

小电流接地系统故障选线方法综述

郭清滔¹, 吴田²

(1.福建省电力试验研究院, 福建 福州 350007; 2.武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在我国 3~66 kV 配电网中, 广泛采用非直接接地系统, 也就是小电流接地系统。而此类系统发生最多的是单相接地故障, 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。回顾了小电流接地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法做了系统归纳和比较, 提出尚需要解决的问题, 并给出了几点结论。

关键词: 小电流接地系统; 故障选线; 稳态算法; 暂态算法; 小波变换; 人工智能

Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system

GUO Qing-tao¹, WU Tian²

(1.Fujian Electric Power Test & Research Institute, Fuzhou 350007, China; 2.Department of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Neutral point ineffectively grounded power system is widely used in 3~66 kV power distribution system in China. In this power system, the single-phase-to-earth fault occurs frequently in distribution, thus how to detect the fault line with great accuracy and high efficiency is an important subject in protective relaying of power system. Reviewing the history of the methods to select the fault line in neutral point ineffectively grounded power system, this paper summarizes the existing theories of fault line selection and gives the conclusions.

Key words: neutral piont ineffectively grounded power system; fault line selection; steady state algorithm; transient state algorithm; wavelet transformation; artificial intelligence

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)02-0146-07

0 引言

我国3~66 kV中压电网的中性点一般采用不接地或经消弧线圈接地方式, 当发生单相接地故障时流过故障点的电流很小, 所以称为小电流接地电网^[1]。小电流接地系统发生单相接地故障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, 长时间运行易使故障发展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, 危害系统安全运行, 所以必须及时找到故障线路予以切除。单相接地故障占小电流接地系统故障的80%以上, 且此时稳态接地电流的幅值较小, 谐振接地系统更是如此, 所以给故障选线增加了不小的难度。单相接地故障的故障线路可靠识别一直没有得到圆满解决, 国内外学者对此做了大量工作, 已经研究出的选线原理主要可以分成两大类: 基于稳态信号的故障选线原理和基于暂态信号的故障选

线原理, 两者都是基于电流零序分量的各种参数(电流的大小、相位、功率等)。

随着选线理论的发展, 各种选线装置也相继问世, 20世纪50年代末我国就利用接地故障暂态过程研制成功了接地故障选线装置, 20世纪80年代中期我国又研制成功了微机接地选线装置, 最近又增添了各种基于暂态相位法的微机接地选线装置, 到目前为止, 基于上述不同选线理论已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。以下较为全面地分析了现有的小电流接地故障的选线原理和算法。

1 小电流接地系统故障信号特征分析

1.1 小电流接地系统故障稳态信号特征分析

小电流接地系统中的中性点不接地系统发生单相接地故障时, 假设线路电阻为零、负荷电流在线路上没有压降、则故障相电压为0, 非故障相电压升高为 $\sqrt{3}$ 倍, 每条线路的三相对地电容相等, 分别为 C_{01} 和 C_{02} ; 母线及背后电源对地电容为 C_{0S} 。

当线路 II 的 A 相发生金属性接地故障时, 系统稳态的电容电流分布和零序等效网络分别如图 1 和图 2 所示。由图 1 和图 2 可以看出, 小电流接地故障的稳态电气量还具有以下特征^[2]:

