

Comprehensive Decision of Distribution Network Line Selection Based on Credibility Evaluation Index

Mingbo Yang¹, Getu Ma², Sanjun Fan¹, Yi Long², Bo Wang¹, Jinxin Ouyang², Tiancai He²

¹Guiyang Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co, Guiyang Guizhou

²State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing

Email: 330922968@qq.com

Received: Dec. 6th, 2017; accepted: Dec. 19th, 2017; published: Dec. 26th, 2017

Abstract

The fault line selection technology of distribution system with small current grounding is the key to ensure the safe and reliable operation of distribution network. The research on the technology of line selection in distribution network mainly focuses on the principle of line selection. Due to the influence of the grid structure of distribution system, the way of neutral grounding, the outlet type, load and other factors, each method has its limitations. Currently, there is a lack of the study on comprehensive evaluation methods of line selection. In this paper, three different line selection methods, including zero-sequence current amplitude method, harmonic method and zero-sequence current active component method, are used to quantitatively analyze the influencing factors of each line selection method. The credibility evaluation index of different methods is defined and classified according to the credibility level. The comprehensive evaluation index is established through the construction of Euclidean distance quantitative index evaluation system, and the comprehensive selection of line selection method based on credibility evaluation is given. Finally, an example is given to verify the feasibility and practicability of this method.

Keywords

Distribution Network, Line Selection Technology, Comprehensive Decision, Credibility Evaluation Index

基于可信度评价指标的配电网选线方式综合决策

杨明波¹, 马格土², 樊三军¹, 龙毅², 王波¹, 欧阳金鑫², 何天才²

文章引用: 杨明波, 马格土, 樊三军, 龙毅, 王波, 欧阳金鑫, 何天才. 基于可信度评价指标的配电网选线方式综合决策[J]. 电气工程, 2017, 5(4): 278-285. DOI: 10.12677/jee.2017.54034

¹贵州电网有限责任公司贵阳供电局, 贵州 贵阳

²输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学电气工程学院), 重庆

Email: 330922968@qq.com

收稿日期: 2017年12月6日; 录用日期: 2017年12月19日; 发布日期: 2017年12月26日

摘要

小电流接地的配电系统故障选线技术是保证配电网安全可靠运行的重点。关于配电网选线技术研究主要集中于选线原理, 且受配电系统网架结构、中性线接地方式、出线类型、负荷等因素影响, 各方法均有局限性, 目前缺乏对选线方法的综合评价的研究。本文针对三种不同选线方法, 包括零序电流比幅法、谐波法和零序电流有功分量法, 将每种选线方式的影响因素进行量化分析, 定义了不同方法能够正确选线的可信度评价指标, 并对其进行可信度等级划分, 通过构造欧式距离量化指标评价体系, 建立了综合评价指标, 给出基于可信度评价的选线方式综合决策。最后, 采用算例验证了该方法的可行性和实用性。

关键词

配电网, 选线技术, 综合决策, 可信度评价指标

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国内配电系统的进一步发展, 配电网结构日趋复杂, 其特征在于, 配电网 10 kV 母线出线逐渐增多, 故障零序电流分布日趋复杂, 故障种类繁多。发生故障时能快速、准确的选出故障线路的选线方法是配电网安全可靠运行的重要保障[1] [2]。

目前, 配电网常用的选线方法包括: 零序电流幅值比较法、五次谐波法、零序电流有功分量法、首半波法等。理论上, 以上各选线方法均能准确选择出故障线路, 但在实际运行中, 每种选线方法的效果受到了不同因素的影响。基于故障信号稳态分量的选线方法, 如零序电流比幅法、零序功率法、零序电流有功分量法等选线方法受线路长度、不平衡电流、流经接地消弧线圈的电感电流等因素影响较大; 基于故障分量暂态特征量进行选线的方法, 如首半波法、小波分析法等, 受到故障发生时刻、过渡电阻、电力电子设备等因素影响较大; 基于神经网络、模糊理论和粗糙集理论等基于信息融合技术的故障选线方法复杂, 实现难度大, 实际效果如何尚待验证[3]。

显然, 对于实际的小电流接地系统, 其配电网结构、出线类型、负荷情况等因素将对不同的选线方法产生不同程度的影响[4] [5] [6] [7]。由于目前缺乏对选线方法的综合评价的研究, 使得配电网的安全可靠运行受到威胁[2] [8] [9] [10]。为针对配电网不同运行方式选择出可信度较高的故障选线方法, 本文提出一种配电网故障选线方式综合评价方法, 针对三种常用选线方法, 包括零序电流比幅法、谐波法和零序电流有功分量法, 分别针对其各自的影响因素进行量化分析, 定义了其选线可信度指标, 定量分析了不同选线方法正确选线的可信度, 并对可信度进行分级评价, 通过构造欧式距离量化指标评价体系, 建立了综合评价指标, 给出基于可信度评价的选线方式综合决策, 为选线方式的选择作出参考。最后,

