

# 谐振接地系统单相接地故障区段定位方法

齐 郑, 郑 朝, 杨以涵

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206)

**摘要:** 针对配电网因分支多、接地故障电阻大导致的单相接地故障定位问题, 提出一种针对谐振接地系统的单相接地故障区段带电定位方法。该方法在故障发生后调节消弧线圈的补偿电流, 利用调节前后线路上多个馈线终端单元 (FTU) 测量到的零序电流变化量信息确定故障区段。提出了单相经过渡电阻接地时, 将零序电流按零序电压进行折算的方法, 从而解决了调节消弧线圈后零序电压发生变化的问题。现场试验对该方法进行了验证, 表明该方法能够满足实用要求。

**关键词:** 谐振接地系统; 单相接地故障; 故障区段定位; 消弧线圈

## 0 引言

中国配电网的特点是分支多、覆盖区段广、单相接地故障电阻大, 而且越来越多地采用中性点谐振接地方式, 单相接地故障定位问题长期以来困扰供电部门, 没有得到很好解决。

目前配电网发生单相接地故障后存在 2 种处理措施: 一种是先将故障线路停电, 然后进行定位, 称为停电定位或离线定位, 如注入交直流信号法等<sup>[1]</sup>; 另一种是带故障运行过程中进行定位, 称为带电定位或在线定位。相对于停电定位来说, 带电定位的难度更大, 而现场在很多情况下需要进行带电定位。文献[2]提出采用 A 型行波进行定位, 其缺点是配电网通常存在多级分支和大量的终端, 发生接地故障后行波折射、反射情况复杂, 无法有效区分故障点的特征波。文献[3-4]提出利用测量零序电磁场的方法定位, 但无法解决中性点谐振接地方式的单相接地故障定位。文献[5]提出“S”信号注入法, 其不足之处在于由于线路对地的分布电容在高次谐波作用下容抗变小, 使得高阻接地情况下信号能够在非故障区段流通, 无法正确定位。文献[6]提出“故障指示器”方法, 其不足之处在于对于中性点谐振接地系统, 接地电流远小于负荷电流, 故障指示器无法进行有效识别。

随着配电网自动化的广泛开展, 馈线终端单元 (FTU) 等现场监控终端的应用越来越多, 为故障定位提供了强有力的数据平台。目前很多学者提出了基于 FTU 的短路故障区段定位方法<sup>[7-12]</sup>, 但是对基

于 FTU 的单相接地故障带电区段定位方法研究不多。

本文提出了一种针对谐振接地系统的单相接地故障区段带电定位方法。该方法在故障发生后调节消弧线圈的补偿电流, 利用调节前后线路上多个 FTU 测量到的零序电流变化量信息确定故障区段。

## 1 区段定位原理

### 1.1 零序电流特征

配电线路模型如图 1 所示, 设线路上安装有 3 个 FTU (A, B, C), 将线路分为 4 个区段 (a, b, c, d), 在区段 d 上发生了单相接地故障。

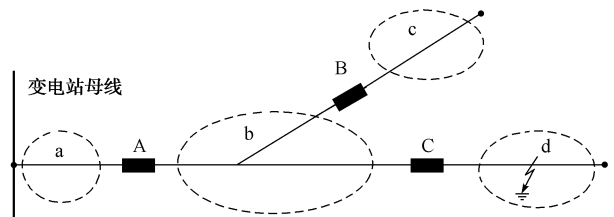


图 1 配电线路结构

Fig. 1 Structure of distribution line

系统的零序网络等值电路如图 2 所示, 各区段电流的参考方向标注在图中。图 2 中,  $\dot{U}_0$  为零序电压,  $\dot{I}_\Sigma$  为系统中其他非故障线路的零序电容电流之和,  $C_a \sim C_d$  为 4 个区段的线路对地电容,  $\dot{I}_A \sim \dot{I}_C$  为 3 个 FTU 检测到的零序电流,  $\dot{I}_L$  为消弧线圈电感电流。

如果消弧线圈处于过补偿或全补偿状态, 并忽略系统电阻, 根据等值电路可知:

$$\begin{cases} I_A = I_L - I_\Sigma - \omega C_1 U_0 \\ I_B = \omega C_3 U_0 \\ I_C = I_L - I_\Sigma - \omega (C_a + C_b + C_c) U_0 \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-10-22; 修回日期: 2010-02-09。