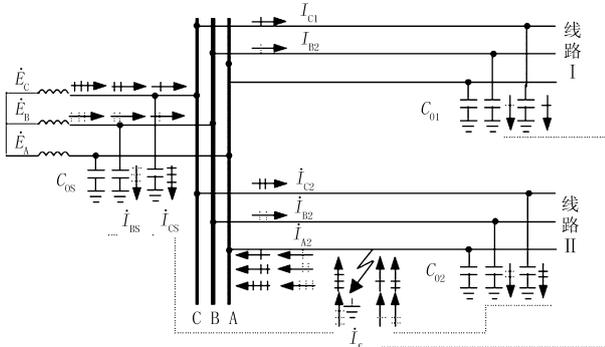


图 1 单相接地时电容电流分布图

Fig.1 Capacitance current scatter diagram of single phase earthing

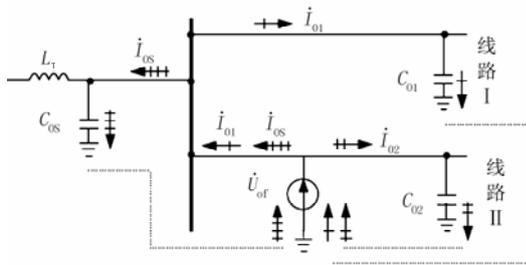


图 2 单相接地故障零序等效网络

Fig.2 Zero-sequence equivalent network of one-phase ground fault

① 流过故障点的电流数值是正常运行状态下电网三相对地电容电流的代数和;② 母线处非故障相线路零序电流为线路本身的对地电容电流, 其方向由母线流向线路, 零序无功功率由母线流向线路;③ 母线处故障相中故障线路的零序电流为电网所有非故障元件对地电容电流的总和, 其方向由线路流向母线, 与非故障线路相反, 零序无功功率由线路流向母线。

对于谐振接地电网单相接地故障, 系统容性电流的分布与不接地电网单相接地故障分布是一样的, 不同的是在系统的中性点, 通过消弧线圈向接地点注入一个感性电流来抵消接地点的容性电流。根据补偿程度的不同可分为全补偿、欠补偿和过补偿, 在电力系统中一般是过补偿, 过补偿度在 5%~8%。当采用过补偿方式时, 流过故障点的电感电流大于电网电容电流, 补偿后的残余电流呈感性。这时, 母线处故障线路的零序电流是本身对地电容电流与接地点残余电流之和, 其方向是由母线流向线

路, 与非故障线路零序电流的方向一致, 因此难以根据电流方向来判别故障线路。由于过补偿度不大, 残余电流比较小, 故障线路零序电流的幅值较中性点不接地情况大为减少, 甚至会小于非故障线路的零序电流, 所以很难根据零序电流幅值来判别故障线路。

1.2 小电流接地系统故障暂态信号特征分析

小电流接地系统发生单相接地故障时, 会发生很强烈的振荡过程, 这些丰富的暂态信号幅值大、频谱范围广, 为识别接地线路提供了丰富的信息, 所以如何有效地提取故障特征分量是进行暂态分析的目的。

在一般情况下, 电网绝缘击穿接地是在相电压最大时发生的, 此时可以将暂态电容电流看成是两个电容电流之和^[2]: ① 由于故障相电压突然降低而引起的放电电容电流, 电流由母线流向故障点, 放电衰减很快, 其振荡频率高达数千赫兹, 振荡的频率主要决定于线路的参数、故障点的位置及过渡电阻的大小。② 由于非故障相电压升高而引起的充电电容电流, 此电流通过电源形成回路。由于整个回路的电感较大, 因此充电电流衰减较缓慢, 振荡也低, 仅为数百赫兹。

中性点经消弧线圈接地的电网, 由于暂态电感电流的最大值出现在相电压过零瞬间, 而当故障发生在相电压接近最大值瞬间时, 电感电流几乎为 0, 因此暂态电容电流较暂态电感电流大很多, 所以在同一电网中, 不论中性点是绝缘还是经消弧线圈接地, 相电压接近最大值发生故障瞬间, 其过渡过程是相似的。

综上所述, 利用暂态信号幅值的特点作为选线判据, 存在一点不足, 对于相电压不是接近最大值时发生的故障有可能发生误判。

2 小电流接地系统故障检测算法

2.1 小电流接地故障稳态算法

在电力系统发展初期, 中性点采用直接接地(大电流接地系统), 相应的继电保护装置一般根据稳态电流来整定。随着电力系统规模的增大和用户对供电要求的提高, 我国的一些配电网开始采用小电流接地系统, 针对单相接地故障, 人们也习惯从稳态量方面去考虑并根据这些稳态量, 特别是根据零序分量的相关特性来提出了一系列的算法并开发出了相应的小电流接地故障选线装置。