PSCAD/EMTDC 软件中针对具体网络进行仿真, 对具体算例中不同选线方式给出可信度评价, 为选线方式的选择给出参考。

2. 选线可信度指标

由于每种选线方式所采用的故障特征量不尽相同, 其绝对大小、量纲等因素不统一, 无法在某种特定评价体系下对不同选线方式的故障特征量进行直接综合评价。因此, 对选线方式的故障特征量进行一定数学处理, 使之既处于同一可比区间, 又可反应各自选线方式的故障特征。为定量表征不同选线方法故障特征量的可信度, 将各选线方法的特征量进行可信度量化分析, 旨在给出不同工况下故障特征量与选线特征量的契合程度, 给出该种选线方法针对特定故障条件的适应性判据。

2.1. 零序电流幅值比较法

在中性点不接地系统的配电系统中, 发生单相故障时, 流过故障线路的零序电流其数值等于全系统非故障元件的对地电容电流之和, 即故障线路上的零序电流最大, 且故障线路的零序电流方向与所有非故障线路零序电流方向相反。通过零序电流的幅值和相位的比较可以找出故障线路[2] [11]。但是, 该方法具有一定的局限性, 首先由于中性点经消弧线圈接地系统中消弧线圈对零序电流的补偿作用, 使得该方法不适用于谐振接地电网, 而且受到电流互感器不平衡电流、线路长短、系统运行方式及过渡电阻大小的影响较大[12] [13]。

含有 k 条出线的配电系统示意图如图 1 所示, 当第 j 条出线发生单相故障时, 流过每一条出线的零序电流为 I_{0_i} 。采用零序电流比幅法的选线装置所选出的线路的零序电流为

$$I_{0_j} = \max(I_{0_i}, i = 0 \sim k) \quad (1)$$

定义采用零序电流比幅法的选线可信度指标 LSCI_1 (Line Selection Credibility Index) 用 γ_1 表示:

$$\gamma_1 = \frac{I_{0_j} - I_{0_avg}}{I_{0_j}} \times 100\% \quad (2)$$

其中:

$$I_{0_avg} = \frac{\sum_{i=1}^k I_{0_i}}{k} \quad (3)$$

采用零序电流比幅法的选线准确度指标 LSCI_1 可表征故障线路零序电流幅值相较非故障线路的明显程度, 该指标值越大, 说明采用零序电流比幅法所选出的故障线路越准确。

2.2. 谐波法

故障发生后系统中会有大量谐波, 以五次谐波居多, 不论是中性点不接地还是谐振接地系统, 该方法都适用。其主要故障特征量与零序电流比幅法类似, 即故障线路的五次谐波零序电流幅值大于任何正常线路, 同时其相位关系与正常线路相反。但在工程实际中, 由于五次谐波数值较小, 且实际电网正常运行情况下可能就有谐波源存在, 会对选线判据造成干扰。从而影响正确选线[2] [3] [4] [14]。

由于五次谐波法影响因素之一为电网正常运行时的五次谐波, 所以定义其故障选线可信度指标 LSCI_2 用 γ_2 表示:

$$\gamma_2 = \frac{I'_{0(5)} - I_{(5)}}{I'_{0(5)}} \times 100\% \quad (4)$$

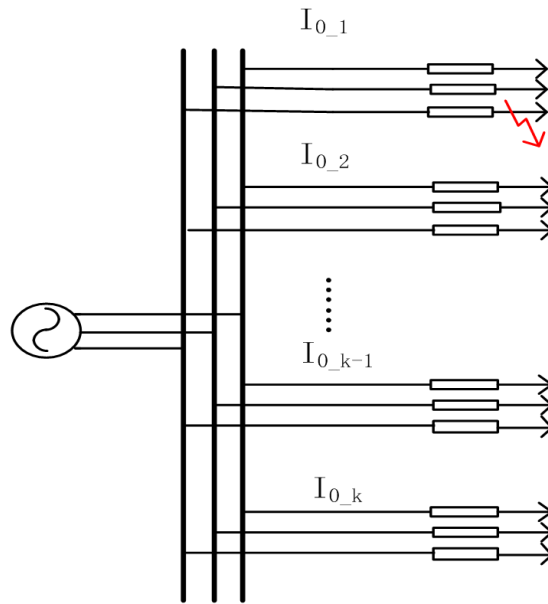


Figure 1. Distribution system failure diagram
图 1. 配电系统故障示意图

其中, $I'_{0(s)}$ 为故障发生后系统的五次零序电流, $I_{(s)}$ 为故障发生前系统的五次谐波电流, 故障选线可信度指标 $LSCI_2$ 可表征故障时零序电流五次谐波含量相较于正常运行时系统的明显程度, 其值越大, 说明采用五次谐波法选线准确度越高。

