

小电流接地系统单相接地选线技术综述

程路¹, 陈乔夫²

- (1. 国网北京经济技术研究院, 北京市 宣武区 100761;
2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

A Survey on Faulty Line Selection Technology for Single-Phase Grounded Transmission Line in Small Current Neutral Grounded System

CHENG Lu¹, CHEN Qiao-fu²

- (1. State Power Economic Research Institute, Xuanwu District, Beijing 100761, China; 2. College of Electrical and Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Small current neutral grounding systems is widely applied to medium-voltage power network in China, however the faulty line selection of single-phase grounded transmission line in medium-voltage power network is still not well solved. According to such a situation and combining theoretical analysis and simulation research with reports published in literature, existing faulty line selection technologies are generalized, and working principles, application conditions and existing defects of these technologies are analyzed, meanwhile the feasible improvement of these technologies and the up-to-date research achievements in this field are summarized. Finally, the development trend of faulty line selection technology for small-current neutral grounding system is pointed out.

KEY WORDS: small current neutral grounded system; faulty line selection; arc-suppression coil; distribution networks; protective relaying

摘要:我国中压电网普遍采用小电流接地系统,该系统的单相接地故障选线问题一直没有得到很好的解决。该文针对这一现状,结合理论分析、仿真研究和文献报导,对现有的接地选线技术进行了归纳,分析了这些选线方法的原理、应用条件及存在的问题,总结了这些方法可行的改进方案和最新的研究成果。最后指出了小电流接地选线技术的发展方向。

关键词:小电流接地系统;故障选线;消弧线圈;配电网;继电保护

0 引言

我国6~66kV中压电网普遍采用中性点非有效接地方式,具体包括3种:中性点不接地系统(neutral ungrounded system, NUS);中性点经消弧线圈接地,

即谐振接地系统(neutral resonant-grounded system, NES);中性点经电阻接地系统(neutral resistor-grounded system, NRS)。上述3者称为小电流接地系统,其优点在于接地电流小,瞬时接地可以不引起开关跳闸,供电可靠性高。但是发生永久性接地故障时,为了防止因非故障相电压升高、绝缘损坏而导致故障扩大,必须快速准确地选出故障线路并予以切除。

小电流接地系统,特别是谐振接地系统故障信号小,不易辨别,给继电保护和故障选线带来了很大的困难。因此小电流接地选线一直是配电自动化领域的研究热点^[1]。本文将在介绍国内外接地选线研究现状的基础上,总结目前广泛采用的选线方法,并分析它们的原理、应用条件和优缺点;对于最新的研究成果和改进措施,给予重点关注;最后指出选线技术的未来发展方向。

1 国内外研究现状

在前苏联国家,中性点非有效接地方式得到了广泛应用,其保护原理从过流、无功方向发展到了群体比幅;美国采用大电流接地,即中性点直接接地或经小电阻、小电抗接地方式,故障线路电流很大,基于零序电流无功分量、有功分量均可以实现快速选线。德国是中性点经消弧线圈接地方式的发源地,早在20世纪30年代就提出了基于接地故障暂态过程的保护原理,目前谐振接地方式占据主流,基于扰动原理的选线方法也开始应用。法国在使用NRS几十年后,现在正以NES取代NRS。法

国电力公司开发的 DESIR 保护装置采用有功分量法原理, 该装置针对线路不平衡问题, 采用了改进的基于零序电流变化量的选线方法, 对高阻接地具有很高的识别率^[2]。20 世纪 90 年代以来, 国外已将人工神经网络、专家系统等方法应用于接地选线保护。我国自 20 世纪 50 年代起就对此问题进行研究, 80 年代中期研制出微机型接地选线装置, 目前已有多种基于不同原理的选线装置在现场运行。

在大多数情况下, NUS 和 NRS 系统通过零序电流比幅比相法^[3]均可以准确地找出故障线路, 实际应用效果较好。但是对于 NES 系统, 由于消弧线圈电感的补偿作用, 故障线路零序电流的方向和大小已没有明显特征, 并且随着系统脱谐度的改变而变化。因此谐振接地系统的故障选线问题更复杂, 难度更大, 以下提到的选线方法主要针对谐振接地系统。