2.1.1 零序电流幅值比较法

零序电流幅值比较法简称幅值法^[3], 它利用故障线路零序电流幅值比非故障线路大的特点选择故

障线路。以前的做法是使用电流继电器，电流继电器在零序电流超过整定值时动作，指示故障线路，继电器的整定值要躲过本线路可能出现的最大对地电容电流。现在使用比较多的是群体比幅法，应用微机技术采集并比较接地母线上所有出线零序电流，将幅值最大的线路选为故障线路。由于不需设定门槛值，群体比幅法提高了检测可靠性和灵敏度，但在母线故障时会出现误判断。幅值法的致命问题是不适用于谐振接地电网。由于该电网中消弧线圈补偿电流的存在，往往使故障线路电流幅值小于非故障线路；另外一个影响可靠性的因素是故障点电弧不稳定现象，小电流接地故障往往伴有间歇性拉弧现象，由于没有一个稳定的接地电流，因此可能造成选线失败。一些装置在实验室模拟试验，甚至在现场进行人工接地试验时选线结果很准确，但实际应用效果却并不好，这是因为模拟试验时线路导体与地之间是金属性接触，与实际运行中的绝缘击穿现象并不完全相同。

2.1.2 零序电流方向法

零序电流方向法简称方向法或相位法，它利用故障线路零序电流与非故障线路方向相反的特点选择故障线路。一种实现方法是检测零序功率方向，如果某线路的零序无功功率方向为正，即零序电压超前零序电流 90° ，则说明零序电容电流的方向是由线路流向母线，该线路被选为故障线路；另一种方法是群体比相法^[4]，选择3个以上幅值最大的线路零序电流，比较它们之间的相位，相位与其他线路相反的线路被选为故障线路。与幅值法相比，方向法有较高的检测灵敏度，但仍然存在不适用于谐振接地电网的缺点。因为在过补偿或完全补偿状态下，故障线路零序电流的方向与非故障线路相同；对间歇性接地故障来说，零序电流波形畸变严重，难以计算其相位，方向法比幅值法更容易出现误判断^[5]。

2.1.3 谐波法

由于故障点、消弧线圈、变压器等电气设备的非线性影响，故障电流中存在着谐波信号，其中以5次谐波分量为主，并且消弧线圈对5次谐波的补偿作用仅相当于工频时的1/25，可以忽略其影响。因此，故障线路的5次谐波零序电流的幅值比非故障线路的都大且方向相反，据此可以选择故障线路，称为5次谐波法^[6]。为了进一步提高灵敏度，可将各线路的3、5、7次等谐波分量的平方和后进行幅值比较，幅值最大的线路选为故障线路。谐波法优点是可以克服消弧线圈的影响，但实际应用效果并不理想。主要原因是故障电流中的5次谐波含量较小(小于10%)，检测灵敏度低；多次谐波平方和法虽然能在

一定程度上克服单次谐波信号小的缺点，但不能从根本上解决问题。

2.1.4 零序电流有功分量法

零序电流有功分量^[7-8]是根据线路存在对地电导以及消弧线圈存在电阻损耗，故障电流中含有有功分量，非故障线路和消弧线圈的有功电流方向相同且都经过故障点返回，因此，故障线路有功分量比非故障线路大且方向相反。根据这一特点，可选出故障线路。在设计具体的选线装置时，可利用零序电压与零序电流计算并比较各线路零序有功功率的大小与方向来确定故障线路。有功分量法的优点是不受消弧线圈的影响，但由于故障电流中有功分量非常小并且受线路三相参数不平衡的影响，检测灵敏度低，可靠性得不到保障。为了提高灵敏度，有的装置采用瞬时消弧线圈上并联接地电阻的做法加大故障电流中有功分量。这样做带来的问题是使接地电流增大，加大对故障点绝缘的破坏，很可能导致事故扩大，且对电缆线路来说，这一问题更为突出。

2.1.5 负序电流法

因为小电流接地故障的负序电流具有与零序电流相同的分布特征，所以负序电流法^[9]也可以通过比较各线路负序电流的大小与方向选择故障线路。由于负序电源阻抗比较小，故障线路负序电流绝大部分流入了电源回路，使得非故障线路的负序电流比较小，有利于接地选线。但正常运行时线路中也会存在较大的负序电流，并且负序电流的获取远不如零序电流来得简单、准确，所以负序电流法的实际应用效果并不比零序电流法好。

