

# A Review on Location Methods of Small Current Grounding Fault

Guihua Sun<sup>1</sup>, Jinghua Wang<sup>2</sup>, Tao Kong<sup>1</sup>, Longkun Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong

<sup>2</sup>Shandong Kehui Power Automation Co. Ltd., Zibo Shandong

<sup>3</sup>Shandong Power Company of Taian, Taian Shandong

Email: 1208386617@qq.com

Received: Mar. 29<sup>th</sup>, 2016; accepted: Apr. 11<sup>th</sup>, 2016; published: Apr. 14<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 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

---

## Abstract

In China, the distribution network mostly adopts small current grounding system. Through extensive research literature, we classify and summarize the current principle of small current grounding fault locating various methods and analyze their characteristics. According to their current respective situations, we propose fault location problems and the development trends in the future.

## Keywords

Distribution Network, Small Current Grounding Fault, Fault Location

---

# 小电流接地故障定位方法的综述

孙桂花<sup>1</sup>, 王敬华<sup>2</sup>, 孔 涛<sup>1</sup>, 李龙坤<sup>3</sup>

<sup>1</sup>山东理工大学, 电气与电子工程学院, 山东 淄博

<sup>2</sup>山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博

<sup>3</sup>山东泰安供电公司, 山东 泰安

Email: 1208386617@qq.com

收稿日期: 2016年3月29日; 录用日期: 2016年4月11日; 发布日期: 2016年4月14日

文章引用: 孙桂花, 王敬华, 孔涛, 李龙坤. 小电流接地故障定位方法的综述[J]. 智能电网, 2016, 6(2): 87-94.

<http://dx.doi.org/10.12677/sg.2016.62010>

## 摘要

在我国，配电网大部分采用小电流接地系统。通过大量文献的研究，对目前小电流接地故障各种定位方法的工作原理进行分类和总结，并分析它们各自的特点。根据它们各自适应的场合提出目前故障定位存在的问题及今后发展的趋向。

## 关键词

配电网，小电流接地故障，故障定位

## 1. 引言

在我国，配电网大部分采用小电流接地系统，故小电流接地故障占总故障的 80% 以上，是最常见的故障形式[1]。当线路发生故障后，因为线电压依然对称，所以电路可以正常工作 1~2 h [2]，能提高供电的可靠性。但是这种故障不能长时间运行，若长时间运行会使单相接地故障变成相间短路故障，这样就会给电力系统造成更加严重的损失。所以，及时找到故障位置并及时切除故障，对提高供电可靠性、保护设备安全都具有十分重要的意义。

配电网中，当小电流接地系统发生故障时，很难找到故障发生的位置。小电流接地故障定位难主要是因为故障电流很小，不容易检测，再加上故障量不突出、不稳定、不确定等问题，小电流接地故障的定位已被公认为电力行业内一大难题[3]。因此，解决故障定位的问题已迫在眉睫。本论文对目前各种故障定位的方法进行了分类和总结，并分析各自的特点。最后，根据它们各自适应的场合提出目前故障定位存在的问题及今后发展的趋向。

## 2. 故障定位方法

### 2.1. 稳态零序电流法

当线路发生故障后，故障点的零序电流为整个系统对地的电容电流之和，数量上等于系统正常工作时对地电容电流的算术之和[4]。

下面我们用 3 条出线为例，假如第 3 条线路发生故障，则稳态零序电流的分布如图 1 所示。主要的分布特征如下：

- 1) 无故障线路的零序电流等于其下游线路对地的分布电容电流，从母线流向线路，离母线距离越远其值越小，线路末端几乎为零。
- 2) 故障线路的零序电流等于故障线路下游对地的电容电流，从母线流向线路，离故障点越远其值越小，线路末端几乎为零。
- 3) 故障线路上游的零序电流等于所有无故障线路的对地分布电容加上故障点到母线之间的分布电容电流，从线路到母线；由于离母线越远其值越大，故零序电流的最大值位于故障点处。

由图 1 可知，对于故障线路，故障点左右侧的零序电流流向相反，且一般情况下故障点上游幅值远大于下游幅值，根据此特征可以实现故障定位。综上所述，通过比较故障线路上稳态零序电流的幅值和极性就可以实现故障定位。文献[5]基于零序电流实测值与通过零序电压求得的计算值的差值，提出一种零序电流比例增量法进行故障定位。

该方法实现比较容易而且原理简单；不足之处在于抗干扰能力差，可靠性低，而且不适用于谐振系统。

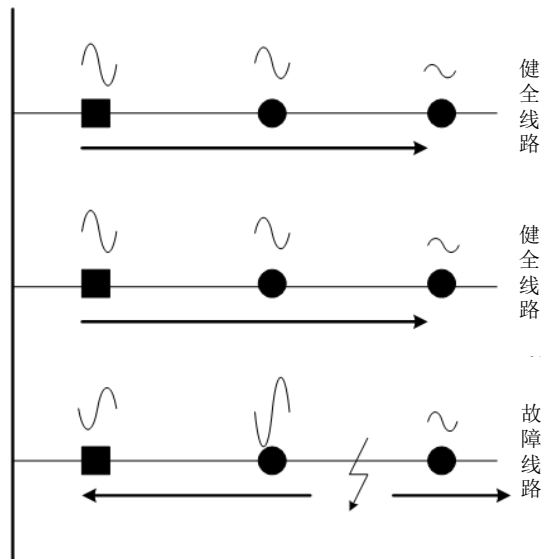


Figure 1. Distribution of steady zero-sequence current  
图 1. 稳态零序电流分布

## 2.2. 注入信号法

信号注入法[6]-[11]就是利用在故障后,向故障相电压互感器或消弧线圈二次绕组注入一个电流信号(大小一般为几百毫安或者几安),根据对该电流信号的寻迹实现故障定位。有注入信号的线路是故障线路,若故障线路上最后一个信号点与信号不见的点之间就是为故障区段。文献[12]提出“直流开路,交流寻踪”的停电故障定位方法,主要是向故障线路加入恒定直流高压,让接地点一直处于击穿状态,然后再向其注入交流电流信号,交流信号不见的位置就是故障的位置。

