

# 基于相电流原理的小电流接地系统接地故障检测方法与应用研究

温晓虹

国网福建省电力有限公司永泰县供电公司 福建福州 350700

**【摘要】**现代电力系统的规模日渐庞大，配网线路长度越来越长，所处的环境也更加复杂，因此发生故障的可能性和次数也不可避免地会增加。系统一旦发生故障，尤其是失地故障，还是需要人工查找故障点，人工查找故障点是非常困难的，浪费了大量的人力物力，并且有些故障较为隐蔽，加上永泰地处山区，许多线路交通不便利，使得故障查找时间过长，不仅造成较大的经济损失，而且降低供电可靠性，无法满足现代配网自动化的要求。因此，提高配电网接地故障检测水平是现实且迫切的需求。相电流接地故障检测可以根据线路发生故障时的故障特征，迅速准确地进行检测，以辅助调控人员判断故障点，及时通知检修人员排除故障并及时恢复供电，同时减少经济损失，提高电力系统运行的稳定性。准确的接地故障检测对迅速恢复电网运行具有重要运用价值，提高配网线路故障定位准确度是电力部门事故处理过程中重要的研究课题。

**【关键词】**配网线路；相电流；小电流接地；故障定位

## 引言

福建永泰县域电网，是电力系统大面积处于复杂山区环境的薄弱电网，不论是遭遇强雷电、强对流天气，还是台风等恶劣天气，配网线路总是不可避免地发生类似接地、短路等电网故障，一旦发生故障就需要供电所人员下现场巡查查找故障，以判断是否需要停电检修或仍可以继续运行，这样不仅影响了送电的及时性，还无故造成了电能的损耗和流失。尤其是接地故障，从故障恢复方面所积累的经验分析，故障位置判定所消耗的时间普遍较长，尤其是故障发生的时间与地点相对特殊的情况下，仍然需要调度员经验选线、通知查线。近年来，运用在配网线路上的DTU、FTU成为了电力部门中广泛使用的故障定位设备，且接地故障的查找基本上是采用接地检查设备辅助和人工巡线的方式相结合的方法，现有接地检测辅助设备的使用都有局限性，能够确定接地发生的线路但无法确定接地的位置。由于实际线路距离长且分支多、所处环境复杂，因此常用设备对接地故障的查找帮助非常有限。因此，亟需更便捷的手段来检测线路接地故障。

## 1 配网线路接地电流分析

永泰县域电网大多为中性点不接地或者为中性点经消弧线圈接地的小电流接地系统，要了解相电流检测方法，我们要先了解小电流接地系统正常行波的传输特性及发生接地时故障电流的特性。

### 1.1 均匀传输线的行波特性

在介绍配电网线路相电流法检测接地故障前，我们将首先了解行波的传输特性。在输电线路中，因为导线中具有电阻，在电流经过时会产生电压降，并且其周围会产生电感以及磁场，然后就会相继出现电感电压降。因此，导线之间的电压并不是一成不变的，而是一直处在不断发生变化的过程中。首先，电容容易在两导体间形成，所以导线间具有电容电流；导体间还会出现电导，也就意味着有电导电流。如此，对于沿着导线不同的地方，导线内电流大小存在差异。传输线的电感和电阻只是考虑因素的一个方面，导线之间的电导和电容也很重要，也就是说沿导线分布的电场和磁场以及沿线电磁波的传播过程都是需要全方位的分析研究。

### 1.2 均匀传输线的行波

我们利用无损传输线，进行线路行波的了解。如果传输线中的电阻 $R_0$ 与导线之间的漏电导 $G_0$ 为零，则该传输线即无损传输线，可简称无损线。

则有方程：

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式(2-1)也是输电线路行波的波动方程(输电线路为均匀传输线)，即作无损线路处理。则方程(2-1)的通

解为:

$$\left. \begin{aligned} u(x, t) &= f_1(x - vt) + f_2(x + vt) = u^+ + u^- \\ i(x, t) &= \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} [f_1(x - vt) - f_2(x + vt)] = i^+ - i^- \end{aligned} \right\}$$

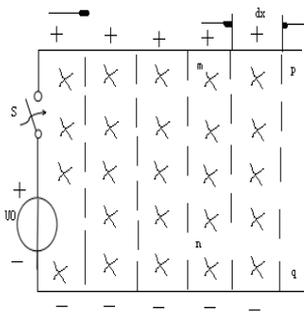
$$\text{式 (2-2) 中 } V = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \text{ 称为波速。} \quad (2-2)$$

$$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0} = \sqrt{(j\omega L_0)(j\omega C_0)} = j\omega \sqrt{L_0 C_0}$$

