

# 考虑三相不平衡电流影响的改进导纳法故障选线

张春秋 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 在分析谐振接地电网三相不平衡电流产生原因的基础上,提出了一种新的谐振接地电网单相接地故障选线方法——考虑三相不平衡电流影响的改进导纳法故障选线。该方法消除了电网三相不平衡电流对导纳法故障选线的影响,同时只需要比较故障前后以及消弧线圈调整前后各出线零序导纳变化量,即可选出故障线路。该方法拉大了故障馈线与非故障馈线故障特征量的差距。

**关键词:** 谐振接地电网; 三相不平衡; 改进导纳法; 故障选线

**Abstract:** Based on the analysis of occurrence reason of three-phase unbalance current in resonance grounding system, a new single-phase earth fault line selection method in resonance grounding grid is proposed, that is, fault line selection with improved admittance considering the impact of three-phase unbalance current. This method eliminates the influence of three-phase unbalance current on fault line selection with improved admittance, and it only needs to compare the variation of zero-sequence admittance before and after the fault as well as the adjustment of arc-suppression coil so as to select the fault line. The proposed method has pulled away from the characteristic quantity between fault feeder and non-fault feeder.

**Key words:** resonance grounding system; three-phase unbalance; improved admittance; fault line selection

中图分类号: TM862 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)03-0063-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.03.014

## 0 引言

中国多数中低压配电系统都采用辐射状的谐振接地系统<sup>[1]</sup>。谐振接地电网发生单相接地故障时,可以继续运行1~2h,如果在此期间排除故障,将可以实现配电网的持续性安全供电。在谐振接地系统中,由于消弧线圈补偿电流的作用,故障电流为系统电容电流与消弧线圈补偿电流的叠加,限制了接地故障电流的大小,使得残余电流易于熄弧。但是由于消弧线圈的电感电流对接地故障电流的补偿作用,导致接地电流、接地电流方向等故障特征不明显,增大了谐振接地系统故障选线的难度。目前已提出多种谐振接地系统单相接地故障选线方法,主要有零序电流幅值比较法、零序电流方向法、五次谐波法、有功分量法、能量函数法、零序导纳法、电流增量法、注入信号法等。其中,零序导纳法不受接地点过渡电阻的影响<sup>[2]</sup>,理论上优于其他方法,应用前景广阔。但是,电网不平衡电流的出现使得正常运行情况下也会产生零序电流,而不平衡零序电流的大小有可能远远大于谐振接地系统故障时的零序电流,且其方向不确定,同时电网三相不平衡电流的出

现可能会影响零序电流、零序电压的准确测量,进而影响零序导纳的计算,最终将影响选择结果的准确性。因此,提出了一种考虑三相不平衡电流影响的改进导纳法选线技术来解决上述问题。

## 1 不平衡电流分析

电网不平衡电流主要来源于系统对地电容不对称、负荷不对称以及电流互感器参数不对称。图1展示了系统对地电容不对称引起各电压量的变化。

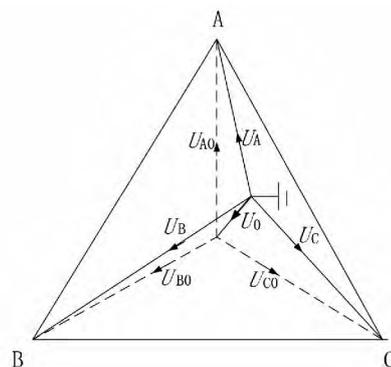


图1 三相系统对地电压、对中性点电压和中性点位移电压

由图1可知,系统三相对地不对称会产生零序电压 $U_0$ ,从而在各条线路上形成零序电流,这个零序电流的大小与系统对地电容不对称度、各条线路

的对地电容成正比。

以  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  表示三相对地电压,假设三相对地泄露电导相同且有  $g_i = g_{A_i} + g_{B_i} + g_{C_i}$ ,电网三相对地电容分别为  $C_{A_i}, C_{B_i}, C_{C_i}$  且满足  $C_i = C_{A_i} + C_{B_i} + C_{C_i}$ ,可得各线路的零序电流为

$$3\dot{I}_{0i} = \dot{U}_A \cdot j\omega C_{A_i} + \dot{U}_B \cdot j\omega C_{B_i} + \dot{U}_C \cdot j\omega C_{C_i} + g_i/3 \cdot (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) \quad (1)$$

