料含硫量、建成一批二氧化硫污染综合治理项目,达到二氧化硫的排放目标。去年和今年由于火电、钢铁、建材等行业能源需求高速增长,煤炭消费量增加,导致二氧化硫排放量大增,统计显示完成原定控制目标较为困难。