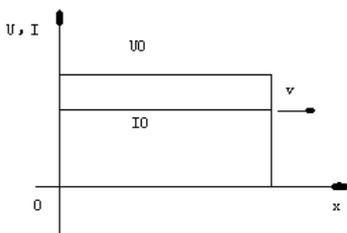
故  $\alpha = 0$ , 而  $\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}$ 。 (2-3)

$$\text{特性阻抗 } Z_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}。 \quad (2-3)$$

假定无损耗线起初处于无充电状态, 假设在  $t=0$  时, 在该线的始端接入电压为  $U_0$  的直流电压源。因终端容易出现反射波, 但终端的距离比较远, 在规定的时间内, 传输线没有产生反射波, 所以可以只对入射波进行分析。这种情况下, 传输线充电到  $U_0$  电压波会逐渐从始端过渡到终端 [2][3]。假设在某一时刻电压波前传播到  $mn$  处, 具体见下图, 距离  $mn$  处的左侧沿线各处线间电压都是  $U_0$ , 正电荷在导线上方, 负电荷在导线下方, 而在  $mn$  处的右边, 由于电压波尚未到达, 各处线电压均为零, 上下导线也没有电荷。



(a)



(b)

图2-2 波沿线的传播

在时间  $dt$  内, 电压波向前移动了距离  $dx = vdt$ 。与此

同时,  $dx$  获得电荷  $dq = q_0 dx = C_0 U_0 dx$ 。此充电电荷通过  $mn$  左边的所有截面, 于是图2-2 (a) 全线上就产生了充电电流

$$I_0 = \frac{dq}{dt} = q_0 \frac{dx}{dt} = C_0 U_0 \frac{dx}{dt} = C_0 U_0 v = \frac{U_0}{Z_c} \quad (2-4)$$

入射电流波伴随着入射电压波以同样速度向终端传播。

## 2 小电流接地系统接地故障信号的波形

在输电线路上加电压并产生电流时, 周围会逐渐产生电磁场。在激励电压变化的过程中, 电磁场也随之变化并, 通过电波不断传输到周围, 同时电流和电压也选择这种方式进行传播。如果电力系统并未出现故障, 电压、电流波形为50Hz的正弦或余弦波; 如果出现故障, 电流和电压波形会畸变, 这种畸变情况下的电流或电压行波包含丰富的系统故障信息。

### 2.1 小电流接地系统单相接地故障

我国电力系统110kV以下的电压等级通常采用中性点不接地 (或经消弧线圈接地) 方式运行, 导致接地电流十分微弱, 且波形畸变严重, 故传统的小电流接地故障检测技术难以检测。10kV单相接地故障是电力系统最常见的故障, 日常如树木靠线、用户内部故障、恶劣天气原因都会引发10kV线路发生单相接地, 10kV单相接地故障的电流波形及正常波形如下: (见图2-3)

由图可知, A相出现单相接地的时候, 故障相电压下降, 此时非故障两相对地电压上升为  $\sqrt{3}$  倍, 也就是与线电压相等; 各种相间的相位以及电压的大小都不发生变化, 三相系统之间仍保持系统平衡, 所以, 具体故障发生的时候, 可带接地运行小于2个小时, 此种特性为中性点不接地系统最大的优点。

### 2.2 相电流法检测接地故障

根据以上分析可知, 当线路发生单相接地故障时, 相电流发生明显变化, 我们可以在接地故障发生初期用相电流法检测线路三相电流, 根据算法计算出三相电流的“不对称度”, 从而判别故障线路及故障相。

现有检测接地故障的电流方法, 常用是零序电流检测法, 并且永泰县域电网特点是35kV变电站覆盖面广, 均属于中性点经消弧线圈接地的电网系统。受消弧线圈对零序电流有抵消作用的影响, 永泰县域接地故障研判错误率较高。相电流检测法检测中性点经消弧线圈接地系统的接地

