

小电流接地系统单相接地故障选线方法综述

姜 健 鲍光海

(福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350116)

摘要 中性点经消弧线圈接地是小电流接地系统方式之一, 这类系统随着消弧线圈补偿程度与接地电阻的不同具有不尽相同的故障信号, 是目前选线的难点。本文根据现有研究, 总结了小电流接地系统单相接地故障选线方法, 对近几年基于暂态量选线的方法进行详细阐述和归纳, 结合配电网的现实情况以及今后的研究方向提出了几点意见。

关键词: 小电流接地系统; 故障选线; 暂态量; 消弧线圈

Survey of the Methods to Select Fault Line in Neutral Point Ineffectively Grounded Power System

Jiang Jian Bao Guanghai

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou 350116)

Abstract Neutral by arc extinction coil grounding is one way of small current grounding system. This power system, owing to the arc suppression coil compensation and transition resistance lead to it have different characteristic quantity, This problem is difficult to solve. In this paper, summarizing of single-phase-to-earth fault line selection method according to the existing research, inducing the method of fault line selection based on transient component and putting forward a few opinions for new fault line selection method.

Keywords: neutral point ineffectively grounded power system; fault line selection; transient component; arc suppression coil

智能配电网作为智能电网的核心部分之一, 其中故障选线技术作为保证配电网安全可靠稳定运行的基础性工作, 具有重要现实意义^[1]。

我国 6~66kV 中压配电网的中性点一般采用小电流接地系统, 具体包括: 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) 和中性点经高阻接地系统

(neutral resistor-grounded system, NRS)。当配电网某一相发生接地故障时, 不构成短路回路, 且接地点的故障电流小, 故这类系统称为小电流接地电系统^[2]。这类接地方式特点有: ①故障稳态信号微弱。小电流接地系统发生单相接地故障时产生的是系统对地电容电流, 数值小。经消弧线圈补偿后 (过补偿、欠补偿、完全补偿), 数值更小; ②单相接地情况复杂, 受电弧影响大。单相接地故障可分为: 直接接地、经高阻接地、电弧接地以及雷击放电接地。

单相接地往往伴随着电弧现象, 而电弧又是典型的暂态过程; ③故障暂态特征复杂, 随机性强。故障电压和电流在暂态过程中有着丰富的特征量, 并且不受消弧线圈的补偿的影响。但是暂态信号特性复杂, 在不同的故障发生条件下, 暂态量信号又有所差异。

由于上述技术难题, 中性点谐振接地系统, 基于故障稳态量的选线方法存在不可避免的缺陷。因而对于谐振接地系统基于故障暂态量的选线方法成为了许多相关学者的研究重点。本文阐述了小电流接地系统故障信号的特点, 总结目前广泛采用的选线方法, 介绍了相应的原理, 并分析其优缺点。

1 小电流接地系统故障信号分析

1.1 稳态特征信号分析

在中性点不接低地的配电网中发生单相接地故障时, 接地点流过的是全系统的对地电容电流。为

抵消系统的电容电流，可在中性点接入一个消弧线圈产生感性电流，补偿容性电流从而减少经接地点的故障电流。这种谐振接地系统中的消弧线圈改变了故障电流的大小方向，使传统基于稳态量的选线方法失效。

由图1可看出，故障点电流为

$$I_k = I_1 + \Sigma i_c \quad (1)$$

式中， I_1 为消弧线圈补偿电流； Σi_c 为非故障点对地电容电流之和。

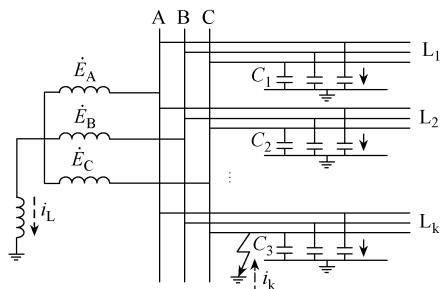


图1 单相接地故障示意图

1.2 暂态特征信号分析

根据现有研究，通过对单相接地故障时零序等效网络列写方程，可计算单相接地故障电流^[3]。健全线路和故障线路首端测得零序电流分别为

$$i_1 = I_{cm} \cos(\omega t + \varphi) + I_{cm} e^{-\delta t} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) \quad (2)$$

$$i_2 = (I_{cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{t_L}} + I_{cm} e^{-\delta t} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) \quad (3)$$

