

# 零序特征量的配电网接地故障区段定位策略分析

## Zero-sequence Eigenvalue Analysis of Fault Location Strategy for Distribution Network Grounding

张功华 胡涛 张咸飞

Gonghua Zhang Tao Hu Xianfei Zhang

荆州三新供电服务有限公司潜江分公司 中国·湖北 荆州 433100

Jingzhou Sanxin Power Supply Co., Ltd. Qianjiang Branch, Jingzhou, Hubei, 433100, China

**摘要:** 非直接式是中国配电网常用的一种,也叫小电流接地。这类系统中单相接地故障出现得最多,因此如何迅速而准确地找出故障区段始终是电力系统继电保护中最重要的问题。通过对不直接接地线的单相接地进行定性的研究,提出了采用零序和无故障零序电流两种方法进行故障区域的确定。模拟实验证明,该算法具有较高的敏感性和简单的运算能力,并且不会受到过阻和线路的长短等的干扰,有良好的实际使用效果。

**Abstract:** Indirect distribution network is commonly used in a domestic, also known as small current grounding. Single-phase-to-ground faults occur most frequently in these systems, so how to quickly and accurately locate the fault section is always the most important problem in power system relay protection. Based on the qualitative study of single-phase grounding with non-direct grounding, two methods of zero-sequence current and fault-free zero-sequence current are proposed to determine the fault area. Simulation results show that the algorithm has high sensitivity and simple computing ability, and will not be affected by the over-resistance and the length of the line, etc..

**关键词:** 配电网; 故障区段定位; 谐振接地; 零序特征量; 配电自动化

**Keywords:** distribution network; fault location; resonant grounding; zero sequence characteristic quantity; distribution automation

**DOI:** 10.12346/peti.v4i4.6973

## 1 引言

在中国 35 kV 及以上的配电网中,一般都是不接零线的。配电网的单相接地故障在整个输电系统的总失效中占有很大的比重。在接地不接地的情况下,由于接地故障的原因,接地故障时的短路电流非常少,而且不会对负载的正常供应造成不利的后果;一般可连续操作 1~2 h。在这段时间内,另外两个相对地的电压应当升高,以防止故障的进一步扩展造成两个以上的接地短路,应当立即发送对应的信号,使运行人员能找到接地线路并采取排除措施。

目前对于中性点非直接接地系统单相接地的故障定位已有大量研究。有关文献中提出一种根据注入信号原理进行离线故障定位,这种定位方法不受消弧线圈的影响,但是对高阻接地情况下,其检测结果较差。利用线路零序电流幅值和相位特征定位故障区段的零序电流法亦有所发展,现有的文

献中,已有的研究建议将稳态零序电流递增的递减分解,并根据分解的递增和相移的方式进行分析,并在相关的研究中,建议采用改变电弧线圈的补偿程度和对零序电压增加的变化来判断故障部分,两种方法均能不同程度地提高零序电流法检测的灵敏度,但是针对高阻故障时仍存在较大的难度。

论文从无接触地和无接触式接地的角度,对其进行了失效机制的研究,并给出了用单元零序差流作为判断准则的方法。另外,利用 PSCAD 软件进行模拟,证明了采用零序差流进行单相接地故障区段的定位是可行的。

## 2 小电流接地系统单相接地的故障特点

### 2.1 中性点不接地系统的单相接地失效分析

图 1 是一种中线接地不接地的简易电网原理图,在一般情况下,地对地的电压为 0,地对地的电阻,没有零序的电

【作者简介】张功华(1981-),男,中国湖北潜江人,本科,工程师,从事电力生产研究。

流<sup>[1]</sup>。当A相单相短路时,如果不考虑地阻,A相的接地电压为0。并将非故障相对地电压B、C在故障后上升至正常工作状态下的 $\sqrt{3}$ 倍,将对应非故障相对地电压电流上升至正常工作情况下的 $\sqrt{3}$ 倍数。

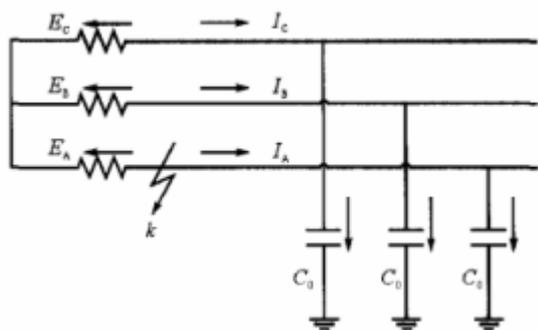


图1 为中性点不接地的网络图

在金属性单相接地故障情况下,A相的接地电压为0,接地电容为0。当三相线路的三相线电压仍然是均匀的,而不是在不能运行的情况下,中性点的电势升高到相位的电压。失效点的各个接地电压是这样的:

A相电压:

$$U_{AK} = 0 \quad (1)$$

B相电压:

$$U_{BK} = E_B - E_A = \sqrt{3}E_{A^{e^{j150^\circ}}} \quad (2)$$

C相电压:

$$U_{CK} = E_C - E_A = \sqrt{3}E_{A^{e^{j150^\circ}}} \quad (3)$$

0序电压k在故障点:

$$U_{KO} = 1/3(U_{AK} + U_{BK} + U_{CK}) = -E_A \quad (4)$$

由公式(4)可知,接地零序和预失效的相位等的大小和大小是反向的。两个无失效的阶段,即“B”和“C”,所生成的电容电流 $I_B$ 和 $I_C$ :

$$I_B = U_{BK} j\omega C_0 \quad (5)$$

$$I_C = U_{CK} j\omega C_0 \quad (6)$$

从(5)(6)式可知,无失效的相容性电流的作用数值为:

$$I_B = I_C = \sqrt{3}U_{\phi}\omega C_0 \quad (7)$$

其中, $U_{\phi}$ 为相电压有效值; $C_0$ 为指系统在正常工作状态下的各个相对地电容的数值。

当A相出现单相接地失效时,A与地面之间的电压和对地电容值均为0,这时流经A相故障点处的电流就是整个系统中非故障相电容电流的总和,具体如下:

$$I_k = I_B + I_C \quad (8)$$

从图2中可以看出,它的有效值如下:

$$I_k = 3U_{\phi}\omega C_0 \quad (9)$$

其数值是正常工作状态下系统单相对地电容电流值的三倍。

通过以上分析可知:零序电流为线路本身的正常相间的接地电容,由母线流向导线。

如图2中,当A相线发生接地时,假设不考虑线路电阻中负载和电容电流的压力下降,则A对地的电压为0,故元件A对地电容电流为零。与此同时,B相C的对地电压,电容电流都上升至正常工作状态下的 $\sqrt{3}$ 倍。

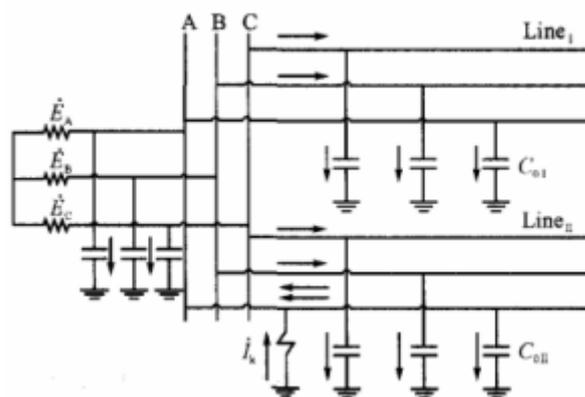


图2 中性点不接地系统单相接地故障情况下电流的分布

通过对曲线2的解析可知,当正常线I的A相值为0时,B、C两个相间的电容器电流仍保持不变,也就是说,当单相发生故障时,正线I本身的零序电流就是线路本身的电容,该电容值从母线流向正常的线路<sup>[2]</sup>。可以表述如下:

$$3I_{0I} = I_{B1} + I_{C1} = 3j\omega C_{01}U_0 \quad (10)$$

当故障线路II时,B、C两个非故障相内流经线路自身的电容电流 $I_{BII}$ 、 $I_{CII}$ ;当A相为故障点时,需要流经整个系统的B、C相对于地面的电容电流之和,其数值如下:

$$I_k = (I_{B1} + I_{C1}) + (I_{BII} + I_{CII}) + (I_{BE} + I_{CE}) \quad (11)$$

它的有效值如下:

$$I_k = 3U_{\phi\omega}(C_{01} + C_{0II} + C_{0E}) = 3U_{\phi\omega}C_{0\Sigma} \quad (12)$$

其中, $C_{01}$ 、 $C_{0II}$ 分别为正常工作时线路I、I的对地电容并以集中电容表示; $C_{0\Sigma}$ 为整个系统对地电容之和。该电流通过故障线路IIA相流回,这时I=-I,II=I<sub>K0</sub>。则线路II始端通过零序电流如下:

$$3I_{0II} = I_{AII} + I_{BII} + I_{CII} = -(I_{B1} + I_{C1} + I_{BE} + I_{CE}) \quad (13)$$

从上述分析结果可作出单相接地情况下零序等效网络图3所示。

接地故障情况下等于零序网络接点处增加一个零序电压 $U_{00}$ ,零序电流通过电网中的各个组件对地电容构成环路,其零序阻抗和电容器电阻都很低,可以被忽视。非接地网零序电流是由电网内部单元的对地电容进行分析的结果。