2.3. 零序电流有功分量方向法

配电系统存在对地电导, 故障电流中含有有功分量。非故障线路中经消弧线圈产生的有功分量方向相同且都经过故障点返回。在小电流接地的配电系统中, 流过故障线路的零序电流可分两部分: 中性点电阻器产生的有功电流, 其相位与零序电压差 180 度, 以及非故障线路零序电流之和, 相位滞后于零序电压 90 度; 而流过非故障线路的零序电流只有由本线路的电容电流, 相位超前零序电压 90 度。因此, 可以利用故障线路有功分量比非故障线路有功分量且方向相反的特点选出故障线路[2] [5] [15]。

针对零序电流有功分量法, 定义其故障选线可信度指标 $LSCI_3$ 用 γ_3 表示:

$$\gamma_3 = \cos(\angle\theta_0 + \pi) \quad (5)$$

其中, θ_0 是零序电流相对故障时零序电压的相角。故障选线可信度指标 $LSCI_3$ 表征故障情况下线路中零序电流有功分量明显程度, 其值越大, 零序电流中有功分量含量越高, 该线路为故障线路的可信度越高。

3. 基于欧式距离综合评价模型

对各选线方式所对应的可信度指标进行综合评价, 进而选择出最优选线方式, 拟采用基于欧式距离的综合评价模型来评价选线方式的可信度指标。

基于欧式距离的综合评价的基本思想是将指标在三维空间中对应的点距离理想指标的距离来评价指标的信用, 根据被评价对象本身存在的形态或类属上的亦此亦彼性, 从数量上对其所属给以刻画和描述, 在电力系统中已有所应用。

基于可信度指标暨欧式距离的选线方式综合决策模型, 其具体步骤为: 首先基于选线可信度指标构造出三维置信空间; 再根据各选线方式可信度的极大值与可接受下限值在置信空间中形成立体可信空间与不可信空间。发生故障时根据故障特征量形成选线可信度坐标, 计算可信度坐标与每一种选线方式在

置信空间中的置信极值点的欧式几何距离，选取与可信度坐标欧式几何距离最小的置信极值点所对应的选线方式为最优选线方式。

由以上选线可信度指标可知，LSCI_1、LSCI_2、LSCI_3 均为越大越优型指标，且位于[0,1]的范围内，可将指标与欧氏距离相结合确定整体模糊满足度，在置信空间内衡量各指标可信度与理想可信度是否足够接近。

选线可信度坐标可表示为：

$$U_\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) \tag{6}$$

用 $\gamma_n^+, \gamma_n^- (n=1,2,3)$ 分别表示零序电流比幅法、谐波法、零序电流有功分量法对应指标理想值与可接受下限。当指标达到理想值时，表示该选线方式可满足可信度要求，能够正确选线，当指标跌落至可接受下限之下时，表示该选线方式无法满足可信度要求。根据大量仿真经验与实际工程数据，本文中 γ_n^+, γ_n^- 取值如表 1 所示。

由于 LSCI_1、LSCI_2、LSCI_3 均为越大越优型指标，且位于[0,1]的范围内，可在三维空间中确定一个立体置信空间。同时由三种不同选线方式确定的三个置信下限构成不可信空间，为完全包含于置信空间内的一个长方体。如图 2 所示。

当选线可信度坐标 U_γ 位于不可信空间内，三种选线方法均不可采用；当选线可信度坐标 U_γ 位于置信空间与不可信空间之间时，求取并比较选线可信度坐标与置信极值点的欧式距离所对应的选线方式来实现正确选线，即用欧氏距离衡量各指标与置信目标是否足够接近。

Table 1. Route selection method credibility index acceptable lower limit

表 1. 选线方式可信度指标可接受下限

	零序电流比幅法	谐波法	零序电流有功分量法
指标理想值	$\gamma_1^+ = 0.1$	$\gamma_2^+ = 1$	$\gamma_3^+ = 1$
可接受下限值	$\gamma_1^- = 0.01$	$\gamma_2^- = 0.3$	$\gamma_3^- = 0.35$