式中， i_1 为健全线路首端零序电流， i_2 为故障线路首端零序电流。

从公式可以得以下结论：

1) 影响单相接地电流的暂态特性主要有故障时供电线路相电压初相位、接地点过渡阻抗以及线路参数，并且这些条件的影响是耦合的。

2) 单相接地故障暂态零序电流振荡频率和衰减特性由接地点过渡电阻决定。

3) 接地零序电流由容性分量和感性分量组成，故障初相角决定二者比例和振荡特性。

4) 接地电阻的大小影响接地零序电流的暂态过程。

5) 配电网的线路长度和线路结构会对暂态特性

产生影响。

2 小电流接地系统选线方法

长期以来，国内外学者对小电流接地系统单相接地故障提出了多种不同原理的选线方法。这些方法按照其利用信号的不同可分为两类：①以“S注入法”为代表的注入信号的选线方法；②以单相接地故障时产生的电气量为依据的选线方法，其又可划分为基于故障稳态分量信号选线方法或暂态分量信号选线方法。因中性点接消弧线圈的应用与发展，目前基于暂态分量的算法成为研究热点。

2.1 基于外加注入信号的选线方法

“S注入法”作为外加注入信号选线方法的代表^[4]。其原理没有利用小电流接地系统单相接地故障的电气量，而是通过接地相PT向系统注入个信号电流，该信号感应到一次侧，通过接地点构成回路，利用寻迹原理跟踪该信号实现选线。

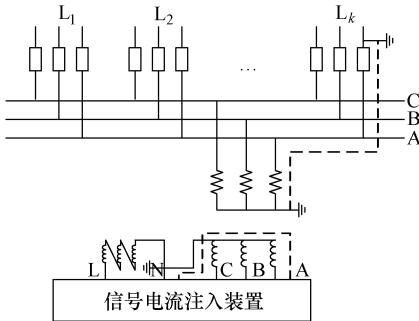


图2 信号注入原理示意图

但该方法在接地电阻较大时，往往不能正确选线。原因在于注入信号不仅在接地点构成回路，还经系统对地电容、消弧线圈构成回路。当过渡电阻较大时，流经接地回路的信号电流不一定是最小值，导致无法选线。

文献[5]在原有“S注入法”的基础上提出了改进意见：降低注入信号频率，应用信号电流的相位信息，使用双频信号。但是配电网是一个不断扩容，扩支路的系统。其系统的参数随着配电网的规模发展而改变，系统对地电容的改变将影响着注入信号电流的流向。仿真也证明，降低注入信号频率能减少对较大过渡电阻的误判，但消弧线圈分流增加，使流经接地回路信号电流绝对值过小难以检测。

“S注入法”的提出者在文献[6]又提出从接地变压器一次侧中性点向故障系统注入较大的半波直流为依据的选线方法。对金属性接地，选线定位不受消弧线圈影响。但经过渡电阻接地时，消弧线圈，

分布电容都会有直流通路，减小了流经接地点的直流电流，选线灵敏度受影响。其可靠性需进一步验证。

另一方法为脉冲信号注入法^[7]，其用周期性的脉冲信号作为注入信号。本质是降低注入信号的频率，仍无法克服大过渡电阻引起误判的缺点。

2.2 基于故障稳态分量信号的选线方法

1) 零序电流幅值比较法

该方法简称幅值法^[8]。对于中性点不接地系统发生单相接地故障后其非故障线路流过的零序电流为本身对地电容电流，故障线路流过的零序电流数值等于全系统非故障线路的对地电容之和。幅值法利用故障线路流过零序电流比非故障线路大的特点进行选线。幅值法的缺陷在于不适用谐振接地系统，消弧线圈的补偿作用改变了故障相流过的零序电流的大小。