国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2009AA12Z328)。

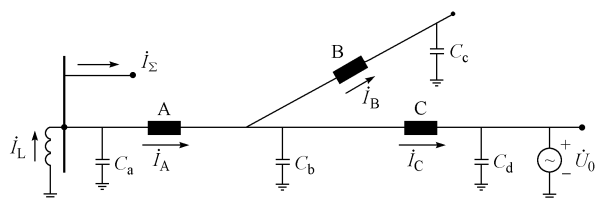


图2 零序等值电路

Fig. 2 Zero-sequence equivalent circuit

由于消弧线圈的补偿作用,  $\dot{I}_A, \dot{I}_B$  和  $\dot{I}_C$  的相位相同, 都超前零序电压  $90^\circ$ 。同理, 当故障发生在区段 a, b 或 c 时,  $\dot{I}_A, \dot{I}_B$  和  $\dot{I}_C$  的相位相同, 且超前零序电压  $90^\circ$ , 因此无法通过相位关系确定故障区段。

## 1.2 区段定位判据

图2中, 定义母线至故障点的拓扑路径为故障路径, FTU装置A和C位于故障路径上, 而FTU装置B不在故障路径上。如果发生单相接地后, 调节消弧线圈的参数, 使  $I_L$  发生变化, 通过式(1)可知, 故障路径上的  $I_A$  和  $I_C$  会发生变化, 而非故障路径上的  $I_B$  不变。

该结论可以推广至一般情况。由于消弧线圈电感电流经过故障路径流入故障点, 因此当电感电流发生变化时, 故障路径上的 FTU 检测到的零序电流必然发生变化, 而非故障路径上的 FTU 检测到的零序电流为固有电容电流, 不会发生变化。

根据上述分析, 可以得到故障区段定位的方法: 发生单相接地后, 调节消弧线圈的参数, 使电感电流发生变化, 如果某个 FTU 检测到的零序电流发生变化, 说明故障点位于该 FTU 的下游; 如果某个 FTU 检测到的零序电流没有发生变化, 说明该 FTU 的下游为非故障区段。这样就可以确定故障区段。

## 1.3 单相经电阻接地的处理方法

当单相金属性接地时, 改变消弧线圈电感电流不会使零序电压发生变化。但是, 如果单相经过渡电阻接地时, 改变消弧线圈电感电流使零序电压发生变化, 由式(1)可知,  $U_0$  变化后, 非故障区段 FTU 检测到的零序电流  $I_B$  同样会发生变化, 可能导致定位方法失效。

为了解决零序电压发生变化的问题, 可以采用如下方法解决。以图2为例, 设故障后消弧线圈调节前各 FTU 的零序电流有效值为  $I_A, I_B, I_C$ , 零序电压有效值为  $U_0$ , 电感值为  $L$ ; 调节后各 FTU 的零序电流有效值为  $I_A', I_B', I_C'$ , 零序电压有效值为  $U_0'$ , 电感值为  $L'$ 。将调节后的零序电流进行折算, 得到:  $I_A'' = I_A' U_0 / U_0'$ ,  $I_B'' = I_B' U_0 / U_0'$ ,  $I_C'' =$

$I_C' U_0 / U_0'$ 。根据折算后的零序电流, 计算各 FTU 的零序电流变化量为:

$$\begin{cases} \Delta I_A = I_A - I_A'' = \frac{U_0}{\omega L} - \frac{U_0}{\omega L'} \\ \Delta I_B = I_B - I_B'' = 0 \\ \Delta I_C = I_C - I_C'' = \frac{U_0}{\omega L} - \frac{U_0}{\omega L'} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知, 将零序电流进行折算后, 故障路径上的零序电流发生变化, 而非故障路径上的零序电流不发生变化, 定位方法依然有效。

由式(2)可知, 消弧线圈电流变化量与零序电压成正比。一般当零序电压超过相电压的 15% 时将发出报警信号, 设金属接地时, 消弧线圈电流变化量为  $I_L$ , 则单相经电阻接地时, 消弧线圈电流最小变化量为  $0.15I_L$ 。例如  $I_L = 6$  A 时, 最小变化量为 0.9 A, FTU 完全可以测量出来。因此, 只要接地电阻的数值能够保证零序电压超过相电压的 15%, 上述方法就可以准确定位。

在实际应用中, 由于测量的误差, 零序电流变化量不会为 0, 应根据消弧线圈电感电流的变化量设定阈值, 如果变化量小于此阈值, 即认为没有发生变化, 阈值可以取  $0.15I_L$ 。

## 1.4 间歇性接地故障的影响

小电流接地故障相当一部分是间歇性故障。间歇性接地故障的影响有如下 2 个方面:

1) 间歇性接地会产生大量谐波和非周期分量, 只要在 FTU 软件算法中加入有效的数字滤波处理, 提取有用的基波分量, 就可以解决这个问题。

2) 间歇性接地可能导致每一次故障持续的时间很短, 如果不能在故障持续的时间段内对消弧线圈进行调节, 那么本文的方法有可能失效。

## 2 装置设计

区段定位装置由上位机和 FTU 组成。

上位机安装在变电站, 功能包括:

- 1) 接收 FTU 的零序电流数据;
- 2) 在单相接地后调节消弧线圈的参数, 使电感电流发生变化;
- 3) 进行定位计算, 确定故障区段。

FTU 安装在线路上, 发生单相接地后每隔 1 s 测量一次零序电流, 并将有效值发送给变电站的上位机。

如果 FTU 与上位机的通信实时性较差, 需要在 FTU 上配置全球定位系统 (GPS) 对时功能, FTU 将零序电流有效值和时标信息共同发送给上位机, 这样上位机就能够有效区分消弧线圈调节前

后的零序电流数据。

消弧线圈分为预调式和随调式。对于随调式消弧线圈,在接地过程中改变电感电流比较方便。对于预调式消弧线圈,需要在接地过程中投入并联电抗器或者调节有载分接开关的挡位来改变电感电流。

### 3 现场数据分析

本文提出的方法已在现场得到实际应用,并通过现场模拟故障试验进行了验证。

如图3所示,该配电网为10 kV系统,变电站母线有12条出线,电容电流为30 A。中性点接地方式为经消弧线圈接地,消弧线圈与一个40 kVA的电抗器相并联,用于产生6.6 A的电感电流变化量。在试验线路上的2个线路分段开关位置分别安装FTU,利用分段开关的内置三相电流互感器合成零序电流,这样2个FTU将线路分为3个区段。

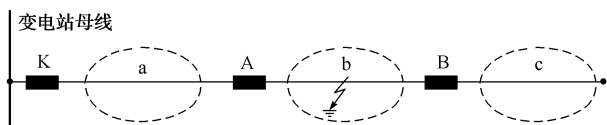


图3 实验线路结构  
Fig.3 Structure of experiment line

变电站内上位机及2个FTU利用GPS进行对时,并通过通用分组无线电业务(GPRS)无线通信将数据上传至变电站上位机,上位机接收到数据后根据时标信息提取消弧线圈调节前后的零序电流数据。

在区段b上模拟单相经3 kΩ电阻接地,接地后短时投入电抗器产生电感电流变化量。投入电抗器前,在变电站检测到的零序电压、电流波形如图4所示,零序电压为48 V;投入电抗器后,在变电站检测到的零序电压、电流波形如图5所示,零序电压为39 V。由图5可知,电感电流确实发生了变化。

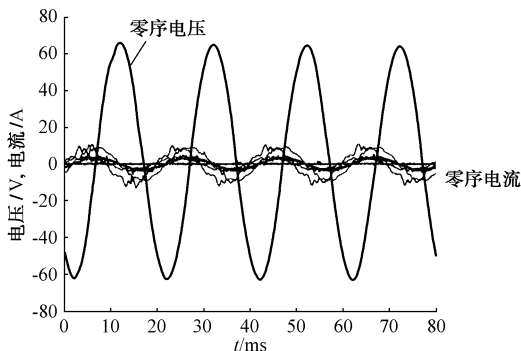


图4 电感电流变化前检测的波形  
Fig.4 Waveform measured before inductance current change

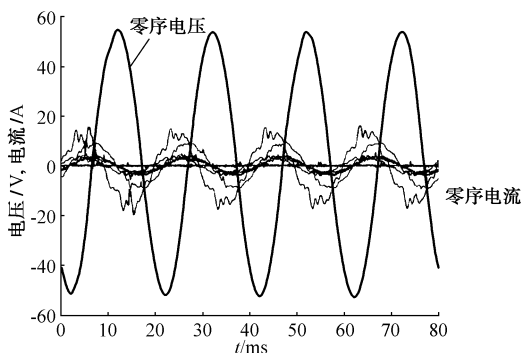


图5 电感电流变化后检测的波形  
Fig.5 Waveform measured after inductance current change

根据式(2)计算FTU在电抗器投入前后的零序电流变化量数据如表1所示。

表1 各FTU零序电流数据  
Table 1 Zero sequence current of each FTU

FTU	$I_0/A$	$I_0'/A$	$I_0''/A$	$\Delta I_0/A$
A	5.66	9.07	11.16	5.50
B	3.12	2.65	3.26	0.14

由于在金属接地时,消弧线圈电流变化量为6.6 A,因此设定阈值为1 A,由表1可知,装置A检测到零序电流变化,说明故障点在FTU装置A的下游,而FTU装置B检测到零序电流没有变化,说明B的下游为非故障区段,因此,故障点位于A与B之间,即区段b上。分析结果与实际情况一致。

### 4 结语

本文提出一种针对谐振接地系统的单相接地故障区段带电定位方法。该方法具有以下优点:①在故障发生后调节消弧线圈的补偿电流,利用调节前后线路上多个FTU测量到的零序电流变化量信息确定故障区段,信号特征明显;②当经过渡电阻接地时,采用零序电流按零序电压进行折算的方法,解决了调节前后零序电压发生变化的问题。现场试验数据充分验证了该方法的正确性与可行性。

### 参考文献

[1] 张利,杨以涵,杨秀媛. 配电网离线故障定位方法研究与实现. 电力系统自动化,2009,32(1):81-86.  
ZHANG Li, YANG Yihan, YANG Xiuyuan. Research and implementation of off-line fault location for distribution network. Automation of Electric Power Systems, 2009, 32(1): 81-86.