2.1.6 零序导纳法

小电流接地系统的零序网络可以等效为一空载均匀传输线，一般可以忽略线路的阻抗，零序电流主要为对地电容电流和电导泄漏电流。零序导纳法^[10-11]通过在馈线端口测量零序电流与电压来获得故障时各条线路的零序导纳，根据故障相线路的零序导纳分布在直角坐标系的第二和第三象限、正常相的零序导纳分布在第一象限的这一特点来选择故障线路，该算法具有较好的准确性和适应性，但是对于间歇瞬时性接地故障几乎失效。

2.1.7 注入信号寻迹法

注入信号寻迹法简称注入法，在发生接地故障后，通过三相电压互感器(PT)的中性点向接地线路注入特定频率(225 Hz)的电流信号，注入信号会沿着故障线路经接地点注入大地，用信号探测器检测每一条线路，有注入信号流过的线路被选为故障线路。该方法的优点是不受消弧线圈的影响，不要求

装设零序电流互感器(CT), 并且用探测器沿故障线路探测还可以确定架空线路故障点的位置。其缺点是需要安装信号注入设备。对于谐振接地电网来说, 注入法选线正确率远高于前面介绍的几种方法, 但从实际运行结果来看, 还有相当一部分故障情况下不能正确选线, 主要原因是信号注入能量受PT的限制, 不能太高; 在接地电阻较大时, 健康线路分布电容会对注入信号分流, 干扰正确选线。对间歇性接地来说, 注入的信号变化不连续, 影响正确选线。

2.2 小电流接地故障暂态算法

小电流接地系统中稳态电流幅值小, 易受到接地电阻、电弧和电流互感器不平衡电流的影响, 其灵敏度低, 所以选线的效果并不好。然而小电流接地故障暂态电流幅值是稳态对地电容电流的几倍到十几倍, 数值在数十A到数百A之间, 并且不受消弧线圈影响。因此, 利用暂态信号进行接地选线可以克服稳态选线法存在灵敏度低, 受消弧线圈影响的缺点。暂态保护技术的实施关键是接地电容电流的暂态特征分量的提取和暂态保护判据的建立, 而暂态量的成分和大小都受到系统的运行方式、故障类型、故障时刻等因素的影响^[12], 由于暂态过程短, 且受线路结构、参数及故障条件的影响, 暂态量算法还有待实践检验。

20世纪70年代以来, 微机继电保护技术在电力系统中应用越来越广泛。借助现代微电子技术, 可以很方便地实现接地故障暂态信号的高速采集、记录及分析, 利用暂态信号的接地选线技术取得了重大进展。下面介绍几种比较新的利用暂态信号的选线方法。

2.2.1 暂态零序能量法

暂态零序能量法^[13]对故障后各线路零模瞬时功率进行积分, 得到零模能量函数。故障线路的能量函数幅值最大, 极性为负, 与非故障线路的相反, 据此可选择接地线路。暂态能量法实质上是零模有功功率法在暂态信号上的应用。由于暂态电流中有功分量所占的比例比较小, 因此暂态能量法对暂态信号的利用不充分, 检测灵敏度低。

2.2.2 暂态零序相位法

暂态零序相位法就是根据故障时, 故障相的暂态零序电流与非故障相的电流相位相反来判断故障线路。文献[14]提出的首半波法实际就是利用接地故障基波暂态电流与暂态电压首半波相位相反的特征来判断故障, 该算法对于电弧性接地和接地时的相位信息非常敏感, 在实际应用中抗干扰能力不强。文献[14-16]通过分析暂态谐波在一定频段即选频带(SFB)内的相频特性: 故障相暂态零序电流的相

位与非故障的相位相反。利用小波分析这部分谐波的相位关系, 通过各个谐波的相频特性来判断故障线路, 最后综合可以得出故障线路。该算法通过不同频段的相位信息采用计数累加的方式判断故障线路, 理论上很完美, 抗干扰能力不强是此类方法的本质不足, 特别是对于瞬时性接地故障容易引起误判。