2 选线方法综述

2.1 5 次谐波法

由于 NES 系统电感值是针对基波频率设定的, 且基波电抗和电网对地基波总容抗近似相等。因此对于高次谐波而言, 电抗值远大于电网对地容抗值, 消弧线圈对于高次谐波电流的补偿作用很小, 对高次谐波回路可近似看做中性点不接地系统, 此时可以利用谐波电流比幅比相原理作为选线判据。配电网中 5 次谐波的含量最为丰富, 实际应用中多以 5 次谐波分量为选线依据^[4]。

5 次谐波法选线装置在我国应用较多, 但效果并不好, 主要有以下几点原因: 1) 电网中的谐波分量较之基波分量要小很多, 对于高阻接地或线路较短情况, 谐波分量的检测和提取更为困难; 2) 受接地过程中产生的谐波含量的影响较大, 灵敏度低。这些固有缺陷不易改善, 限制了其应用。

2.2 有功分量法及相关改进

实际 NES 系统中存在消弧线圈电阻、线路电导等有功分量, 而消弧线圈电感不能补偿有功分量, 接地线路中的零序电流有功分量仍然满足“幅值最大, 相位相反”的特征关系。

基于这一原理的选线方法有多种, 一种是检测中性点零序电压和各出线零序电流, 并将零序电流分解为与零序电压同相和正交的 2 个分量, 通过比较同相分量的幅值、相位进行选线。该方法在有功分量较小的情况下容易引起较大的误差, 因此有文献提出将消弧线圈与电阻串、并联的中性点接地方式^[5], 在永久性接地时短时投入电阻, 以增大零序

电流的有功分量, 可提高选线准确率。该方法的缺陷在于人为增大了接地点的电流, 易引起接地电弧重燃, 不能充分发挥谐振接地系统的优越性。

针对较小的零序电流相位分解困难且误差较大的问题, 有学者提出利用有功能量的判断方法^[6]。该方法直接以零序电压和零序电流的乘积积分计算有功能量, 以接地线路的有功能量的幅值最大, 且相位与非接地线路相反作为选线判据。该方法从原理上讲比第 1 种方法更为优越, 避免了对小信号的分解, 实现起来也更为简单。

利用零序电流有功分量选线可以利用幅值较大的零序基波电流, 对选线有利。实际运行中的主要问题在于^[7]: 当线路及消弧线圈的电阻较小时, 零序电流的有功分量较小, 检测装置精度不高则易造成误选; 另外对于利用三相电流互感器(TA)并联获得线路零序电流的系统, 该方法受三相电流互感器不平衡的影响较大。

2.3 零序导纳法及相关改进

零序导纳法^[8]的基本原理是: 在电网正常运行时, 每条馈线的零序导纳 \dot{Y}_0 为线路的自然导纳, 由线路的对地电容电纳 b 和泄漏电导 g 组成, 电导和电纳均为正数, 其表达式为(第 k 条馈线)

$$\dot{Y}_{0k} = g_k + jb_k \quad (1)$$

该线路单相接地时, 其零序测量导纳值 \dot{Y}'_0 变为消弧线圈零序导纳与非故障线路零序导纳之和的负数, 其表达式可简化为

$$\dot{Y}'_{0k} = -(g_L + \sum_{i=1, i \neq k}^n g_i) - j(\nu \sum_{i=1}^n b_i - b_k) \quad (2)$$

式中: ν 为系统脱谐度^[8]; n 为电网馈线数; g_L 为消弧线圈电导。对比式(1)(2)可以看出, 不论补偿脱谐度($\nu > 0, \nu < 0, \nu = 0$)如何, 接地前后零序导纳的电导部分符号均发生了变化, 因此可以通过零序导纳数值在导纳平面上的分布判断是否发生接地故障: 正常线路的零序导纳在第 1 象限, 故障线路的零序导纳在 2、3 象限, 如图 1 所示。