总之,零序网是由各线的等价电容组成的环路,其零序

阻抗高。在无短路的情况下，零序的电压等于线路本身的接地容量。零序故障是指全电网对地和无故障线的总电压。

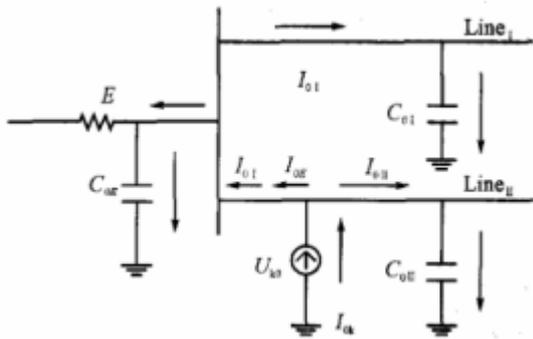


图3 中性点不接地系统单相接地后零序等效网络

### 2.2 中性点经消弧线圈接地系统的单相接地失效分析

对于中性点通过消弧线圈接地系统而言，因消弧线圈的使用会显著改变单相接地后故障电流的分布。假定在如图4所示的电网中，消弧线（ $I_L$ ）与供电中枢相连，当A相在导线I上被接地时，其电容器的容量和分配与不接通的电容器的容量和分配是一样的，区别在于接点处另加一个电感分量（ $I_L$ ），故从接点处返回的电流总量如下：

$$I_k = I_L + I_{C\Sigma} \quad (14)$$

其中， $I_{C\Sigma}$ 为整个系统对地电容电流； $I_L$ 为消弧线圈电流，设L代表其电感，那么：

由于 $I_{C\Sigma}$ 与 $I_L$ 相位相差约180度， $I_k$ 在消弧线圈补偿下有所降低。同样，可作出其零序等效网络如图5所示。

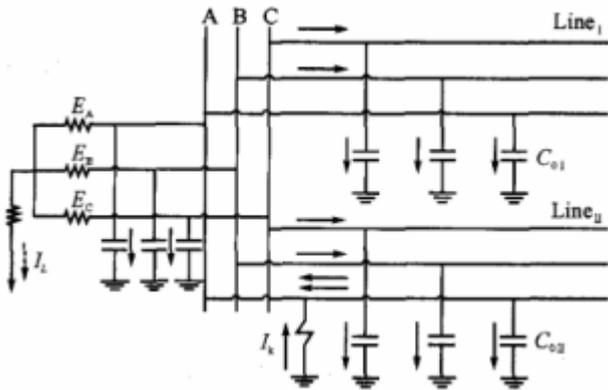


图4 中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时，电流分布情况

因为通常都使用过补偿，因此，在发生故障的情况下，零序电流即为消除线圈时零序和未通过该故障单元的零序电压之间的差异，电容式无功的真正流向是由母线到导线（即由导线至母线）的电容式无功，这与不经过故障时的流向相同。所以，在此情况下一是不能用功率方向差异区分故障线路，二是过补偿度较小，所以也难以像中性点不接地系

统一用零序电流的大小差异发现故障线路。

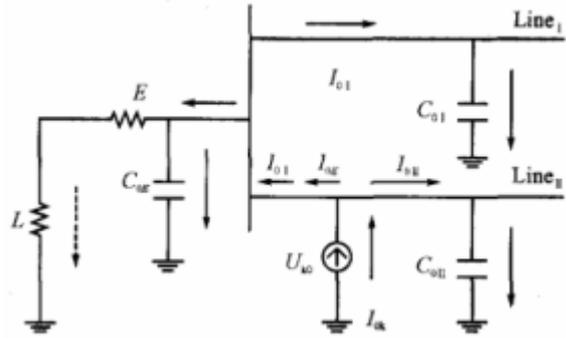


图5 中性点通过消弧线圈接地单相接地零序等效网络

### 3 根据单位零序差流定位故障区段原理

传统稳态零序电流比幅法通过在中性点非直接接地系统单相接地故障中，当零序电流在故障线路上最大的时候，将零序电流与未失效的零序电流的总和相同，以达到配电网故障区段定位的目的<sup>[3]</sup>。但是这种方法在应用的过程中存在着许多的缺陷与不足，主要表现为：

