

# 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述

肖白, 束洪春, 高峰

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 在我国 3~66kV 配电网中, 广泛采用小接地电流系统, 而此系统发生最多的是单相接地故障, 所以如何快速准确地检测出故障线路一直是电力系统继电保护的重要研究课题。回顾了国内外小接地电流系统单相接地故障选线方法发展的历史, 对现有的各种选线原理和方案做了系统的归纳, 提出了尚需解决的问题, 并给出了分析的结论。

**关键词:** 小接地电流系统; 故障选线; 继电保护; 消弧线圈; 电磁暂态

**中图分类号:** TM713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)04-0016-05

## 1 引言

我国大多数配电网均采用中性点不直接接地系统(NUGS), 即小接地电流系统, 它包括中性点不接地系统(NUS), 中性点经消弧线圈接地系统(NES, 也称谐振接地系统), 中性点经电阻接地系统(NRS)。近年来, 随着自动跟踪消弧电抗器的广泛使用, 为解决系统于故障瞬间出现的谐振问题, 开始采用消弧线圈与非线性电阻串(或并)联以及与避雷器并联的运行方式。NUGS 发生单相接地故障的几率最高, 这时供电仍能保证线电压的对称性, 且故障电流较小, 不影响对负荷连续供电, 故不必立即跳闸, 规程规定可以继续运行 1~2 h。但随着馈线的增多, 电容电流也在增大, 长时间运行就易使故障扩大成两点或多点接地短路, 弧光接地还会引起全系统过电压, 进而损坏设备, 破坏系统安全运行, 所以必须及时找到故障线路予以切除。

## 2 国内外研究现状

在原苏联, NUGS 得到了广泛应用, 其保护原理从过流、无功方向, 发展到了群体比幅; 日本在供电、钢铁、化工用电中普遍采用 NUS 或 NRS, 所以选线原理简单, 采用基波无功方向方法。德国多使用 NES, 并于 30 年代就提出了反映接地故障开始时暂态过程的单相接地保护原理。法国在使用 NRS 几十年后, 现在正以 NES 取代 NRS, 同时开发出了高新技术产品, 零序导纳接地保护。90 年代初, 国外已将人工神经网络原理应用于保护并有文献提到应用专家系统方法。

在我国, 从 1958 年起就一直对此问题进行研究, 提出了多种选线方法, 并开发出了相应的装置。已经提出的选线方法均以零序电压来启动保护或选

线装置, 因此可根据是否利用故障电流把它们分成两类: 第一类: 如比幅法、比相法、群体比幅比相法、首半波法、谐波电流方向法、五次谐波分量法、有功分量法、能量法、还有近年出现的应用小波分析、最大 ( $I_{\sin}$ ) 原理、模糊推理或模式识别来实现故障选线的多种方法; 第二类: 如拉线法、注入信号跟踪法。随着选线理论的发展, 各种选线装置也相继问世, 50 年代末我国就利用接地故障暂态过程研制成功了选线装置, 80 年代中期我国又研制成功了微机接地选线装置, 最近又增添了残流增量法微机接地选线装置, 到目前为止, 基于上述不同选线理论已经先后推出了几代产品。但在实际应用中的效果并不十分理想, 所以此问题还有必要进一步研究<sup>[1~4,7]</sup>。

## 3 各种选线原理的分析

### 3.1 利用故障电流实现选线的方法

#### 3.1.1 基于零序电流基波的选线方法

##### (1) 零序电流比幅法

NUS(图 1 中 k1、k2 断开) 单相接地短路时, 流过故障元件的零序电流在数值上等于所有非故障元件对地电容电流之和, 即故障线路上的零序电流最大, 所以只要通过零序电流幅值大小比较就可以找出故障线路。但这种方法不能排除 CT(电流互感器) 不平衡的影响, 受线路长短、系统运行方式及过渡电阻大小的影响, 且系统中可能存在某条线路的电容电流大于其它线路电容电流之和的情况, 可见此法在理论上就是不完备的。需指出, 该方法有两种变形, 在实际中都有使用, 但均针对特定条件。