2) 零序电流相位法

相位法利用故障线路零序电流由线路流向母线而非故障线路由母线流向线路的特点，根据方向进行选线。在此基础上又出现了群体比相法，先用幅值法选出幅值最大的几条线路，在此基础上进行相位比较。但仍然不适用于谐振接地系统，消弧线圈在过补偿运行下改变了故障线路的零序电流流向。

3) 零序电流有功分量法

零序电流有功分量法^[9]是根据流过故障线路端的零序电流含有中性点电阻或消弧线圈产生的有功电流以及非故障线路对地零序电流之和两部分。由于有功电流只流过故障线路，利用这一特点可实现选线。

实际运行的问题在于：当线路中性点电阻和消弧线圈阻值较小时，零序有功分量小，对装置检测精度要求高。

4) 谐波法

消弧线圈的补偿作用是针对基波频率设定的，对于高次谐波补偿很小。配电网5次谐波分量含量最大，因此不少学者提出利用5次谐波幅值相位选线。但谐波含量较基波分量小，对其提取检测造成很大困难，且选线易受负荷中谐波源影响。文献^[10]针对这一问题提出基于5次谐波突变量的选线方法。其原理是对于故障线路，正常相与故障相的5次谐波电流突变量大小不等，方向相反；故障线路与非故障线路的故障相相比5次谐波电流突变量大小不等，方向相反。但是仍无法解决系统中5次谐波含量不高的选线精度问题。

5) 零序导纳法

零序导纳法^[11-12]的原理是电网正常运行时，馈线的零序导纳中电导与电纳均为正直，处于直角坐标系中的第一象限。发生单相接地故障时，故障线路零序测量导纳随着消弧线圈的补偿度不同处于直角坐标系的二、三象限，如图3所示。

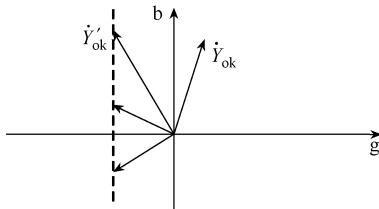


图3 零序导纳分布图

该方法的缺陷在于在谐振补偿情况下(即v=0)，此时故障线路测得的零序导纳很接近第一象限，易引起误判^[13]。对于间接瞬时性接地故障几乎失效。

2.3 基于故障暂态分量信号的选线方法

1) 首半波法

首半波法原理是基于大多数单相接地故障是发生在相电压过峰值时刻的。选线依据是在故障首个半波周期内，故障线路零序电流大于非故障线路且零序电流、电压与非故障线路极性相反。

识别首半波极性的方法因首半波暂态电流分量很小极易受干扰和諧波影响^[14]。实际故障不可能总发生在相电压过峰值时刻，该方法存在局限。

2) 零序能量法

零序能量法^[15-16]是利用发生单相接地故障时，故障线路零序电路中存在零序电源提供能量，非故障线路为无源元件，吸收能量。因此，依据故障线路能量绝对值最大，极性与非故障线路相反进行选线。

零序能量法本质是有功功率检测法，而阻性分量在暂态信号中比例小，特别是金属性接地时，易误选。

3) 暂态电流特征频带法

该方法选取某个频带范围(Selected Frequency Band, SFB)，分析故障暂态电流相频特性：故障线路零序电流的幅值与健全电路差距大，极性相反，据此选出故障线路^[17-18]。该方法需在固定频率范围内滤波，可靠性不佳^[19]，对相电压过零附近时发生的单相接地故障时无法识别。

