

[故障处理]

# 配电线路单相接地故障暂稳态分析

文/尚爱洋

国网山东省电力公司胶州市供电公司

用数学方法分析配电线路中小电流接地系统不接地方式下对应的暂态过程和稳态过程，得出该系统单相接地故障的电压与电流特征。通过MATLAB搭建10 kV配电线路模型，对比不同故障距离及不同接地电阻的情况。仿真分析证明该方法具有可靠性，为故障选线提供理论依据。

电力系统的三大组成部分是发电厂、输电线路和配电网络。配电网络作为电网的重要组成部分之一，主要给绝大部分电力用户提供供电服务，是保障电力供应的基础，对于供电可靠性以及电能质量起着至关重要的作用。

电力系统中有有效接地与非有效接地两种接地方式。有效接地方式包括直接接地、经低阻抗接地以及经小电阻接地方式等，主要应用于110 kV及以上的输电线路，是大电流接地系统统称；非有效接地方式包括直接接地、经消弧线圈接地以及经高阻接地方式等，主要应用于35 kV及以下的配电线路，是小电流接地系统统称。

## 单相接地故障选线原理研究现状分析

### 1. 基于稳态分量的选线方式

#### (1) 零序电流比幅法

中性点不接地系统发生单相接地故障时，稳态下流经故障线路的零序电流数值等于所有非故障线路对地电容电流之和，流经故障线路的零序电流最大，因此可以通过比较零序电流的幅值找到故障线路。群体比幅比相法提高了检测的可靠性和灵敏度，但在母线故障时会导致误判。零序电流幅值比较法不适用于谐振接地系统。

#### (2) 零序电流比相法

当单相接地故障发生在中性点不接地系统时，

流经故障线路的稳态零序电流从线路流向母线。流经非故障线路的稳态零序电流从母线流向线路。零序电流相位比较法不适用于谐振接地系统，因为在过补偿或全补偿情况下，故障线路的零序电流方向与非故障线路相同。

#### (3) 群体比幅比相法

该方法多用于中性点不接地系统，以幅值大、波形稳定的零序电压为基准，对零序开断电压进行正向监测。当零序开断电压大于电压闭锁整定值的情况下，开始采样，进行快速傅里叶分解，按基波或五次谐波排队，取幅值较大的前三个零序电流进行相位比较。如果其中一相与另两相相反，则为线路故障，否则判定为母线故障。但当线路短路或故障点经过高阻接地时，零序电流较小，其相位误差较大，可能导致选线错误。

#### (4) 有功分量法

由于消弧线圈不能补偿零序电流的有功分量，当发生单相接地故障的情况时，通过提取每条线路的零序有功分量，非故障线路的零序有功分量方向从母线流向线路，数值等于线路本身的有功损耗电流值；故障线路零序有功分量方向与之相反，其大小等于非故障线路零序有功分量和消弧线圈零序有功分量之和。通过判定各线路零序有功分量的相对大小和相位关系，便可以确定故障线路或母线故障。

## 2. 小电流接地系统分析

1) 中性点不接地方式在各电网接地方式中是最简单的一种。对于保证供电可靠性,缩短停电时间,具有十分积极的意义。但是,如果是金属接地,会超过额定相电压的1.73倍,容易造成大量的过电压,对系统绝缘有害,事故影响更大。在这种运行方式下,变电站的出线应架空;外绝缘引起绝缘失效的概率大,要求系统运行可靠,但系统结构薄弱;电弧对地电容小,容易灭弧。

### 2) 中性点经消弧线圈接地方式

这种方法属于谐振接地,当线路过长,有大量出线,或有电缆线路时,一旦电容电流超过幅值,就不容易熄灭故障引起的电弧,因此可以采用这种方法。对于中性点不接地系统,可适当降低设备的绝缘水平。因此,这种方法得到了广泛的应用。为了避免后两种模式的缺陷,消弧线圈对应的工作状态往往是过补偿,其失谐度在5%~10%之间。虽然由于完全补偿而产生最小接地电流,但很容易引起串联谐振,并且在中性点产生非常高的位移电压。