分别以线路上的  $I_0$  与其它线路上的  $I_0$  之和进行比较, 其中相等的那条线路是故障线路。根据图 2(k1 开) 可得出如下选线判据:

$$\dot{I}_{0j} = \sum_{i=1, i \neq j}^n \dot{I}_{0i} \quad (1)$$

(  $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$  )

使(1)式成立的出线  $j$  为故障线路,若对所有出线(1)式均不成立,则为母线故障。

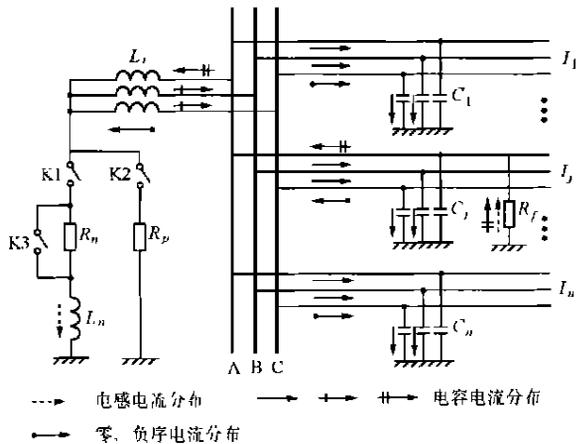


图1 小接地电流系统单相接地

另一种变形,分别预先计算出每条馈线对地电容大小,单相接地时,比较测得的  $I_0$  是否与本线路的电容电流大小相等,不相等的即为故障线路,若都相等则为母线故障。

$$\dot{I}_{0i} = 3 C_{0i} E_a \quad (2)$$

其中:  $C_{0i}$  是线路对地电容;  $E_a$  是电源电势;  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

使(2)式不成立的出线  $i$  为故障线路,若对所有出线(2)式均成立,则为母线故障。

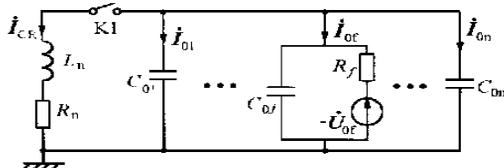


图2 单相接地的零序网等效

### (2) 零序电流相对相位法

NUS 中故障线路与非故障线路的零序电流分别为从线路流向母线和从母线流向线路,所以只要比较零序电流方向就可找出故障线路。此法在故障点离互感器较远且线路很短时,零序电压、电流均较小,会产生“时钟效应”<sup>[2]</sup>,相位判断困难。且受 CT 不平衡电流、过渡电阻大小、继电器工作电压死区及系统运行方式的影响,易误判,并对 NES 失效。

### (3) 群体比幅比相法<sup>[1][8]</sup>

其原理是先进行  $I_0$  比较,选出几个幅值较大的作为候选(希望通过选大来避免“时钟效应”,但实际

上不能完全避免),然后在此基础上进行相位比较,选出方向与其它不同的,即为故障线路。该方法在一定程度上解决了前两种方法存在的问题,但同样不能排除 CT 不平衡电流及过渡电阻大小的影响,“时钟效应”仍可能存在。考虑到单群体比较方案存在死区,故还需提出几个互补方案来解决,文献<sup>[8]</sup>指出了 3C 方案(3 个  $I_0$ 、1 个  $U_0$ ) 在  $I_3$  较小时其相位误差会很大而误动的情况,增加了 2CIV, 2C, 1CIV, 1C 方案,较好地解决了此问题。

### 3.1.2 谐波分量法

#### (1) 谐波电流方向法<sup>[5]</sup>

针对基波比幅法中故障线路上的  $I_0$  不一定最大和比相法对 NES 失效的问题,提出了谐波电流方向原理。NES(图 1 中 k1, k3 合, k2 开)单相接地的零序网等效电路见图 2(k1 合),临界谐振状态时有:

$$\dot{I}_{0jk} + \sum_{i=1, i \neq j}^n \dot{I}_{0ik} + \dot{I}_{1k} = 0 \quad (3a)$$

$$\text{即 } \dot{I}_{0jk} = -(\dot{I}_{1k} + \sum_{i=1, i \neq j}^n \dot{I}_{0ik}) \quad (3b)$$