2.3 基于现代信号处理技术的故障选线算法

小电流接地故障选线是一种利用弱信号做出辨识的技术。仅利用传统的电流幅值大小与相位相反等信息的常规方法难以取得令人满意的结果, 所以研究者开始把现代信号处理技术应用于这一难题的分析。像小波变换、神经网络、模糊控制等理论用来对故障信号进行分析与处理。理论分析与仿真的结果尚可受到认可, 但离实际应用还有一段距离, 最终投入实际应用还有许多的工作要做。

2.3.1 基于小波变换的选线技术

由于小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部化性质和多分辨率特性, 特别适用于分析奇异信号, 可以在不同频域考察信号时域与频域特征。基于小波变换的选线技术^[15,17-20]通过小波变换对接地故障信号进行分析, 提取故障零序电流波形的幅值和相位信息。一般都是利用小波分析接地故障暂态信号, 根据暂态过程中谐波的相位相反和幅值最大等关系做出选线。小波分析对奇异很敏感既是优点也是缺点, 选线的结果容易受干扰信号的影响。所以文献^[20-21]采用了与维纳滤波技术相结合的故障选线技术。

2.3.2 基于人工智能的选线技术

神经网络和模糊理论是人工智能技术中比较成熟的技术, 神经网络可以根据电气量与故障间的映射做出判断^[22-23]。而模糊控制则根据输入信号利用一些常规的判据得到选线结果, 根据模糊理论得到隶属函数, 最后对选线结果信息做出融合得到最后选线结果^[24-25]。这些方法虽充分利用了现代人工智能方面的技术, 但仅在信号处理层次上做出了努力, 没有深入分析信号的本质特征, 实际应用效果还有待检验。

3 技术路线

目前的多种选线方法都只利用了接地故障信号中的很少一部分, 由于小电流接地故障情况复杂且信号微弱, 如果信号包含的故障特征不明显, 任何选线方法都有失效的可能。更为关键的是在小电流接地故障发生后, 带故障运行的1~2 h内, 故障信号不是一成不变的, 有些时段信号反映了故障特征

适于选线,有些时段信号受到干扰不利于选线^[26]。所以对于小电流接地故障,应主要从三个方面加强研究:①深入研究单相接地故障产生的原因、发展过程、以及各种环境因素的影响。例如,由风吹等自然因素造成的短时接地故障。②暂态算法与稳态算法的选取与融合以及对上述各种状况应该如何处理应进一步给予考虑。③仿真与模拟试验应考虑故障的随机与多变的特性,通过对实际运行环境的模拟来检验算法的可靠性与准确度。

3.1 接地故障过程中电弧现象的建模与分析

在发生单相接地故障时,一般伴随着瞬态电弧接地和电弧不稳定现象,电弧是随着故障的发生而随机发生的,并且电弧不稳定,熄灭与重燃是一个反复的过程。当发生单相接地故障时故障点的接地电阻不是固定的并且在故障期间接地点的故障信号不是一成不变的,甚至故障有可能已经消失,这也是当前选线装置在开发时没有考虑到的,所以在选取算法时,应尽量提高算法的容错性和抗干扰能力。所以结合电弧的特性建立相应的电弧随机特性模型,通过电弧模型测试与训练接地故障检测算法,为算法的优化提供了良好的仿真测试手段。

3.2 基于人工智能的暂态与稳态选线算法融合

稳态选线算法和暂态选线算法已经有几十年的实际工程应用,并且在某些具体的应用系统中获得了比较理想的工程实践应用价值,这些算法的适用范围都是一定,因为单一的或几个判据的组合不能完全保证对所有的类型的接地故障做出准确的判断,基于小波技术的暂态故障信息提取技术可以提取暂态过程中丰富的频谱信息,可以提高接地故障检测的灵敏度,但是对于那些干扰性负荷的启动容易造成误判,所以可以利用稳态故障检测算法提高算法的抗干扰能力,可以人工智能技术实现稳态与暂态选线判据的融合,例如神经网络实现故障的识别、判断和综合;利用模糊理论对稳态判据和暂态判据的权重进行综合。

3.3 实时动态仿真测试与故障模拟测试

利用搭建的电弧仿真模型,把电弧模型综合到RTDS上搭建的仿真模型中,考虑故障的随机与多变的特性,对样机进行测试,通过对实际运行环境的模拟来检验算法的可靠性与准确度。