## 配电网线路单相接地故障分析

### 1. 中性点不接地系统单相接地故障的稳态分析

如图1所示,由于配电装置馈线上安装了故障指示灯,本文选取10 kV配电站和馈线进行了深入研究,并对接地上方的故障电流进行了分析。配电网可向馈线提供10 kV电压。为了分析馈线上的电流分布,可以理想化大功率三相理想电源,中性点不接地;为便于分析,假定母线上有两条馈线。

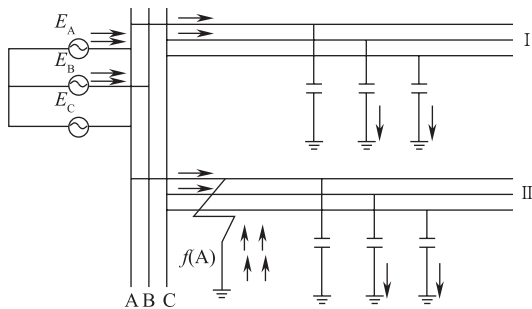


图1 中性点不直接接地电网单相短路稳态分析图

每条线路在中性点不接地电网之中的对地,均存在电容,以 $C_{01}$ 、 $C_{0II}$ 等集中电容对此予以表示。

当A相接地产生于II线路时,若并未考虑线路阻抗,电容电流等对压降的影响,那么A相在整体系统之中的对地电压均为零,所以对应的电容电流也是零。B相和C相,对应的电容电流、电压均升高 $\sqrt{3}$ 倍。

基于以上分析,得出以下结论:

1) 中性点不接地电网发生单相接地时,所有电压等级相同的电网都会产生零序电压,正常运行电网的相电压为其值。

2) 无故障分量中存在零序电流,其值为对地电容电流,无功功率的实际方向为从母线到线路。

3) 系统中所有正常元件对地电容电流之和等于故障线路的零序电流,且该值较大。无功功率的具体方向是从线路到母线。

### 2. 中性点不接地系统单相接地故障的暂态分析

在配电线路不接地系统中发生单相接地故障的瞬间,利用图2中的等值回路,分析流过故障点的暂态电容电流。

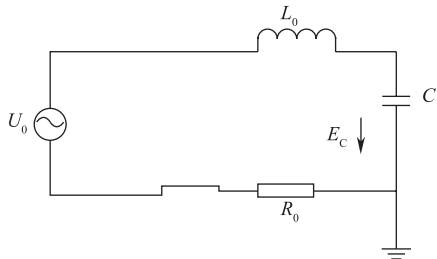


图2 暂态等效电路

图2中, $C$ 为配电线路的A、B、C三相对地电容; $L_0$ 为三相线路和电源变压器等在零序通路中的等值电感; $R_0$ 为零序回路中的等值电阻,包括故障点的电弧与接地电阻; $U_0$ 为零序电源电压。

图2中的暂态等效电路适用于分析配电网中各种单相接地故障初始时刻的暂态过程。当单相金属接地发生时,图中的 $R_0$ 和 $L_0$ 可通过三相线路和电力变压器的参数计算。此时可以不考虑故障点的接地电阻和电弧电阻,零序回路的参数也最容易确定,而且所得结果也十分准确。以下主要分析单相金属接地时的暂态过程。

在分析电容电流时,因其具有较高的自由振荡频率,通过 $L_0$ 、 $C$ 、 $R_0$ 组成的串联回路和零序电源电压 $U_0$ ,便可确定暂态的电容电流 $I_C$ 。

根据图2,可以写出以下微分方程式

$$R_0 I_C + L_0 \frac{dI_C}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t I_C dt = U_{\phi m} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