其中:  $\dot{I}_{0ik}$  是第  $i$  条线路的  $k$  次零序谐波电流,  $\dot{I}_{01k}$  为流经母线消弧线圈的  $k$  次零序谐波电流,  $\dot{I}_{0jk}$  是故障条线路的  $k$  次零序谐波电流,  $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$ 。

随着谐波次数的增加,感抗增大而容抗减小,总能找到一个  $M$  使非故障线路对  $M$  次谐波电流呈容性,从而故障线路与非故障线路的  $M$  次谐波电流方向相反,即(3b)式右边为负,同时所有大于  $M$  次谐波的电流均满足这一关系。此法受 CT 不平衡电流或负荷中  $M$  次谐波分量的影响,且谐波次数越高其相对误差越大,选线精度越低。

#### (2) 五次谐波分量法<sup>[1][3][8]</sup>

由于谐波电流方向原理所使用的高次谐波分量较小,易受干扰,实际运行中多使用五次谐波分量法。从过渡电阻的非线性可知故障点本身就是一个谐波源(金属性接地是经电阻接地发展而来的),且以基波和奇次谐波为主,根据谐波在整个系统内的分布和保护的要求,使用五次谐波分量为宜。NES 中的消弧线圈是按照基波整定的,即有  $L \gg 1/C$  和  $5L \gg 1/5C$ ,可忽略消弧线圈对五次谐波产生的补偿效果,知零序电流五次谐波分量在 NES 中有着与 NUS 中零序电流基波相同的特点,再利用前述原理(如群体比幅、比相等),即可解决 NES 的选线问题。但负荷中的五次谐波源、CT 不平衡电流和过渡电阻大小,均会影响选线精度。

### 3.1.3 利用接地故障暂态过程的选线法

### (1) 首半波法

首半波原理是基于接地故障发生在相电压接近最大值瞬间这一假设,此时故障相电容电荷通过故障相线路向故障点放电,故障线路分布电容和分布电感具有衰减振荡特性,该电流不经过消弧线圈,所以暂态电感电流的最大值相应于接地故障发生在相电压经过零瞬间,而故障发生在相电压接近于最大值的瞬间时,暂态电感电流为零。此时的暂态电容电流比暂态电感电流大得多,不论是 NUS 还是 NES,故障发生瞬间的暂态过程近似相同<sup>[11]</sup>。利用故障线路暂态零序电流和电压首半波的幅值和方向均与正常情况不同的特点,即可实现选线。但故障发生在相电压过零值附近时,首半波电流的暂态分量值很小,以及过渡电阻的影响,易引起方向误判。

### (2) 基于小波分析的选线方法

单相接地时,故障电压和电流的暂态过程持续时间短并含有丰富的特征量,而稳态时数值较小,因此在接地故障检测中选用一种适合分析其暂态分量的新理论,将有利于故障选线。小波分析可对信号进行精确分析,特别是对暂态突变信号和微弱信号的变化较敏感,能可靠地提取出故障特征。根据小波变换的模极大值理论可知,出现故障和噪声会导致信号奇异,而小波变换的模极大值点对应着采样数据的奇异点,由于噪声的模极大值随着尺度的增加而衰减,所以经过适当的尺度分解后,即可忽略噪声影响得到较理想的暂态短路信号。小波变换是把一个信号分解成不同尺度和位置的小波之和,利用合适的小波和小波基对暂态零序电流的特征分量进行小波变换后,易看出故障线路上暂态零序电流特征分量的幅值包络线高于非故障线路的,且其特征分量的相位也与非故障线路相反,这样就能构造出利用暂态信号的选线判据。但电力系统的实际运行是复杂多变的,可能出现暂态分量小于稳态分量的情况,这时就应对母线零序电压和各出线零序电流进行基波的小波系数提取,然后类似地构造选线判据<sup>[11~15]</sup>。