同时,三相对地电压分别等于三相对中性点电压与中性点对地电压的向量和<sup>[3]</sup>,见式(2)。

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{U}_{A0} + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_B = \dot{U}_{B0} + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_C = \dot{U}_{C0} + \dot{U}_0 \end{cases} \quad (2)$$

并且有三相对中性点电压和为0。

$$\dot{U}_{A0} + \dot{U}_{B0} + \dot{U}_{C0} = 0 \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1),可得

$$3\dot{I}_{0i} = \dot{U}_0 (g_i + j\omega C_i) + \dot{U}_{A0} \cdot j\omega C_{A_i} + \dot{U}_{B0} \cdot j\omega C_{B_i} + \dot{U}_{C0} \cdot j\omega C_{C_i} \quad (4)$$

将式(4)的零序电流分成两部分:

1) 三相对地平衡零序电流,如式(5);

$$\dot{I}_{平衡} = \dot{U}_0 (g_i + j\omega C_i) \quad (5)$$

2) 三相对地不平衡电流,如式(6)。

$$\dot{I}_{不平衡} = \dot{U}_{A0} \cdot j\omega C_{A_i} + \dot{U}_{B0} \cdot j\omega C_{B_i} + \dot{U}_{C0} \cdot j\omega C_{C_i} \quad (6)$$

可见,三相对地电容不对称将产生三相不平衡电流,不平衡电流与三相对中性点电压  $\dot{U}_{A0}, \dot{U}_{B0}, \dot{U}_{C0}$  及系统对地电容  $C_{A_i}, C_{B_i}, C_{C_i}$  有关,不随系统运行状态改变而改变。因此,故障前后测得的零序电流中都包含一个固定的不平衡电流  $\dot{I}_{不平衡}$ ,如果不对此平衡电流加以处理,将影响以后的故障选线准确度。故采用故障前后零序电流相减法得到因故障而产生的零序电流。

电力系统的负荷一般是三相负荷,可能不对称,负荷的接线方式为三角形接线或星形接线<sup>[4]</sup>,负荷中性点不接地,不会形成单相回路,因此三相负荷不存在零序回路,也就不会产生零序电流,三相负荷的不对称不会影响基于零序分量选线的故障选线准确度。

如果三相电流互感器参数不对称,将引起零序不平衡电流,监测装置测得的零序电流与各相之间电流互感器的不平衡度及负荷电流有关。假设单相接地故障瞬间,故障前后短时间内负荷电流没有变化,可以得到故障后电流互感器输出的零序电流等于故障前不平衡电流分量与因故障而产生的零序电流之和<sup>[5]</sup>。这样,考虑通过故障前后零序电流对应

相减消除不平衡电流分量的影响。

## 2 故障选线

### 2.1 零序导纳法基本原理

以图2为例,对谐振接地系统发生单相接地故障后的导纳法选线方法进行分析。该系统采用消弧线圈并联电阻接地方式,有  $n$  条出线,假设在第  $k$  条出线上发生接地电阻为  $R_f$  的单相接地故障,  $g_n$  与  $C_n$  分别代表各条线路电导与电容。取母线流向线路为零序电流正方向。

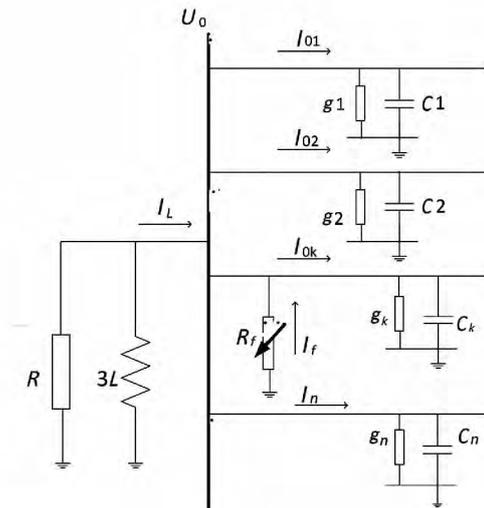


图2 谐振接地系统单相接地零序电路图  
由图2可知,非故障出线的零序电流为

$$3\dot{I}_{0i} = \dot{U}_0 \cdot (g_i + j\omega C_i) \quad (7)$$

非故障出线的零序导纳为

$$Y_{0i} = \dot{I}_{0i} / \dot{U}_0 = \frac{g_i + j\omega C_i}{3} \quad (8)$$

故障出线的零序电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_{0f} &= \dot{I}_L - \sum_{i=1, i \neq k}^n \dot{I}_{0i} \\ &= \dot{U}_0 \cdot \left( \frac{1}{3\omega L} - \frac{1}{R} - \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{j\omega C_i + g_i}{3} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