4 结论

综上所述,可以得到以下结论:

(1) 幅值法和方向法均受到间歇性电弧故障的影响,对谐振接地电网系统效果都不是很理想,谐波法和有功分量法在原理上皆可以克服消弧线圈的

影响,但是实际应用效果并不理想,主要是受到5次谐波含量较小等因素的制约,而有功分量法检测灵敏度低,可靠性差,通过加大故障电流有功分量的做法,可能导致事故扩大的风险;负序电流法和零序导纳法实际应用效果均不佳。

(2) 暂态算法虽然可以克服稳态选线法存在灵敏度低,受消弧线圈影响的缺点,但受到系统的运行方式、故障类型、故障时刻等因素的影响较大,使得存在暂态信号提取利用不充分、抗干扰能力差等缺点。

(3) 基于现代信号处理技术的小波变换和人工智能等选线技术在理论上能够明显提高选线精度,加上融合了现代数学处理方法,使得具有不错的应用前景,但实际效果还有待检验。

(4) 小电流接地故障,应主要从三个方面加强研究:① 深入研究单相接地故障产生的原因、发展过程、以及各种环境因素的影响。② 暂态算法与稳态算法的选取与融合以及对上述各种状况应该如何处理应进一步给与考虑。③ 仿真与模拟试验应考虑故障的随机与多变的特性,通过对实际运行环境的模拟来检验算法的可靠性与准确度。

参考文献

[1] 中国电机工程学会自动化专委会配电自动化分专委会秘书组. 配电自动化专委会学术讨论中关注的问题[J]. 电网技术, 1999, 23(1): 68-69.
Secretariat of DA Distribution Automation of Branch of Special Committee of Automation of Chinese Electrical Engineering Society. Some Concerned Problems Annoyed by DA Distribution Automation Special Committee[J]. Power System Technology, 1999, 23(1): 68-69.

[2] 李福寿. 中性点非直接接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器, 2004, 32(18): 74-78.
LI Fu-shou. Review of Line Selection of One Phase Grounding Fault in Indirect Earth Neutral System[J]. Relay, 2004, 32(18): 74-78.

[3] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Principle of Power System Protective Relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

[4] 桑在中, 潘贞存, 李磊, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线和定位的新技术[J]. 电网技术, 1998, 22(10).
SANG Zai-zhong, PAN Zhen-cun, LI Lei, et al. A New Approach of Fault Line Identification and Fault Location for Single Phase-to-ground Fault in Small Current Neutral Grounding System[J]. Power System