#### 3.1.4 基于最大 $(I_{\sin})$ 原理的选线方法

为消除 CT 不平衡电流的影响,文献<sup>[9]</sup>提出最大  $(I_{\sin})$  原理:考虑到 NUGS 正常运行时,负荷在短时间内不会有较大突变,可通过一中间参考正弦信号,使各线路故障前的零序电流对故障母线在故障后的  $U_0$  亦能找出相位关系,由此再把所有线路故障前、后的零序电流都投影到  $I_{0j}$  (故障线路的零序电流)的理论方向上(见图 3a)。然后计算出各线

路故障前、后的投影值之差  $I_{0,i}$ ,找出差值最大的  $I_{0,k}$ ,即最大的  $(I_{\sin})$ 。若  $I_{0,k} > 0$ ,则线路  $k$  为故障线路,否则为母线故障。此法的本质是寻求最大零序无功功率突变量的代数值,从理论上基本消除了 CT 不平衡的影响,但也有两个缺陷:首先,计算过程中需取一参考信号,若该信号出问题,将造成该算法失效;其次,该算法在计算过程中需求出有关相量的相位关系,计算量太大。文献<sup>[10]</sup>提出最大  $(I_{\sin})$  原理的快速算法,达到了减小计算量,省去使用参考信号的目的。

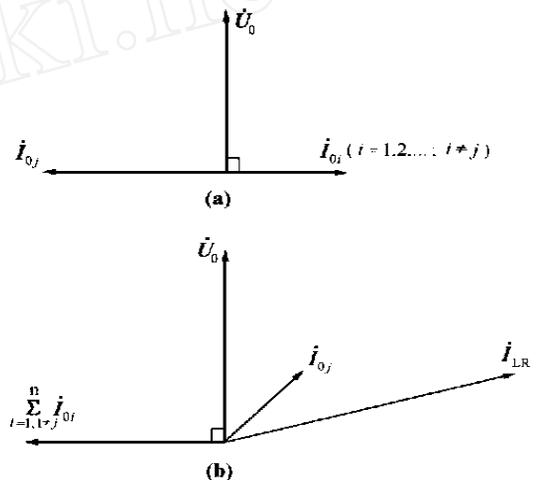


图3 单相接地时零序电压、电流的相量

#### 3.1.5 有功分量法<sup>[16]</sup>

使用自动跟踪消弧电抗器的 NES 中,可利用消弧线圈串联非线性电阻  $R_n$  的特点,在发生接地故障后,且  $R_n$  被短接之前(图 2 中 k1 合),非故障线路不与消弧线圈构成低阻抗回路,故其零序电流为本身接地电容电流;故障线路  $j$  经接地点与消弧线圈构成低阻抗回路,所以其零序电流为所有非故障线路的电容电流及 LR 串联支路的电流之向量和(见图 3b),即包含有流过  $R_n$  的有功电流,且故障线路中的有功电流明显大于非故障线路的,可见通过检测各线路零序电流中的有功分量的大小就可选出故障线路。这种方法可以使用基波分量,利于选线,但 CT 不平衡电流的影响仍然存在。

#### 3.1.6 其他方法

文献<sup>[17]</sup>提出了对系统故障后的全部过程均以能量观点来解释的选线方法,定义  $S_{0j}(t) = \int_0^t u_0(t) i_{0j}(t) dt$  ( $j = 1, 2, 3 \dots$ ) 和  $S_{0l}(t) = \int_0^t u_0(t) i_{0l}(t) dt$  分别为线路和消弧线圈的零序能

量函数,根据系统接地后能量函数的符号和大小均能识别故障线路,且不受负荷和消弧线圈影响的特点,给出了方向判据和大小判据。由于零序能量函数中同时存在电感能量和电容能量,并且电感和电容之间存在能量交换,系统的能量不会释放完,这对选线有利。