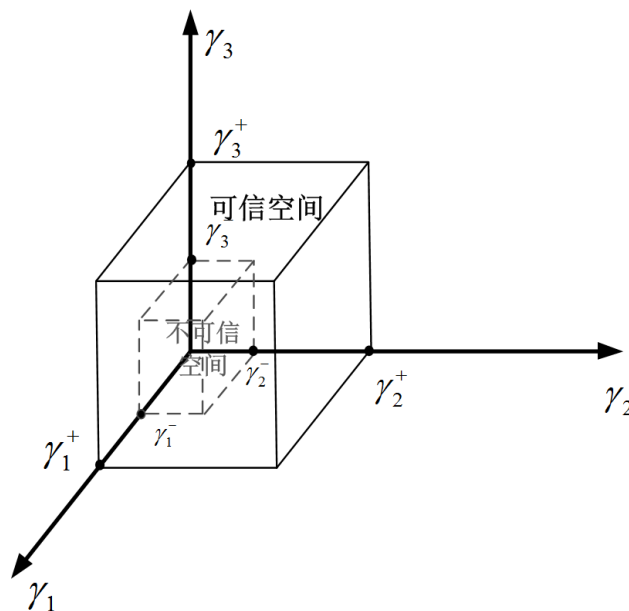


Figure 2. Line selection confidence space

图 2. 选线方式置信空间

定义一种选线方式的置信极值点(C Confidence Extreme Point) CEP 为在三维坐标上得的投影分别为 γ_n^+ 和另外两种方法的可接受下限的点, 例如零序电流比幅法的置信极值点为:

$$CEP_1 = (\gamma_1^+, \gamma_2^-, \gamma_3^-) \tag{7}$$

1) 针对指标 LSCI₁, 计算其与置信极值点欧式几何距离为:

$$L_1 = \sqrt{(\gamma_1 - \gamma_1^+)^2 + (\gamma_2 - \gamma_2^-)^2 + (\gamma_3 - \gamma_3^-)^2} \tag{8}$$

2) 针对指标 LSCI₂, 计算其与置信极值点的欧式几何距离为:

$$L_2 = \sqrt{(\gamma_1 - \gamma_1^-)^2 + (\gamma_2 - \gamma_2^+)^2 + (\gamma_3 - \gamma_3^-)^2} \tag{9}$$

3) 针对指标 LSCI₃, 计算其与置信目标的欧式几何距离为:

$$L_3 = \sqrt{(\gamma_1 - \gamma_1^-)^2 + (\gamma_2 - \gamma_2^-)^2 + (\gamma_3 - \gamma_3^+)^2} \tag{10}$$

求取 $\min(L_1, L_2, L_3)$, 即选线可信度坐标与对应选线方法置信极值点欧式距离最小的为最优选线方式。

该综合决策方法不仅考虑了现有选线方式面临的不足, 从可信度的角度对不同选线方式进行分析, 给出能综合反应各选线方式故障特征量显著程度的判定指标, 即选线方式可信度, 结合欧式几何距离的定义, 构造出选线方式决策的置信空间, 给出了基于可信度评价的选线方式综合决策模型。

4. 算例

图 3 为某 110 kV 变电站 10 kV 段的简化主接线图, 表 2 为线路原始参数。利用 PSCAD/EMTP 仿真软件搭建变电站模型, 求取其在一条出线发生单相金属性故障的情况下的选线可信度指标, 得到选线可信度坐标, 求取坐标与每种选线方式置信点之间的欧式几何距离, 选出最优的选线方式。