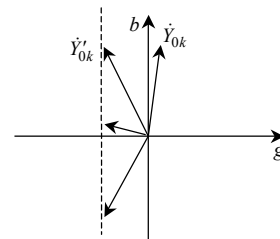


图 1 零序导纳分布图

Fig. 1 Distribution map of zero sequence admittance

判断电导符号的实质就是判断有功方向,因此可以认为零序导纳法是有功分量法的一种扩展。其改进之处在于,零序导纳法还利用了消弧线圈脱谐度的不同引起的线路电纳变化,而线路电纳的数量级通常远大于电导的数量级,这样判断会更灵敏。

由式(2)可知,在谐振补偿的情况下(即 $\nu=0$)时,线路故障前后的零序导纳值的电纳部分没有改变,仅零序电导改变。由于线路的零序电导相对电纳很小,因此零序导纳角所在的区间很可能偏向正虚轴,接近正常线路零序导纳分布的第1象限,容易引起误判。针对此问题,文献[9]提出了“零序补偿导纳”的概念,其方法是预先测量或计算每条线路的电纳,计为基准值 \dot{Y}_{set} ,然后将线路测量导纳 \dot{Y}_{meas} 与其相减,定义为补偿导纳 \dot{Y}_{comp} ,即

$$\dot{Y}_{\text{comp}} = \dot{Y}_{\text{meas}} - \dot{Y}_{\text{set}} \quad (3)$$

如果线路的电纳值测量或计算准确,那么对于正常线路其补偿导纳值只有一个正的电导分量,在导纳平面上位于正实轴上。对于故障线路,结合式(2),其补偿导纳值 \dot{Y}'_{comp} 为

$$\dot{Y}'_{\text{comp}} = \dot{Y}_{\text{meas}} - \dot{Y}_{\text{set}} = -(g_L + \sum_{i=1}^n g_i) - j(\nu \sum_{i=1}^n b_i) \quad (4)$$

对于 $\nu=0$ 情况, \dot{Y}'_{comp} 为一负实数,零序补偿导纳位于负实轴上。对比正常线路的正实轴分布,这样处理相当于增大了正常线路和故障线路判断区间的相角裕度。然而实际中精确测量线路的基准电纳值较为困难,补偿导纳可能存在较大的误差。在 $\nu=0$ 附近,正常线路和故障线路的补偿导纳均有可能偏向导纳平面的正虚轴,造成误判。

实际应用中,可以将零序导纳法的基本原理与微机保护结合,通过微机采样、检测、并实时计算系统每条出线的零序导纳值,如果某条线路的零序导纳值发生显著变化,则判定为故障线路。法国电力公司(EDF)开发的DDA保护装置就是这样实现的,具有很高的灵敏度;同时依靠被测信号的差值进行判断,可去除TA测量误差影响,有效提高了选线准确率^[10]。

2.4 基于扰动原理的选线方法

基于扰动原理的选线方式是配合自动跟踪补偿消弧线圈的广泛应用而发展起来的接地选线新方法。其原理是发生单相接地故障后,微调消弧线圈的脱谐度 ν ,这样接地点的残流相应改变,故障线路的零序电流也随之改变^[11-12]。

该方法最开始的应用方式是比较各条出线的零序电流绝对值变化量,变化量最大的线路为故障线路。该判据在接地电阻较小、零序电压较高的情况下,判断较为准确。但是在接地过渡电阻较大的情况下,改变系统脱谐度时零序电压变化量也较大,导致非故障线路的零序电流绝对值变化明显,某些线路长、对地电容大的电缆馈线的零序电流变化量与故障线路在同一水平^[13],影响了选线结果的正确性。针对此问题一些文献提出了改进措施,一种是若调节前后零序电压发生变化,则将零序电流与零序电压进行折算,具体方法是:假设调节前线路 k 的零序电流和系统零序电压分别为 \dot{I}_{0k} 、 \dot{U}_0 ,调节后零序电流和零序电压分别为 \dot{I}'_{0k} 、 \dot{U}'_0 ,则经过折算的线路 k 零序电流变化量 $\Delta\dot{I}_{0k}$ 为

$$\Delta\dot{I}_{0k} = \dot{I}'_{0k} \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}'_0} - \dot{I}_{0k} \quad (5)$$