4) 时频分析法

时频分析法原理是把故障暂态信号分解至多个频带，提取特征量获取，进而判断故障线路。目前主流的时频变换法有小波变换法^[20-21]，S变换法^[22]，

HHT 变换法^[23-24], 能对故障暂态高频电流信号进行有效的分解。

小波变换具有时频聚焦特性, 选用合适的小波基是处理突变信号的前提。提取能量集中频带^[25]对故障线路上的暂态零序电流进行小波变换后, 其暂态零序电流幅值高于健全线路且极性相反, 这样即可进行选线。但合适的小波基和小波分解尺度较难选取, 对选线结果影响大。S 变换是小波变换的改进, 用于提取主导特征频率的短窗能量大小, 但其根本小波的缺陷无法克服。HHT 变换是将复杂的信号自适应的分解成多个单分量信号, 其过程或多或少都存在端点效应, 其方法有待进一步的改进。

5) 波形图像相似度求解法

文献^[26-27]提出利用谐振接地系统发生单相接地故障时, 其故障线路与非故障线路暂态零序电流相似度要小于非故障线路之间的暂态零序电流波形的特点进行选线。如图 4 所示, 其中线路 3 为发生单相接地故障线路。

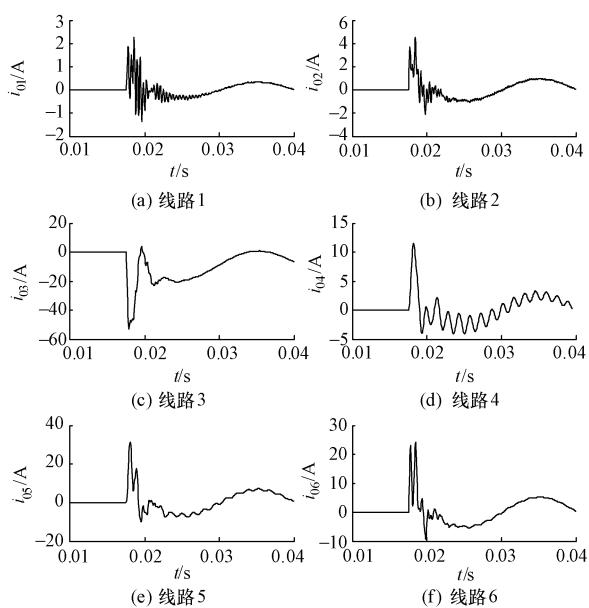


图 4 零序电流波形图

文献[26]把暂态零序电流用小波包进行分解重构并等时间划分各频带系数, 从而得到频谱矩阵再用图像综合相似系数进行选线。文献[27]用不变矩提取暂态零序电流特征量, 再用聚类分析算法选出具有不同特征量的故障线路从而避免了人为设定阀值。该方法是否具有通用性有待进一步验证。

3 未来的发展方向

通过以上分析可以发现, 谐振接地系统是目前

选线的难点且单一的选线方法无法应用于所有的接地故障, 而基于稳态特征量的选线方法由于消弧线圈的补偿影响几乎失效。

当前, 基于故障暂态信号与数学算法相结合是一研究热点, 近年不断有新的选线算法被提出^[28-31]。然而就是过分地依赖数学分析工具以及过分的依赖于仿真验证, 缺乏了对单相接地故障发生的机理进行系统的分析和研究和现场环境实际应用。由于单相接地故障边界条件复杂, 随机性强, 受电弧影响大, 如何有效的提取故障信息是实现选线的前提。基础性研究工作的缺失, 尤其是故障暂态信号特性的研究和利用方式的缺失, 导致对故障量的理解和运用出现片面性, 是目前选线技术可靠性不高的根本原因。

选线方法的融合也是未来的发展方向^[32-34]。文献[35]利用多孔算法小波包良好变换特性, 提出了多频带分量重构的选线新方法, 极大限度的提取了有效的故障零序电流分量信息。文献[36]把集成量子神经网络和证据融合理论应用于小电流接地选线中, 解决单一判据选线率低的问题。