故障出线的零序导纳为

$$\begin{aligned} Y_{0f} = \dot{I}_{0f} / \dot{U}_0 &= - \left( \frac{1}{R} + \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{g_i}{3} \right) \\ &\quad + j \left( \frac{1}{3\omega L} - \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{j\omega C_i}{3} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

令  $g_\Sigma$  为非故障线路电导之和  $g_\Sigma = \sum_{i=1, i \neq k}^n g_i$

令  $C_\Sigma$  为非故障电容之和  $C_\Sigma = \sum_{i=1, i \neq k}^n C_i$

则式(10)可以简化为

$$Y_{0f} = \dot{I}_{0f} / \dot{U}_0 = - \left( \frac{1}{R} + \frac{g_\Sigma}{3} + j \left( \frac{1}{3\omega L} - \frac{\omega C_\Sigma}{3} \right) \right) \quad (11)$$

由式(8)、式(11)可知,单相接地故障期间测得的非故障线路零序导纳为该线路本身导纳;测得的故障线路的零序导纳则与其自身导纳不同,其大小和相位因消弧线圈并联电阻  $R$ 、电感  $L$  的投入而发生改变<sup>[6]</sup>。基于这个原理,可以事先将各条线路实际零序导纳的大小和相位记忆下来,当检测到单相接地故障发生时,根据各测量装置测得的零序电压、零序电流参数计算出各出线的零序导纳<sup>[7]</sup>。然后与之前记忆的零序导纳大小和相位进行对比,导纳大小或相位发生变化的线路即为故障线路。

前面所述的零序导纳法是基于完全理想化的谐振接地电网推导出来的,并没有考虑实际配电网中不平衡电流的影响。同时,零序导纳法是基于故障前导纳与故障时导纳的比较,需要事先获取各线路的实际导纳,现如今配电网线路结构越来越复杂,线路规模不断发生变化,事先精确测量各条线路零序导纳难度越来越大。

以图2的谐振接地系统为例。考虑系统对地电容不对称时,非故障线路的零序电流中存在三相不平衡电流,结合式(4)、式(6)和式(7)可得非故障线路零序电流可表示为

$$3\dot{I}_{0i} = \dot{U}_0(g_i + j\omega C_i) + \dot{I}_{\text{不平衡}} \quad (12)$$

非故障出线的零序导纳可表示为

$$Y_{0i} = \frac{g_i + j\omega C}{3} + \frac{\dot{I}_{\text{不平衡}}}{3\dot{U}_0} \quad (13)$$

由式(7)、式(9)可知,各出线零序电流与系统零序电压有关;而系统的零序电压是与系统电容值  $C$ 、消弧线圈电感值  $L$ 、接地电阻  $R_f$  有关的变化量<sup>[8]</sup>。当系统发生单相接地故障时,消弧线圈电感  $L$ 、接地电阻  $R_f$  引入接地回路,导致系统的零序电压发生改变。由式(13)可知,由于系统不平衡电流的存在,零序电压的改变将导致非故障线路零序导纳改变。当发生高阻抗单相接地故障时,可能导致零序电压  $\dot{U}_0$  发生较大变化,引起故障前后测得的非故障线路的零序导纳  $Y_{0i}$  发生较大变化,原导纳法失效。

## 2.2 改进导纳法

现提出一种改进导纳法可以解决上述问题。首先定义零序导纳变化量为两次测量的零序电流差与对应时间的零序电压差的比值。

改进导纳法:调整消弧线圈的电抗值,用调整前后测得的导纳变化量与故障前后测得导纳变化量进行比较。非故障线路导纳变化量保持不变,故障线路导纳变化量的大小和方向均发生改变。