模糊推理、模式识别已应用于故障选线的方法中<sup>[18~19]</sup>。在对零序高次谐波电流群体比幅比相的微机选线中,应用模糊推理对其比相方案进行完善,实质就是根据群体比较法,将多种方案综合考虑,按模糊决策组合来确定故障线路。若将故障后各线路零序电流看成某类故障的一个模式,通过神经网络对样本训练与学习来判断此故障模式所属类别来选线,就是典型的模式识别问题。

由于接地故障时零序网络可能发生振荡,引起零序电流、电压幅值和相位的不确定变化,造成基于零序分量的选线方法出现误选,所以文献<sup>[20]</sup>提出基于负序电流的选线方法。短路时,负序电流在系统中的分布与零序电流相似(见图1),且故障线路上的负序电流大小、方向均与非故障线路上的不同,据此给出选线判据。但负序电流受系统不对称度和负荷特性的影响较大,这必然导致该方法在实际应用中的困难。

### 3.2 不利用故障零序电流来选线

#### 3.2.1 拉线法

拉线法即传统采用的无选择性绝缘监视装置方法<sup>[6]</sup>,不再赘述。

#### 3.2.2 “S注入法”<sup>[21]</sup>

对只装设两相CT的架空出线难于得到零序电流,须用新方法:首先定出故障的相别,然后向接地相注入信号电流,其频率 $f_0$ 可取在各次谐波之间,使其不反应工频分量及高次谐波。故障时接地相的PT副边处于被短路的状态,由副边感应来的信号电流沿接地线路的接地相流动并经接地点入地。用信号电流探测器在开关柜后对每一条出线进行探测,探测到注入信号的线路即故障线路。该方法利用处于不工作状态的接地相PT注入信号,不增加一次设备,不影响系统运行。但经高阻接地时,发信机工作可能不满足要求而产生误判。

#### 3.2.3 注入变频信号法

对“S注入法”高阻接地时存在的问题,文献<sup>[22]</sup>提出的注入变频信号法可较好地解决。其原理是考虑故障后位移电压大小的不同,而选择向消弧线圈电压互感器副边注入谐振频率恒流信号还是向故障

相电压互感器副边注入频率为70Hz的恒流信号,然后监视各出线上注入信号产生的零序电流工角、阻尼率的变化,比较各出线阻尼率的大小,再计及线路受潮及绝缘老化等因素可得出选线判据。但当接地电阻较小时,信号电流大部分都经故障线路流通,导致非故障线路上阻尼率误差较大。

## 4 尚需解决的问题

我国现有的选线装置在理论上多采用零序电流高次(以五次为主)谐波原理来实现故障选线,首半波法,有功分量法及其它选线手段均有使用。但是,由于装置要使用的谐波分量在信号中所占比例较小,难于分离和提取,及负荷的谐波干扰,使基于谐波原理的装置在实际运行中出现误判。首半波原理的前提假设是发生故障时相电压在最大值附近,但实际运行中,故障时的相电压有可能出现在零附近,这使该方法的应用受到很大限制。其余多数选线方法都是基于故障后的稳态信号进行分析,但NUGS稳态时的接地电流很小,使基于幅值比较的保护选线精度降低,基于相位比较的保护因“时针效应”而误选<sup>[22]</sup>。

## 5 结论

综上所述,笔者认为:

(1) 单相接地时,接地电容电流的暂态分量往往比其稳态值大几倍到几十倍,若能提取暂态信号中的特征分量则有望显著提高选线精度。利用能对突变的、微弱的非平稳故障信号进行精确处理的小波分析理论,可以很好地分析电力系统电磁暂态过程并提取出故障特征,所以小波理论必将被越来越多地应用于故障选线。

(2) 目前,在能获得零序电流情况下的选线理论是比较完善的,但我国NUGS只装设两相CT的架空出线的数量很大,即许多情况下难于获得零序电流,多数选线方法失效,剩下的方法均存在不足,所以对只有两相装CT的出线也适用的选线原理还有待于进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 姜彤.小接地电流系统单相接地故障选线装置.哈尔滨工业大学.硕士学位论文,1995:145.
- [2] 张树文,等.小电流接地系统单相接地保护原理和技术综述.电力情报,1994,(2):1~4.
- [3] 王祖光.微机小电流接地系统接地选线装置.电力系统自动化,1993,17(6):48~51.