当易高线末端发生单相金属性接地故障时, 首先仿真得出各条出线的零序电流、五次谐波电流以及零序有功电流相对零序电压的相位角, 将结果统计如表 3 所示。

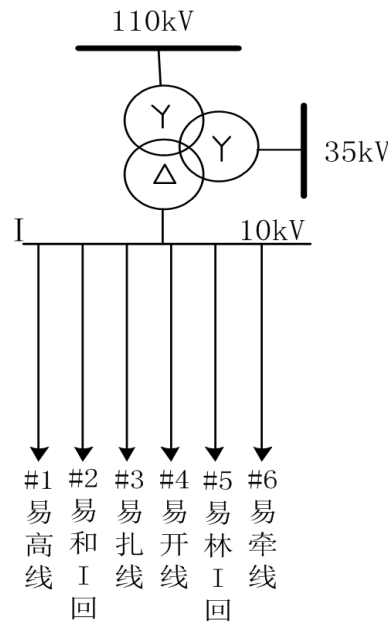


Figure 3. A 110 kV substation a system diagram

图 3. 某 110 kV 变电站一次系统图

Table 2. 10 kV line raw data
表 2. 10 kV 线路原始数据

线路名称	线路型号	线路长度	
		电缆(km)	架空线(km)
易高线		2.0	8.9
易和 I 回	电缆型号: 易和 I 回、 易扎线电缆型号为 YJV22-300/10 kV, 其余线路为 YJV22240/10 kV 架空线型号: JKLYJ-120/10 kV	3.2	6.8
易扎线		5.3	7.6
易开线		0.12	18.6
易林 I 回		2.3	16.7
易牵线		0	1.75

Table 3. Simulation results statistics table
表 3. 仿真结果统计表

线路名称	零序电流(kA)	五次谐波(kA)	有功分量夹角(°)
易高线	0.35	0.015	-136°
易和 I 回	0.106	0.0012	90°
易扎线	0.0071	0.0009	90°
易开线	0.07	0.0008	90°
易林 I 回	0.007	0.0011	90°
易牵线	0.012	0.0013	90°

Table 4. Line selection method index results
表 4. 选线方式指标计算结果

指标	计算结果
γ_1	0.05
γ_2	0.85
γ_3	0.71
L_1	0.66
L_2	0.39
L_3	0.62

根据以上仿真结果, 分别计算 LSCI_1、LSCI_2、LSCI_3 指标及其与置信极值点欧式几何距离, 结果如表 4 所示。

显然, $\min(L_1, L_2, L_3)$ 为指标 LSCI_2 与置信极值点的欧式几何距离, 所以, 应采用谐波法选线准确度最高。由于目前针对配电网选线综合决策尚无其他决策方式, 无法对比分析本文所采用的决策方式的可靠性, 但本方法可以从理论上对小电流接地配电系统选线决策做出参考, 弥补现有研究领域的空白。

5. 结论

本文对比了三种常用的小电流接地配电系统故障选线方法, 分析了其影响因素与使用范围, 根据分析结果定义了每种选线方式的选线可信度指标以表征在配电系统中采用该选线方式能够正确选出故障线

路的可信程度。同时建立了基于欧式几何距离的故障选线方式综合评价模型,通过定义选线方法对应的置信极值点与选线可信度坐标,建立了选线方式置信空间,通过评估在置信空间中选线可信度坐标与置信极值点的几何距离确定了最合理的选线方式,最后,根据具体算例计算了具体选线可信度指标,确定了具体网架中最合理的选线方法。

基金项目

配电系统中性点接地方式选择与故障保护技术研究及示范(GZKJXM20170166)。

参考文献 (References)

- [1] 申双葵. 小电流接地系统单相接地故障选线的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [2] 贾清泉, 杨奇逊, 杨以涵. 基于故障测度概念与证据理论的配电网单相接地故障多判据融合[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 9-14.
- [3] 刘渝根, 王建南, 马晋佩, 等. 结合小波包变换和5次谐波法的谐振接地系统综合故障选线方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1519-1525.
- [4] 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.
- [5] 薛永端, 高旭, 苏永智, 等. 小电流接地故障谐波分析及其对谐波选线的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 60-64.
- [6] 张文朝, 顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2741-2746.
- [7] 赵嘉玉, 韩肖清, 梁琛, 等. 隶属函数与欧氏距离相结合的配电网优化重构[J]. 电网技术, 2017(11): 3624-3631.
- [8] 梁睿, 王洋洋. 基于直觉模糊集的单相接地故障综合选线方法[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 228-234.
- [9] 牛云涛, 李华, 宋志宏, 等. 谐振接地系统多判据多周期信息融合故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2015(S1): 512-517.
- [10] 夏楠, 姜彤, 张利. 中性点不接地系统负荷电流对零序电流采集的影响分析[J]. 电气应用, 2010(5): 60-62.
- [11] 尹璐旻. 小电流选线有效域和混沌法判据的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2005: 52.
- [12] 杜延辉. 多重分形和小波理论在小电流接地系统单相接地故障选线中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2008: 76.
- [13] 周柏青. 零序电流比幅式接地选线的研究[J]. 通信电源技术, 2008, 25(6): 37-39.
- [14] 刘兴艳, 董洋洋. 基于五次谐波电流变化特征的单相接地故障选线方法[J]. 电子质量, 2010(3): 35-37.
- [15] 梁睿, 王洋洋. 基于直觉模糊集的单相接地故障综合选线方法[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 228-234.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org