- Technology,1998, 21(10).
- [5] 徐丙垠, 薛永端, 李天友. 小电流接地故障选线技术综述[J]. 电力设备, 2005, 6 (4) : 1-7.
XU Bing-yin, XUE Yong-duan, LI Tian-you. Review of Line Selection of Grounding Fault in Non-Effectively Grounding Network Techniques [J]. Electrical Equipment, 2005, 6 (4) : 1-7.
- [6] 陈志亮, 范春菊. 基于5次谐波突变量的小电流接地系统选线[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18 (5) : 37-41, 69.
CHEN Zhi-liang, FAN Chun-ju. Fault Line Selection for Small Current Neutral Grounding System based on the Fifth Harmonic Current Mutation in Distribution System[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(5) : 37-41, 69.
- [7] 杨汉生, 赵斌, 姚晴林, 等. 基于零序功率的小电流选线方法[J]. 继电器, 2002, 30 (11) : 30-32.
YANG Han-sheng, ZHAO Bin, YAO Qing-lin, et al. A New Method of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral Based on Zero Sequence Power[J]. Relay, 2002, 30 (11) : 30-32.
- [8] 杜丁香, 徐玉琴. 消弧线圈接地电网的有功选线[J]. 继电器, 2002, 30 (5) : 33-36.
DU Ding-xiang, XU Yu-qin. Faulted Line Detecting with Active Power in an Auto-compensated Distribution Network[J]. Relay, 2002, 30 (5) : 33-36.
- [9] 曾祥君, 尹项根, 张哲. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (6) : 84-89.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe. Study for Negative Sequence Current Distributing and Ground Fault Protection in Middle Voltage Power Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (6) : 84-89.
- [10] 曾祥君, 尹项根, 张哲. 零序导纳馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (4) : 5-10.
- [11] 林湘宁, 高艳, 刘沛, 等. 基于零序补偿导纳的小电流接地系统单相故障保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (10) : 45-49.
LIN Xiang-ning, GAO Yan, LIU Pei, et al. A Novel Method to Identify the Single Phase-to-earth Fault in the Neutral Un-effectual Grounded System Using the Zero-sequence Compensated Admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (10) : 45-49.
- [12] 贾清泉, 刘连光, 杨以涵, 等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (10) : 78-82.
JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al. Abrupt Change Detection with Wavelet for Small Current Fault Relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (10) : 78-82.
- [13] 朱丹, 蔡旭. 小电流接地电网改进能量法接地选线原理[J]. 继电器, 2004, 32 (10) : 44-48.
ZHU Dan, CAI Xu. Improved Energy Function to Detect the Grounded Line in Neutral Point Indirectly Grounded Network[J]. Relay, 2004, 32 (10) : 44-48.
- [14] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠, 等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (9) : 48-53.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin, et al. Earth Fault Protection in Non-solidly Earthed Network Based on Transient Zero Sequence Current Comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (9) : 48-53.
- [15] 邢亚辉, 吕艳萍, 张承学, 等. 基于暂态电流极性的的小电流接地系统故障选线装置[J]. 武汉大学学报工学版, 2005, 39 (5) : 105-109.
XING Ya-hui, Lü Yan-ping, ZHANG Cheng-xue, et al. Study on an Equipment to Select Faulty Line in a Non-solid Earthed Network based on Polarity of Transient Current[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 39 (5) : 105-109.
- [16] 胡佐, 李欣然, 石吉银. 基于残流与首半波综合的接地选线方法研究[J]. 继电器, 2006, 34 (7) : 6-9.
HU Zuo, LI XIN-ran, SHI Ji-yin. Analysis of Earth Fault Selection Based Residual Current and Current Angle Integration[J]. Relay, 2006, 34 (7) : 6-9.
- [17] 苏战涛, 吕艳萍. 一种基于小波包分析的小电流接地电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (12) : 30-33.
SU Zhan-tao, Lü Yan-ping. A New Wavelet Packet Analysis Based Method to Detect Faulty Line for Single Phase to Ground Fault Occurred in Distribution Network with Small Current Neutral Grounding[J]. Power System Technology, 2004, 28 (12) : 30-33.
- [18] 葛耀中. 小波变换与继电保护技术[J]. 继电器, 1998, 26 (4) : 1-6.
GE Yao-zhong. Wavelet Transform and Protective Relaying Technology[J]. Relay, 1998, 26 (4) : 1-6.
- [19] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6) : 54-58.
WANG Yao-nan, HUO Bai-lin, WANG Hui, et al. A New Criterion for Earth Fault Line Selection based on Wavelet Packets in Small Current Neutral Grounding System[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6) : 54-58.
- [20] Chaari O, Menuier M, Brouaye F. Wavelet: A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution System Relaying [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (3) : 1301-1308.
- [21] 齐郑, 杨以涵, 张宏宇. 基于小波变换和维纳滤波技术的小电流接地系统单相接地故障选线研究[J]. 电网技术, 2004, 28 (13) : 23-26.
QI Zheng, YANG Yi-han, LIN Rong. Study on Faulty

Line Detection of Single Phase to Ground Fault in Mall Current Neutral Grounding System based on Wavelet Transform and Wiener Filter Technology[J].Power System Technology, 2004, 28 (13) : 23-26.

[22] 朱大萌, 孙宏军. BP 网络在小电流接地选线中的应用[J]. 电测与仪表, 2004, 41 (6) : 5-7.

ZHU Da-meng, SUN Hong-jun.The Application of BP Networks to Ground Fault Line Detection in Peterson-coil-grounding System[J].Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41 (6) : 5-7.

[23] 李荣明, 王官洁, 罗建. 基于神经网络的小电流接地系统综合智能选线[J]. 重庆大学学报自然科学版, 2004, 27 (5) : 85-89.