由式(5)可知,折算的实质是对线路零序导纳的计算。理论上正常线路 $\Delta\dot{I}_{0k}=0$,故障线路 $\Delta\dot{I}_{0k} \neq 0$,考虑测量及量化误差,实际应用中仍然可以按照“变化量最大”作为判据。

文献[13-14]提出一种线路 m 参数法接地故障选线原理,利用的是消弧线圈调节前后线路 m 参数的绝对值变化量,或者2条线路 m 参数比值的差别作为选线依据,其定义的线路 m 参数为

$$k = \left| \frac{U_A \dot{I}'_{0k}}{\dot{U}'_0} - \frac{U_A \dot{I}_{0k}}{\dot{U}_0} \right| \quad (6)$$

式中 U_A 取系统额定相电压,其他参数的意义与式(5)相同。由式(6)可见,该方法将线路导纳计算值折算处理(乘以 U_A),可以将较小的导纳数值成比例放大,避免了因测量、量化误差导致的故障线和健全线的导纳计算结果均接近0而造成误判。

基于扰动原理的选线方法通过调节电感改变系统脱谐度,以获得较大的故障线零序电流(零序导纳)变化量,以此构造明显的特征差异,应用效果较好^[11]。存在的问题是该方法仅适用于随调式消弧线圈,对预调式消弧线圈不可用,针对这一问题文献[15]提出了将一附加电抗器与消弧线圈串、并联投切以改变脱谐度的解决方法,但这也增加了接地系统的复杂度和控制难度。

2.5 注入信号法及相关改进

最早被提出的是S注入法^[16],其原理是通过电压互感器(TV)的二次侧接地相注入信号,该信号感应到系统一次侧,并通过接地点构成回路,可以在

配电网出线端检测注入信号的强弱判断故障线路。

基于该方法的选线装置在我国曾大量地投入现场运行，并对金属性接地和低阻接地取得了较好的选线效果，但是辨识高阻接地的能力较弱。原因在于：注入信号不仅可以通过接地点对地构成回路，还可以通过线路对地分布电容、中性点消弧线圈回流，如果接地电阻远大于电容容抗和消弧线圈感抗，那么大部分注入信号均被后两者分流，流入接地点的信号电流很小，并且故障线路的信号电流并不一定是最大值。

S注入法的提出者在文献[17]中提到了这些问题，并给出了3条改进意见：降低注入信号的频率、应用注入信号的相位信息和应用双频信号。其中降低注入信号的频率是提高耐受接地电阻能力的有效改进方案。但是仿真研究发现，若注入信号的频率过低，则电感的分流作用明显，虽然并不影响各条线路的信号电流相对值（仍然是等效对地阻抗最小的出线信号电流最大），但是绝对值过小会造成检测的困难，并带来较大的误差，影响判断的准确性。利用注入信号的相位信息实际上是结合信号电流的有功分量作为判据，不过也存在信号电流小，判断相位信息困难的问题。这些问题限制了S注入法对高阻接地的识别能力，仍有待进一步改善。

文献[18]提出另一种注入信号的接地故障辨识和选线方法。通过从中性点TV注入电网谐振频率信号，并测量零序信号电压，计算接地电阻，进行高阻接地故障辨识；通过测量各出线零序信号功角来计算线路阻尼率，进行故障选线。注入电网谐振频率信号的优点是：理论上电网的等效阻抗为纯阻性，仅需要判断电阻值的变化即可确定是否发生接地故障，并可以计算故障电阻大小。该方法存在的问题是：由于注入信号的电流幅值很小，检测该微弱信号对测量装置的精度有很高要求；另外根据文献[18]提出的判据，可识别的接地电阻较小，对于对地电容较大的电缆馈线尤其如此。