- [4] 唐艳波. 10kV 配电网单相接地电容电流补偿方式的研究. 电力自动化设备, 1999, 19(4): 52~55.
- [5] 庞华, 等. 新型小电流接地系统微机消谐选线综合装置的原理及应用. 电力情报, 1994, (1): 62~66.
- [6] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理(第三版). 北京: 水利电力出版社, 1996: 63~64.
- [7] 要焕年, 曹梅月. 谐振接地技术新发展. 中国电力, 2000, 33(10): 55~57, 80.
- [8] 郝玉山, 等. MLN 系列小电流接地微机选线装置动作原理. 电力情报, 1994, (2): 7~11.
- [9] 檀国彪, 等. 基于最大  $I_{sin}$  (或  $I_{sin}$ ) 原理的微机选线装置. 中国电力, 1995, 28(7): 16~20, 72.
- [10] 张立华, 徐文立. 小接地电流系统单相接地故障选线的一种算法. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(9): 75~76, 81.
- [11] 王建隼. 基于小波变换的电力系统暂态信号分析方法研究. 哈尔滨工业大学. 博士学位论文, 1999: 1~59.
- [12] 毛鹏, 等. 小波包在配电网单相接地故障选线中的应用. 电网技术, 2000, 24(6): 9~13, 17.
- [13] 葛耀中. 小波变换与继电保护技术. 继电器, 1998, 26(4): 1~6.
- [14] 操丰梅, 苏沛浦. 小波变换在配电网自动化接地故障检测中的应用研究. 电力系统自动化, 1999, 23(13): 33~36.
- [15] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995: 1~89.
- [16] 袁进伶, 张涛. 5~66kV 电力系统电容电流自动跟踪补偿及接地选线装置原理及应用. 中国电力, 1998, 31(1): 67~68.
- [17] 何奔腾, 胡为进. 能量法小电流接地选线原理. 浙江大学学报(自然科学版), 1998, 32(4): 451~456.
- [18] 郝玉山, 等. 应用模糊推理的一种小电流接地保护原理. 电力情报, 1994, (2): 4~7.
- [19] 刘宇, 等. 小电流接地系统单相接地选线的两种新思路. 继电器, 1998, 26(4): 25~28.
- [20] 曾祥君, 等. 适应配电自动化的馈线接地保护研究. 电力系统自动化, 2000, 24(15): 37~41.
- [21] 王慧, 等. "S 注入法"与选线定位. 电力自动化设备, 1999, 19(3): 18~20.
- [22] 曾祥君, 等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 29~32, 36.

收稿日期: 2000-10-12; 改回日期: 2000-11-07

基金项目: 云南省科学与技术学术带头人培养经费、云南省应用基础研究基金(98E163M)和云南省教委科学研究基金(149912024)资助。

作者简介: 肖白(1973-), 男, 硕士生, 研究小接地电流系统故障隔离和定位; 束洪春(1961-), 男, 西安交通大学电工站出站博士后, 教授, 研究电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波。

### Survey of the methods of fault line selection for single-phase-to-earth fault in networks with ungrounded neutral

XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** Networks with ungrounded neutral are widely used in power distribution system in China, and the single phase to earth fault happens most frequently in distribution, thus how to detect the fault line quickly and accurately is an important subject in electronic power system protective relaying. Firstly, this paper reviews the development history of the methods of fault line selection for single phase to earth fault in networks with ungrounded neutral in China and other countries. Secondly, it summarizes all the existing theories on the fault line selection systematically. Finally, it presents problems which should be solved in fault line selection and conclusions.

**Keywords:** networks with ungrounded neutral; fault line selection; protective relaying; arc suppressing coils; electro-magnetic transients

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告