LI Rong-ming, WANG Guan-jie, LUO Jian. Comprehensive Intelligent Wire-selection of Neural-based Small Current Grounding System[J].Journal of Chongqing University,2004, 27 (5) : 85-89.

[24] 张兆宁, 郁惟镛. 基于小波包变换的模糊神经网络小电流接地系统故障选线[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36 (7) : 1012-1015.

ZHANG Zhao-ning, YU Wei-yong. Discrimination of Fault Line Based on Wavelet Packet and Fuzzy Neural Networks in Distribution Systems[J].Journal of Shanghai

Jiaotong University, 2002, 36 (7) : 1012-1015,

[25] 刘树杰, 陈辉, 许文. 模糊控制在配电网单相接地故障选线中的研究[J]. 山东冶金, 2005, 27 (3) : 44-45.

LIU Shu-jie, CHEN Hui, XU Wen.Study on Fuzzy Control of Fault Line Selection for Single Phase Grounding in Distribution Network[J].Shandong Metallurgy,2005, 27 (3) :44-45.

[26] 齐郑, 杨以涵, 任元恒, 等. 基于 D-S 证据理论的小电流接地故障连续选线方法[J].华北电力大学学报, 2005, 32 (3) : 1-4.

QI Zheng, YANG Yi-han, REN Yuan-huan, et al.Study on Continuous Line Selection for Small Current Earth Fault Based on D-S Evidence Theory[J].Journal of North China Electric Power University, 2005, 32 (3) : 1-4.

收稿日期: 2009-02-17; 修回日期: 2009-03-16

作者简介:

郭清滔 (1983-), 男, 硕士, 工程师, 从事高压方面的研究工作; E-mail:guoqingtao88@163.com

吴田 (1982-), 男, 博士, 从事高压及电工方面的研究。

(上接第127页 continued from page 127)

据运行单位反映说, 当2#变的低压侧断路器也投入运行时, 保护模拟采样会发现有一个0.2~0.3 A的差流。这种情况显然是在M、N两点接地情况下, 短路继电器的电流线圈, 使通过继电器电流线圈的电流大为减少。此时, $\sum i=i_1+K_{\text{中}} \times i_2+K_{\text{低}} \times i_3 \neq 0$, 故保护模拟采样会发现有不平衡电流存在。

3 分析的验证及结论

当两点接地问题处理后, 一切恢复正常。在上面的两种运行方式下进行检查发现

$$\sum i=i_1+K_{\text{中}} \times i_2+K_{\text{低}} \times i_3 < 0.045 \text{ A,}$$

差电流误差较小。因此, 10 kV侧差动B相电流回路存在两点接地现象是主变保护发生误动的主要原因。

4 反措建议

在电力系统中, 二次回路对保障系统安全运行起到非常重要的作用。系统正常运行情况下, 为了保证人身和设备的安全, 电力安全规程规定电流互感器二次回路的一个电气连接必须有一个可靠的接地点。同时为了保证继电保护和自动装置的正确工作, 要求电流回路一点接地。但是, 变电所电流二次回路连接设备繁多, 延伸范围广, 常常由于人为

的接线错误或一些不可避免的自然规律, 如绝缘的老化等, 出现在一个电气连接的二次回路中出现多点接地, 这样必然会影响继电保护的正常动作。建议运行单位对该所的全部电气接地进行检查, 避免类似的情况发生。

参考文献

[1] 王梅义. 电网继电保护应用[M].北京: 中国电力出版社, 1999.

[2] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型故障分析[M].北京: 中国电力出版社, 2000.

[3] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M].北京: 中国电力出版社, 1995.

[4] 贺家李. 电力系统继电保护原理 (增订版) [M].北京: 中国电力出版社, 2004.

收稿日期: 2009-02-16; 修回日期: 2009-04-24

作者简介:

郝建宏 (1971-), 女, 本科, 工程师, 从事电力系统继电保护产品设计、调试; E-mail:haojianhongwrx@sina.com

王光中 (1971-), 男, 本科, 讲师, 从事电工电子、电力系统等专业教学;

姬希军 (1970-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统继电保护产品设计、调试及应用。