2.6 基于暂态信号的选线方法

最早出现的基于暂态信号的选线方法是首半波法，其原理是基于接地故障多数发生在相电压接近最大值处这一前提条件。发生接地后的第1个半周期内，故障线零序暂态电流和正常线零序暂态电流极性相反。但故障发生在相电压过零点附近时，首半波电流的暂态分量很小，加上过渡电阻的影响，易引起方向误判。

小波法利用近年来兴起的小波变换理论，提取故障暂态信号的特征量进行故障选线。小波变换具有时频聚焦特性，对于突变信号具有比傅里叶变换更好的分析效果。选用合适的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分量的幅值包络线高于非故障线路，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。合适的小波基函数和小波分解尺度的选取是该方法的重点和难点。

此外，还有的根据故障后暂态分量能量比较大的特点，先以“能量最大”的原则确定各条线路暂态电容电流分布最集中的特征频段，再利用“极性相反”等特征判据^[19-20]进行选线。还有文献介绍用Prony方法分析暂态信号进行选线的方法^[21]。

2.7 其他选线方法

文献[22]提出利用负序电流的通路特征来判断故障线路的方法，突破了以零序电流的分布及特征差异构造选线判据的传统方法。但是负序电流法相对零序电流法存在的最大问题是：由于用户配电变压器高压侧中性点不接地，低压侧中性点直接接地，这使得负载不平衡产生的负序电流可以在高压侧流通，但是零序电流不会在高压侧流通。因此无论系统带何种类型的负载，基于零序电流的相关判据均不会受到影响。由于我国低压用户广泛存在着单相负荷，负载不平衡现象比较严重，导致负序电流法在实际应用中存在较大的困难。

3 选线技术的发展方向

通过以上分析可以发现，接地故障的情况复杂，单一的选线判据往往不能覆盖所有的接地工况。应用效果较好的选线方法，通常是几种选线技术相结合的方法，例如上文提到的改进的小扰动法。因此选线技术的融合是未来的发展方向之一，很多学者在这一领域已取得了一定的研究成果^[23-25]。这些方法大多是运用智能控制理论的概念来构造每种选线方法的有效域（即适用范围），以实现多种选线方法的综合和判据最优化。目前的难点在于如何更好地确定每种选线方法的有效域，理论研究已从专家系统发展到自适应、人工神经网络等具有学习和自我调整能力的智能化方向^[26]。

当前，基于暂态、稳态信号的选线技术与新的数学工具结合是另一研究热点，近年来不断有新的选线算法提出^[27-31]。应用暂态信号选线的优点是：

故障发生时的暂态信号往往强于稳态信号,特征量明显,并且基本不受中性点接地方式的影响^[32]。其缺点在于:暂态信号的持续时间短,对于迅速的判别故障并有效提取故障发生时的信息提出了很高的要求。对比而言,利用稳态信号的选线方法与暂态信号法互补的优缺点:稳态信号的幅值较小,易受噪声影响;但是稳态信号持续时间长,可以连续多次运用稳态信息选线并综合判断,以保证选线的准确率;并且稳态信号法对于判别故障的时延及故障录波的要求较低。因此文献^[33]指出,利用故障零序稳态信号进行连续选线的效果要优于暂态信号法,同时还指出,对于弧光接地等表现为持续暂态振荡过程的接地情况,应用小波分析选线的效果要优于传统方法^[34]。

4 结语

本文分析了小电流接地系统常用的选线方法的基本原理,并结合最新的文献报导,总结了这些方法可行的改进方案。为进一步提高选线的准确性,本文认为需从以下几方面加强研究:1)提高小电流信号检测精度,完善故障录波技术;2)丰富现场运行数据,并准确提取接地故障时的有效信息;3)选线技术的智能化融合,特别是暂态信号法和稳态信号法的有效融合,其中选线方法有效域的确定是关键。以上方向将是选线难点(如高阻接地、弧光接地等)可行的解决方案。