[2] 严凤,杨奇迹,齐郑,等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究. 中国电机工程学报,2004,24(9):38-43.  
YAN Feng, YANG Qixun, QI Zheng, et al. Study on fault

- location scheme for distribution network based on traveling wave theory. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(9): 38-43.
- [3] 张利, 杨以涵, 司冬梅, 等. 基于零序电流和磁场检测故障杆的配电网故障定位. *电力系统自动化*, 2008, 32(14): 73-76.  
ZHANG Li, YANG Yihan, SI Dongmei, et al. Distribution network fault location based on the zero sequence current and magnetic field detection spot. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(14): 73-76.
- [4] 张利, 杨以涵, 司冬梅, 等. 基于零序功率方向的中性点不接地系统在线故障定位. *电力系统自动化*, 2008, 32(17): 79-82.  
ZHANG Li, YANG Yihan, SI Dongmei, et al. Online fault location of neutral point ungrounded distribution network based on zero-sequence power direction. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(17): 79-82.
- [5] 张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法. *电力系统自动化*, 2004, 28(3): 64-66.  
ZHANG Huifen, PAN Zhencun, SANG Zaizhong. Injecting current based method for fault location in neutral isolated power system. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(3): 64-66.
- [6] 李伟华, 何正友, 赵静. 应用于铁路自闭/贯通线路故障定位的线上节点设计. *电力系统自动化*, 2006, 30(23): 79-84.  
LI Weihua, HE Zhengyou, ZHAO Jing. Design of a wireless node applied to fault location for railway automatic blocking and continuous power line. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(23): 79-84.
- [7] 陈敬枝, 丁同奎, 张钊. 蚁群算法在配电网故障定位中的应用. *电力系统自动化*, 2006, 30(5): 74-77.  
CHEN Xinji, DING Tongkui, ZHANG Zhao. Ant colony algorithm for solving fault location in distribution networks. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(5): 74-77.
- [8] 梅念, 石东源, 杨增力, 等. 一种实用的复杂配电网故障定位的矩阵算法. *电力系统自动化*, 2007, 31(10): 66-70.  
MEI Nian, SHI Dongyuan, YANG Zengli, et al. A practical matrix-based fault location algorithm for complex distribution network. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(10): 66-70.
- [9] LO K L, NG H S. Power systems faults diagnosis using Petri nets. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 1997, 144(3): 231-236.
- [10] HADJICOSTIS C, VERGHESE G C. Power system monitoring using Petri net embedding. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 2000, 147(5): 299-303.
- [11] CHEN C S, KE Y L, WU I S. Coloured Petri nets approach for solving distribution system contingency by considering customer load patterns. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 2001, 148(5): 463-470.
- [12] HUANG Y C, HUANG C M, LIAO C C, et al. A new intelligent fast Petri-net model for fault section estimation of distribution systems// *Proceedings of International Conference on Power System Technology*, December 4-7, 2000, Perth, Australia.

齐 郑(1977—),男,通信作者,博士,讲师,主要研究方向:电力系统分析与控制、配电网自动化。E-mail: qizheng319@126.com

郑 朝(1986—),女,硕士研究生,主要研究方向:配电网自动化。

杨以涵(1927—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统分析与控制、光学互感器、配电网自动化。

## Research on Method of Single-phase-to-earth Fault Section Location in Neutral Point Resonant Grounded System

QI Zheng, ZHENG Zhao, YANG Yihan

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Due to the large amount of branches and high grounding resistance of distribution networks, the grounding fault location problem has not been solved effectively. A novel method is proposed for locating the single-phase-to-earth fault section in a neutral point resonant grounded system. By this method, the compensation current of arc-suppression coil is adjusted after the fault occurs and the fault section can be identified by variation of zero-sequence current measured by multiple feeder terminal units (FTUs) equipped on the line. The method proposes that the zero-sequence current is converted by zero-sequence voltage when a single-phase grounding via resistance occurs, which solves the problem that zero-sequence voltage changes after the arc-suppression coil is adjusted. The on-site experiments have been carried out to prove the feasibility of the proposed method.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2009AA12Z328).

**Key words:** neutral point resonant grounded system; single-phase-to-earth fault; fault section location; arc-suppression coil