在单相接地故障发生后,调整消弧线圈的电抗

值,从而引起各条线路上监测点的零序电压、零序电流发生变化,用调整消弧线圈参数后的零序电流与调整前的零序电流之差,除以改变消弧线圈参数前后的零序电压之差,求得调整消弧线圈参数后零序导纳变化量。同理,用故障时测得的零序电流与故障前的零序电流之差,除以故障前后的零序电压之差,求得故障时零序导纳变化量。将调整消弧线圈参数后零序导纳变化量与故障时零序导纳变化量进行比较。非故障线路的导纳变化量一直不变,故障线路导纳变化量会随着消弧线圈参数的调整而不断变化,且其大小和方向均与非故障线路有较大差别。据此,可以选出故障线路。同时通过对消弧线圈调整前后测得零序电流对应相减可以消除三相不平衡电流的影响。

以图2的谐振接地电网为例,假设系统三相对地电容不对称  $C_{A_i} \neq C_{B_i} \neq C_{C_i}$ 。发生单相接地故障时,消弧线圈接入电感为  $L_1$ ,此时零序电压为  $\dot{U}_a$ 。

各条非故障出线的零序电流为

$$\dot{I}_{ai} = \frac{\dot{U}_a(g_i + j\omega C_i)}{3} + \frac{\dot{U}_{A0} \cdot j\omega C_{A_i} + \dot{U}_{B0} \cdot j\omega C_{B_i} + \dot{U}_{C0} \cdot j\omega C_{C_i}}{3} \quad (14)$$

故障时故障出线  $k$  的零序电流为

$$\dot{I}_{af} = \dot{U}_a \cdot \left( \frac{j}{3\omega L_1} - \frac{1}{R} - \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{j\omega C_i + g_i}{3} - \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{\dot{U}_{A0} \cdot j\omega C_{A_i} + \dot{U}_{B0} \cdot j\omega C_{B_i} + \dot{U}_{C0} \cdot j\omega C_{C_i}}{3} \right) \quad (15)$$

调整消弧线圈参数,使其接入电感为  $L_2$ ,此时零序电压为  $U_b$ 。重新测量各出线零序电流,调整后各条非故障出线的零序电流为

$$\dot{I}_{bi} = \frac{\dot{U}_b(g_i + j\omega C_i)}{3} + \frac{\dot{U}_{A0} \cdot j\omega C_{A_i} + \dot{U}_{B0} \cdot j\omega C_{B_i} + \dot{U}_{C0} \cdot j\omega C_{C_i}}{3} \quad (16)$$

调整后故障出线  $k$  的零序电流为

$$\dot{I}_{bf} = \dot{U}_b \cdot \left( \frac{j}{3\omega L_2} - \frac{1}{R} - \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{j\omega C_i + g_i}{3} - \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{\dot{U}_{A0} \cdot j\omega C_{A_i} + \dot{U}_{B0} \cdot j\omega C_{B_i} + \dot{U}_{C0} \cdot j\omega C_{C_i}}{3} \right) \quad (17)$$

用调整后的非故障线路零序电流减去调整前的非故障线路零序电流,可得调整  $L$  前后非故障线路零序电流差值为

$$\Delta \dot{I}_{bai} = \dot{I}_{bi} - \dot{I}_{ai} = \frac{\dot{U}_b(g_i + j\omega C_i)}{3} - \frac{\dot{U}_a(g_i + j\omega C_i)}{3} \quad (18)$$

进一步求得调整  $L$  前后非故障线路零序导纳变化量为

$$\begin{aligned} \Delta Y_{bai} &= \Delta \dot{I}_{0i} / \Delta \dot{U}_{0i} = (\dot{I}_{bi} - \dot{I}_{ai}) / (\dot{U}_b - \dot{U}_a) \\ &= \frac{g_i + j\omega C_i}{3} \end{aligned} \quad (19)$$

由式(19)可以得出,非故障线路的导纳变化量仅与线路自身的电导与电容有关,与消弧线圈参数以及投入与否无关。同理,在故障发生时,消弧线圈接入系统,但是并不影响故障前后的零序导纳变化量。由式(14)、式(18)和式(19)容易推出故障前后非故障线路零序导纳变化量为

$$\Delta Y_{a0i} = \frac{g_i + j\omega C_i}{3} \quad (20)$$

对于故障线路,故障前消弧线圈电感  $L$  及消弧线圈并联电阻  $R$  并未投入;当故障发生时,消弧线圈  $L$  与消弧线圈并联电阻  $R$  接入故障线路回路,导致该线路导纳发生明显变化,因此故障前后导纳变化量将发生明显变化。此时,调整消弧线圈参数,故障线路的零序导纳变化量计算与非故障线路类似,将式(15)和式(17)的故障线路零序电流代入式(18)和式(19),可得调整  $L$  前后故障线路零序变化量为