参考文献

- [1] 贾清泉. 提高配电网单相接地故障选线保护性能的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2002.
- [2] Griffel D, Harmmand Y. A new deal for safety and quality on MV networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(4): 1428-1433.
- [3] 郝玉山, 高曙, 杨以涵, 等. MLN系列小电流接地微机选线装置动作原理[J]. 电力情报, 1994, 2(2): 7-11.
Hao Yushan, Gao Shu, Yang Yihan, et al. The principle of MLN series devices for detecting earth fault line in neutral ungrounded power system[J]. Information on Electric Power, 1994, 2(2): 7-11(in Chinese).
- [4] 王祖光. 微机小电流接地系统接地选择装置[J]. 电力系统自动化, 1993, 17(6): 48-51.
Wang Zuguang. Feeder earth fault selecting device for neutral isolated and PETERSEN coil grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(6): 48-51(in Chinese).
- [5] 陈维江, 蔡国雄, 蔡雅萍, 等. 10kV配电网中性点经消弧线圈并联电阻接地方式[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 56-60.
Chen Weijiang, Cai Guoxiong, Cai Yaping, et al. Neutral grounding mode in 10kV distribution network via PETERSON coil with parallel resistance[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 56-60(in Chinese).
- [6] 何奔腾, 胡为进. 能量法小电流接地选线原理[J]. 浙江大学学报, 1998, 32(4): 451-457.
He Benteng, Hu Weijing. A new principle to detect the grounded line in a neutral point indirectly grounded power system based on the energy function[J]. Journal of Zhejiang University, 1998, 32(4): 451-457(in Chinese).
- [7] 吴清, 许云峰. 小电流接地选线装置的现场接地选线试验[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 105-107.
- [8] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 5-10.
Zeng Xiangjun, Yin Xianggen, Zhang Zhe, et al. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 5-10(in Chinese).
- [9] 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 Xiangning, 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(in Chinese).
- [10] 张宏艳, 张承学, 熊睿. 国内外几种先进的小电流接地系统单相接地故障选线方法分析与比较[J]. 电力建设, 2005, 26(11): 41-44.
Zhang Hongyan, Zhang Chengxue, Xiong Rui. Analysis and comparison of several advanced fault line selective methods in small current grounding power system[J]. Electric Power Construction, 2005, 26(11): 41-44(in Chinese).
- [11] 邹浩斌, 胡少强, 刘利平, 等. 基于小扰动原理的单相接地选线装置[J]. 继电器, 2007, 35(2): 20-24.
Zou Haobin, Hu Shaoqiang, Liu Liping, et al. Single-phase grounding selected-line equipment based on small disturbance theory[J]. Relay, 2007, 35(2): 20-24(in Chinese).
- [12] 刘和平. 新型快速可调消弧线圈系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [13] 江渝. 快速可连续调节消弧线圈谐振接地系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [14] 江渝, 冉立, 刘和平. 可调节消弧线圈接地系统单相接地故障的辨识和选线[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 101-107.
Jiang Yu, Ran Li, Liu Heping. Judgement of the grounding fault and fault line selection for resonant network with adjustable arc suppression coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 101-107(in Chinese).
- [15] 齐郑, 刘宝柱, 王璐. 广域残流增量选线方法在辐射状谐振接地系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 84-88.
Qi Zheng, Liu Baozhu, Wang Lu. Application of wide area remnant current increment method of line detection in radial neutral-point resonant grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 84-88(in Chinese).
- [16] 桑在中, 张慧芬, 潘贞存. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(2): 11-12.
Sang Zaizhong, Zhang Huifen, Pan Zhencun. Protection for single phase to earth fault line selection for ungrounded power system by injecting signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(2): 11-12(in Chinese).
- [17] 潘贞存, 张慧芬, 张帆, 等. 信号注入式接地选线定位保护的分析和改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 71-75.
Pan Zhencun, Zhang Huifen, Zhang Fan, et al. Analysis and modification of signal injection based fault line selection protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 71-75(in Chinese).