4 结论

本文介绍了小电流接地系统常用的选线方法的原理, 并结合最新文献, 阐述了目前与数学算法结合的选线方法。本文认为未来可从以下方面加强研究: ①仿真时需考虑电弧影响以及故障的随机性, 通过实际运行检测算法的可靠性; ②提高小电流接地故障信号的检测精度, 实现可靠的提取微弱的故障信号。零序电流因过渡电阻的大小可能从毫安级到几百安级, 这导致了对装置的检测精度以及检测范围要求高; ③丰富现场运行数据, 根据现有选线方法研发装置, 进行现场或者实验验证而不是单一的仿真验证算法的可靠性。

参考文献

- [1] 张心洁, 葛少云, 刘洪, 等. 智能配电网综合评估体系与方法[J]. 电网技术, 2014(1): 3642-3648.
- [2] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.
- [3] 王清亮. 单相接地故障分析与选线技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [4] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 配电网故障自动定位技术研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 7-13.
- [5] 潘贞存, 张慧芬, 张帆, 等. 信号注入式接地选线定

- 位保护的分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 71-75.
- [6] 高志鹏, 张慧芬, 孙旭娜. 注入半波直流的小电流接地故障选线定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013(13): 139-145.
- [7] 王凤, 康怡. 基于脉冲信号注入法的小电流接地选线技术[J]. 电网技术, 2008(15): 90-93, 98.
- [8] 张新慧. 基于 Prony 算法的小电流接地故障暂态选线技术[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [9] 肖鑫. 小电流接地系统单相接地选线算法研究及选线装置实现[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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, 22(10): 40-42.
- [13] 程路, 陈乔夫. 小电流接地系统单相接地选线技术综述[J]. 电网技术, 2009(18): 219-224.
- [14] 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, 37.
- [15] 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.
- [16] 何奔腾, 金华烽, 李菊. 能量方向保护原理和特性研究[J]. 中国电机工程学报, 1997(3): 23-27.
- [17] 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.
- [18] 邢亚辉, 吕艳萍, 张承学, 等. 基于暂态电流极性的小电流接地系统故障选线装置[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(5): 105-109.
- [19] 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.
- [20] 潘露, 吕艳萍, 于芳, 等. 基于相频特性与多频带分析的小电流接地系统故障选线[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 76-79, 84.
- [21] 张伟刚, 张保会, 胡海松, 等. 应用小波包分析实现配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 60-64.
- [22] 张钧, 何正友, 贾勇. 基于 S 变换的故障选线新方法[J]. 中国电机工程学报, 2011(10): 109-115.
- [23] 王建元, 鞠默欣, 徐志璇, 等. 基于 HHT 小电流接地故障选线与在线故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2014(15): 48-54.
- [24] 束洪春, 赵文渊, 彭仕欣. 配电网缆-线混合线路故障选线的 HHT 检测方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 4-9.
- [25] Chaari O, Meunier M, Brouaye F. Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1996, 11(3): 1301-1308.
- [26] 郭谋发, 刘世丹, 杨耿杰. 利用时频谱相似度识别的配电线路接地选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2013(19): 183-190.
- [27] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.
- [28] 张庆超, 王振华. 基于协同学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.
- [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.
- [30] 李德臣. 基于可拓理论的小电流故障选线方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2010.
- [31] 张艳霞, 王清亮. 应用故障暂态特性实现配电网故障选线的新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 76-80.
- [32] 张淑清, 马跃, 李盼, 等. 基于改进的广义谐波小波包分解和混沌振子的小电流接地系统故障选线[J]. 电工技术学报, 2015(3): 13-20, 43.
- [33] 吴靓, 张英杰, 徐高, 等. 基于原子分解的谐振接地系统自适应故障选线方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3554-3562.
- [34] 李雅洁, 孟晓丽, 宋晓辉, 等. 基于最优 FIR 滤波器与层次聚类的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电网技术, 2015(1): 143-149.
- [35] 张仲孝, 苗世洪, 林湘宁, 等. 基于多频带分量重构的小电流接地系统自适应选线新方法[J]. 电网技术, 2011(9): 210-215.
- [36] 张海平, 何正友, 张钧. 基于量子神经网络和证据融合的小电流接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2009(12): 171-178.

作者简介

姜健(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电器及在线监测技术。