①常规稳态零序电流比幅法除了受到线路长度影响外，还会受到过度电阻尺寸的影响。特别在系统某一条线较其他线长得多时，这时该条线分布电容更接近于系统整体分布电容，采用常规稳态零序电流比幅法易出现误判。

②对于经过消弧绕组的中性点线接地，零序电流是电网中非失效线上容性零序和消弧绕组所生成的零序电流之积，因为容性零序电流与零序电流反向，从而造成在发生失效时，零序电流会因为过量的补偿而减少，在电弧线圈的补偿条件（过量、不足、完全补偿）中的改变，零序电流大小及方向均可能改变，导致原判据易出现误判。

上述分析结果表明多分支配电网常规零序电流比幅法准确性不足，这是由于在多条线路情况下，无功和无功两种情况下的零序电压振幅差别很小，且规律较差，易造成误判。为此，提出了采用“差流和长度之比”扩大故障线路和非故障线路的距离，使准则更加明确，因而能改善区段的定位准确率<sup>[4]</sup>。

所谓差流是指线路起点和终点两端零序电流之差，这个值是线路自身零序电流的数值，其尺寸与线路的长度成比例，为了避免各支路的长短对其的影响，仍然使用了差流长与短比值作为各支路零序差流量的计算，公式是：

$$\Delta I = I' - I'' \quad (15)$$

$$I = \Delta I / L \quad (16)$$

其中， $\Delta I$ 为线路差流； $I'$ 为线的始端零序电流； $I''$ 为线末端的零序电流；L为线的长度；I为线的单位零序差流的振幅。

结果显示：在无失效的情况下，零序差流基本相同，而在失效的情况下，零序的电压与其在下行支路的长度相关，

并且其零序差与无故障的导线根据短路和中性点接点的情况存在较大差异,虽然这个数字有所变化,但与正常的零序差电流仍然存在较大差异,所以采用单位零序电流为故障区间确定新准则可以扩大故障线路与非故障线路间的距离,进而依据各线路中单位零序差电流的幅值大小确定故障区间<sup>[5]</sup>。

#### 4 仿真分析

为了验证零序差流法的正确性,论文还就各种过渡电阻、支路和中性点地的接地模式进行了数值仿真。由PSCAD构建的电力系统网络。采用Bergeron的线模式,以100kHz的采样频率和0.35s的模拟时间,仿真参数为线路长度分别为: $L_{AB}=30\text{ km}$ ,  $L_{CD}=35\text{ km}$ ,  $L_{FF}=26\text{ km}$ ,  $L_{GH}=28\text{ km}$ ,  $L_{KJ}=28\text{ km}$ 。

线路正序参数如下:

$$\omega L_1 = 0.5031 \times 10^{-3} \Omega / \text{m}$$

$$\frac{1}{\omega C_1} = 302.15 M \Omega \cdot \text{m}$$

线路零序参数如下:

$$R_0 = 0.37958 \times 10^{-3} \Omega / \text{m}$$

$$\omega L_0 = 0.13277 \times 10^{-2} \Omega / \text{m}$$

$$\frac{1}{\omega C_1} = 419.34 M \Omega \cdot \text{m}$$

系统阻抗如下:

$$Z_0 = 0.1121 + j6.723 \Omega / \text{km}$$

当中性点经消弧绕组接地时,出现一次单相接地的故障,通常选用补偿度P作为接地—不接地的补偿。该算例利用消弧线圈进行过补偿,并将补偿度P设为常数。

#### 5 结语

分析了中性点不接地系统及经消弧线圈接地系统单相接地故障特点,并引入传统零序电流比幅方法的特点,从而提出以单位零序差流作为定位故障区段的标准。然后采用PSCAD搭建配电网模型进行仿真实验,结果表明采用单位零序差流法可以准确地判断出配电网的故障区段。

#### 参考文献

- [1] 王钢,曾德辉,李松奕,等.一种基于零序特征量的配电网接地故障区段定位方法[J].电力自动化设备,2021,41(1):8.
- [2] 王雪文.基于多端同步波形的配电网小电流接地故障区段定位技术[D].济南:山东大学,2020.
- [3] 郑朝.配电网单相接地故障定位新技术研究[D].北京:华北电力大学,2012.
- [4] 余斌.配电网复杂接地方式下故障特征分析与故障区域定位研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [5] 鲁苏延,丁孝华,苏标龙,等.基于多判据聚类分析的配电网单相接地故障区段定位方法[J].淮阴师范学院学报:自然科学版,2020(2):133-139.