$$\begin{aligned} \Delta Y_{0k} &= (\dot{I}_{bf} - \dot{I}_{af}) / (\dot{U}_b - \dot{U}_a) \\ &= -\left(\frac{1}{R} + \frac{g_\Sigma}{3}\right) - \frac{j\omega C_\Sigma}{3} + \left(\frac{j\dot{U}_b}{3\omega L_2} - \frac{j\dot{U}_a}{3\omega L_1}\right) / (\dot{U}_b - \dot{U}_a) \end{aligned} \quad (21)$$

式中  $g_\Sigma$ 、 $C_\Sigma$  与第二节的定义一致。

比较式(19)和式(20)可知,非故障线路零序导纳变化量保持不变。比较式(19)的非故障线路零序导纳变化量  $\Delta Y_{bai}$  与式(21)的故障线路零序导纳变化量  $\Delta Y_{0k}$ ,非故障线路的导纳变化量  $\Delta Y_{bai}$  实部为  $g_i$ ,恒为正;故障线路的导纳变化量  $\Delta Y_{0k}$  实部为  $-\left(\frac{1}{R} + g_\Sigma\right)$ ,恒为负。

图3形象地展示了单相接地故障时各线路零序导纳变化量。

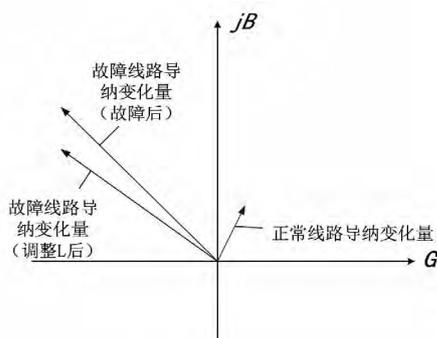


图3 导纳变化量矢量图

由图3可知,正常线路的零序导纳变化量始终为  $g + j\omega C_i$ ,并且始终位于矢量图的第一象限;而当故障发生时,调整消弧线圈参数,故障线路的导纳变化量位于矢量图的第二象限,且其大小随着消弧线圈电感  $L$  的变化而变化,据此,可以找出故障线路。

### 3 结 论

谐振接地电网中,由于系统三相对地电容不对称、三相电流互感器参数不对称等影响,可能存在三相不平衡电流,三相不平衡电流是影响谐振接地电网选线成功率的重要因素。因此提出了一种考虑三相不平衡影响的改进导纳法选线方法,通过零序电流对应相减法消除了三相不平衡电流对选线的影响。同时,提出导纳变化量的观点,在故障选线中,不再需要事先测量各条线路的导纳,只需要比较故障前后的导纳变化量与故障发生时调整消弧线圈参数前后的导纳变化量,导纳变化量保持不变为非故障线路,导纳变化量大小或方向发生变化的即为故障线路。该方法较一般的导纳法方便可靠。

#### 参考文献

- [1] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [2] 唐轶,陈奎,陈庆,等.馈出线测量导纳互差求和法小电流接地选线研究[J].电力系统自动化,2005,29(11):69-73.
- [3] 连鸿波.谐振接地电网单相接地故障消弧及选线技术一体化研究[D].保定:华北电力大学,2005.
- [4] 刘天琪,邱晓燕.电力系统分析理论(第二版)[M].北京:科学出版社,2011.
- [5] 张利,杨鹏,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[J].电力系统自动化,2008,32(17):79-82.
- [6] 易东,李群湛,黄彦全.零序导纳法接地选线保护原理[J].电力自动化设备,2002(10):40-42.
- [7] 张林利,高厚磊,徐丙垠,等.基于区段零序导纳的小电流接地故障定位方法[J].电力系统自动化,2012,36(20):94-98.
- [8] 张利.中性点非有效接地系统单相接地故障定位方法的研究[D].北京:华北电力大学,2009.

作者简介:

张春秋(1991),硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制、电力系统稳定与控制;

杨洪耕(1949),教授、博士生导师,从事电能质量分析与控制、区域电压无功控制等方面的研究与教学工作。

(收稿日期:2016-03-15)