- Chinese).
- [18] 曾祥君, 尹项根, 于永源, 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[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 29-32.
Zeng Xiangjun, Yin Xianggen, Yu Yongyuan, et al. New methods for control and protection relay in a compensated medium voltage distribution network based on injecting various frequency current [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 29-32(in Chinese).
- [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 Yaonan, Huo Bailin, 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(in Chinese).
- [20] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.
Dai Jianfeng, Zhang Yanxia. Study on adaptively choosing fault line under single-phase to ground fault based on analysis of multi-frequency bands[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47(in Chinese).
- [21] Chaari O, Bastard P, Meunier M. Prony's method: An efficient tool for the analysis of earth fault currents in Petersen-coil-protected networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3): 1234-1241.
- [22] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 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 Xiangjun, Yin Xianggen, Zhang Zhe, et al. 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(in Chinese).
- [23] 陈炯聪, 齐郑, 杨奇逊. 基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 88-91.
Chen Jiongcong, Qi Zheng, Yang Qixun. A fault line detection device for the non-solidly grounded system based on fuzzy sets theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 88-91(in Chinese).
- [24] 贾清泉, 杨以涵, 杨奇逊. 应用证据理论实现配电网单相接地故障选线保护[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 35-38.
Jia Qingquan, Yang Yihan, Yang Qixun. Application of D-S evidence theory to single-phase-to-ground fault line detection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 35-38(in Chinese).
- [25] 齐郑, 艾欣, 王炳革, 等. 基于粗糙集理论的小电流接地系统故障选线方法的有效域[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 43-46.
Qi Zheng, Ai Xin, Wang Bingge, et al. Effective domain of faulty line detection in small current grounding system based on rough set theory[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 43-46(in Chinese).
- [26] 张兆宁, 郁惟镛, 孙阳盛. 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 Zhaoning, Yu Weiyong, Sun Yangsheng. 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(in Chinese).
- [27] 庞清乐, 孙同景, 钟麦英, 等. 基于粗糙集理论的小电流接地系统故障选线[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 60-64.
Pang Qingle, Sun Tongjing, Zhong Maiying, et al. Fault line detection based on rough set theory in indirectly grounding power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 60-64(in Chinese).
- [28] 张庆超, 王振华. 基于协同理论的小电流接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 87-92.
Zhang Qingchao, Wang Zhenhua. Faulty line detection method for single-phase to ground fault in small current neutral grounding system based on synergetic theory[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 87-92(in Chinese).
- [29] 高艳, 林湘宁, 刘沛. 基于广义形态开闭变换的小电流接地选线算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 1-6.
Gao Yan, Lin Xiangning, Liu Pei. Generalized morphological opening-closing transform based feeder selection algorithm for neutral un-effectual grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 1-6(in Chinese).
- [30] 齐郑, 杨以涵, 林榕. 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 Yihan, Lin Rong. Study on faulty line detection of single phase to ground fault in small current neutral grounding system based on wavelet transform and wiener filter technology[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 23-26(in Chinese).
- [31] 毛鹏, 段玉倩, 姜娜. 基于相关分析的故障选线方法[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 36-39.
Mao Peng, Duan Yuqian, Jiang Na. A correlation analysis based method to detect faulty line under single phase to ground fault occurred in distribution network with small current neutral grounding [J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 36-39(in Chinese).
- [32] 王伟, 焦彦军. 暂态信号特征分量在配网小电流接地选线中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 96-100.
Wang Wei, Jiao Yanjun. Application of characteristic components of transient signal in grounded wire detection of ineffectively earthed distribution systems[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 96-100(in Chinese).
- [33] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 1-5.
Qi Zheng, Yang Yihan. Analysis of technology of fault line selection for single-phase-to-earth faults in neutral point non-effectively grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5(in Chinese).
- [34] 赵新红, 袁洪, 车伟. 小波变换在小电流接地电弧故障选线中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 18-20.
Zhao Xinhong, Yuan Hong, Che Wei. Study of arc-grounding fault selection based on wavelet analysis for the small current neutral grounding system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10): 18-20(in Chinese).



程路

收稿日期: 2009-03-09.

作者简介:

程路(1981—), 男, 博士, 研究方向为消弧线圈接地系统、电力电子在电力系统中的应用、新能源等, E-mail: chemlu_1@163.com;

陈乔夫(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力谐波抑制、FACTS 技术、变压器理论。

(责任编辑 李兰欣)