第一种情况，当  $R_0 < 2\sqrt{\frac{L_0}{C}}$  时，回路电流的暂态过程具有周期性的震荡衰减的特性；第二种情况，当  $R_0 \geq 2\sqrt{\frac{L_0}{C}}$  时，回路电流的振荡衰减特性具有非周期性，并逐渐趋向于稳定状态。

## 基于MATLAB系统建模的仿真分析

### (1) 不接地系统模型验证

依据前文的理论分析可知：不接地系统正常运行时三相对称，没有零序电压和零序电流的出现。图3是配电线路系统正常运行时三相电压的仿真图，可见三相电压相位两两相差120°，幅值相等。根据电路知识计算10 kV配电线路的三相电压理论峰值为

$$U_m = \frac{10}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 8.16(\text{kV}) \quad (2)$$

图3中三相电压峰值可以看出为8.16 kV，与理论分析的数值相吻合。

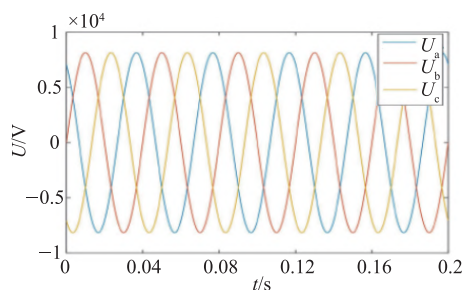


图3 正常运行时的三相电压波形图

当某条配电线路发生单相接地故障时，接地相的电压的数值瞬间降为0，正常相的电压上升为线电压，零序电压与零序电流在电网中出现。

可以看出，模型的仿真结果与理论相符，线路正常运行时无零序电流（即零序电流数值为零），一旦出现故障，线路中立刻出现零序电流，也可以看出故障时正常路线与故障线路零序电流相反，故障线路零序电流幅值最大，同样符合理论分析。

### (2) 不同故障距离对系统的影响

分析不同故障距离对零序电流的影响时，采取了以下两种故障情况进行仿真。

情况一：当线路一距离母线4 km处发生A相接地，故障角为0°且接地电阻数值为100 Ω时。

情况二：当线路一距离母线400 km处发生A相接地，故障角为0°且接地电阻数值为100 Ω时。对比两幅波形图可总结以下结论。

1) 当故障点距离母线越远，故障线路中的零序电流峰值就越小，振荡频率也越小，这主要是由于电容电流分量作自由衰减震荡造成的。

2) 由图3可知暂态过程维持时间较短，约为0.02 s，但故障距离越长维持的时间也越长。在此过程中故障相的零序电流达到的幅值大小可达稳态时的3倍有余。

3) 进入稳态后，故障相的零序电流数值是非故障相的2倍左右。

### 4) 不同接地电阻对系统的影响

分析不同接地电阻对零序电流的影响时，采取了以下两种故障情况进行仿真。

情况一：当线路二距离母线10 km处发生A相接地，故障角为0°且接地电阻数值为100时。

情况二：当线路二距离母线10 km处发生A相接地，故障角为0°且接地电阻数值为2 000时。对比两幅波形图可总结出以下讨论。

1) 接地电阻越大，各线路暂态时期零序电流的幅值越小，振荡过程越短，该现象仍然符合前文理论分析。

2) 接地电阻越小，对电力系统影响越大，暂态与稳态的零序电流数值之差越大，对于电力系统是很不利的。

3) 接地电阻越大的情况下，故障相的残余电压也跟着越大。

## 结束语

本文通过不接地系统发生单相接地故障时的情况来介绍电压与电流的变化情况。其次，利用MATLAB对中性点不接地系统发生单相接地故障进行仿真，讨论零序电流与零序电压在不同过渡电阻大小、不同故障相位以及故障点位置情况下的关系。最后，结果表明该方法适用于配电网中的中性点不接地系统中。大量的仿真结果表明本文提出的方法用于金属性接地故障、经过渡电阻接地故障以及故障距离母线远近与否都能正确地表示出零序电流与零序电压的变化情况。EA

(收稿日期：2024-08-10)