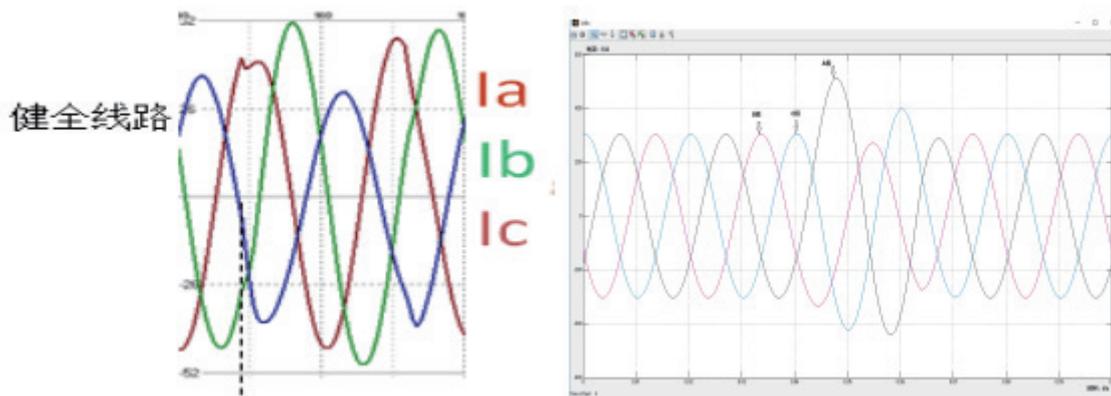


图2-3 健全线路的三相电流及单相接地故障三相电流图

故障，采用“三相电流相不对称”算法的单相接地故障保护装置，当发生接地故障时，故障电流经故障点流向故障线路，故障点后线路则没有故障电流通过。而且发生故障瞬间，电网电流发生突变，故障区域三相电流值变化很大，非故障健全区域的三相电流值变化很小，波形近似。根据上述三相电流相不对称特征，可准确的判断和定位故障区域，对永泰县域单相接地短路故障处置效率的提高起到积极作用。

### 3 相电流接地装置的属地应用

#### 3.1 相电流接地装置的应用研究

相电流型单相接地故障检测装置是基于三相电流“相电流法”检测算法原理的馈线单相接地故障检测技术，实现10kV配网馈线单相接地故障的准确检测，只需要检测线路三相电流，即可实现对微弱电流的单相接地故障精准检测。

在永泰县域配电网系统中，线路分支多、运行情况复杂，发生接地故障时，故障位置难以确定，尤其是偏远地区，高山、森林等存在由于架空线路接地故障（断线）等未能准确及时检测发现而引起山林的隐患。永泰县域10kV配电网接地故障占配网故障的60%以上，有些地区甚至占到80%以上，特别是经消弧线圈接地系统，由于接地电流很小，提高了接地故障的检测难度，给故障查找工作带来不小的困难。所以进一步提高对单相接地故障的准确检测，对于提高供电可靠性具有积极的意义。

相电流型单相接地故障检测装置可以做到在线路发生故障时及时确定故障区段、并发出故障报警指示（或信息），大大缩短了故障区段查找时间，为快速排除故障、恢复正常供电提供了有力保障。相电流接地故障检测装置实现

了只需要三相电流的接地故障检测，即可准确检测接地故障，解决了接地故障时电流小，很难通过零序电流的大小确认故障区段的难题。特别是对于各种中性点经消弧线圈接地系统、不接地系统等的小电流接地故障，可以准确检测判断故障区段。

相电流型单相接地故障检测装置，可以应用于电缆线路的故障指示。可以安装在环网柜、电缆分接箱、箱变、开关房、配电站、变电站等位置，适用于目前配电网自动化较高的DTU、FTU终端，同时适合永泰电网发展。

#### 总结：

相电流法小电流接地故障保护技术，具有高精度、瞬态快速判断故障的能力，可实现从极小接地电流故障到极大短路电流故障的检测，可应用于智能分布式配网自动化系统中，做到快速隔离、快速恢复，适应“动态配电网”时代的高供电可靠性需求。相电流检测法，可实现配网各类故障的精准判断、隔离和自愈，降低停电次数，极大减少用户停电时间和停电影响用户数，能大幅度降低配网现场运维难度、提升供电可靠性指标，提高地区用电可靠性，同时优化了营商环境。

#### 参考文献：

- [1] 覃剑, 葛维春, 邱金辉等. 输电线路单端行波测距法和双端测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 92-95.
- [2] 吴伊昂. 电力系统行波故障测距[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [3] 王升花. 基于小波分析的输电线路故障测距研究设备[D]. 北京: 中国石油大学, 2007.