注入法优点在于设备装置简单[13],可以在系统中直接安装电压互感器,不论是三相电压互感器还是两相电压互感器都可以应用。不足之处在于,注入信号由 TV 控制;需要安装注入设备,巡线的时间很长;接地电阻大的情况下,信号很弱,不能用于瞬时性故障定位。

## 2.3. 暂态法

暂态法[14]-[17]是利用故障后的暂态特征实现定位的方法。由于消弧线圈对故障暂态信息几乎没有影响,所以不论在不接地系统还是谐振接地系统中,小电流的分布特征都是相同的,主要特征如图 2 所示。

1) 由于故障线路左侧的线路比右侧的长,从而使右侧线路的电感和对地电容要远远小于左侧,故故障线路左侧的暂态谐振频率低,而右侧的谐振频率高,二者差异很大、相似程度较低。

2) 对故障点左侧或右侧的相邻检测点(不包括故障点),其暂态电流之差等于该区段线路的分布电容电流,变化很小,所以二者差异很小、相似程度高。

3) 在无故障线路(包含出口)和故障线路故障点右侧的各个检测点的暂态电流等于下游线路的分布电容电流;方向是从母线流向线路,离母线越远其值越小,线路末端几乎为零[18]。

4) 故障线路故障点左侧检测点的暂态电流等于所有无故障线路分布电容电流加上左侧线路上的电容电流,方向是从线路到母线。因为暂态电流离母线越远其值越大,所以暂态电流的最大值靠近故障点。

因此,故障线路故障点左侧和右侧的暂态电流方向不一致而且一般情况下故障点左侧的幅值要比右侧的幅值大很多,此特征可用于实现故障定位;此外,故障点左右侧的暂态信号频率差异大、相似程度低,也可用于定位。定位方法主要包括暂态电流方向法、暂态电流相似法及暂态功率方向法[19]。

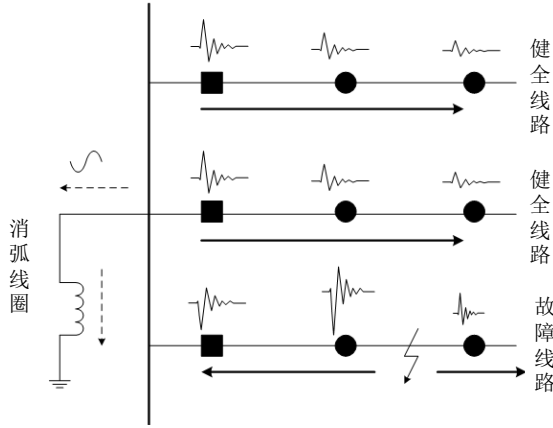


Figure 2. Transient current distribution after fault  
图 2. 故障后暂态电流分布

### 2.3.1. 暂态电流方向法

根据图 2 所示，故障点左侧的暂态电流从线路到母线而右侧是从母线到线路，故可以通过判断暂态电流的方向来确定故障区段。

每个检测点的暂态电流方向计算的方法与计算暂态电流方向选线的方法一样，即根据每个检测点的暂态零序电流  $i_0(t)$  和零序电压  $u_0(t)$  计算方向系数，即

$$D = \frac{1}{T} \int_0^T i_0(t) du_0(t) \quad (1)$$

若  $D > 0$ ，则由母线流向线路，故障点位于检测点右侧；若  $D < 0$ ，则由线路流向母线，故障点位于检测点左侧。最后一个  $D < 0$  检测点与第一个  $D > 0$  检测点之间的区段就是故障区段。

暂态电流方向法与中性点的运行方式、间歇性电弧都没有关系，也不需要向系统注入信号或者向中性点投入中电阻，可靠性高；不足之处是计算电流方向时需要零序电压信号，需要在线路上安装零序 TV 和三相 TV，来获取电压信号。

### 2.3.2. 暂态电流相似法

如图 2 所示，当线路发生故障时，故障点上、下游线路有着相互独立的谐振过程。由于线路结构和规模不同，暂态的主谐振频率也不同。即可以通过故障点两侧暂态零序电流差异很大、相似程度低而无故障线路的差异小、相似程度高来判断故障区段。

由于配电终端之间很难做到同步[20]，所以在计算两个相邻检测点暂态零模电流  $i_{0,k}(t)$ ， $i_{0,k+1}(t)$  之间相似系数  $\rho_{k,k+1}$  时，需要先固定其中一个波形，对另一个波形进行平移；波形每平移一次我们就计算一次相关系数；继而我们会求出一系列暂态电流的相关系数，然后取他们中绝对值最大的作为暂态电流相似系数。即：

$$\begin{aligned} \rho_{k,k+1} &= \text{Max}_{T \in [-T_i, T_i]} (|\rho_{k,k+1}(\tau)|) \\ &= \text{Max}_{T \in [-T_i, T_i]} \frac{\left| \int_0^T i_{0,k}(t) \cdot i_{0,k+1}(t+\tau) dt \right|}{\sqrt{\int_0^T i_{0,k}^2(t) dt \int_0^T i_{0,k+1}^2(t) dt}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中： $T$  为暂态信号持续的时间； $T_i$  为信息交换的最大误差；对于超过记录范围  $[0, T]$  的电流数据用 0 补上。

比较暂态零序电流相似系数可以实现故障区段定位。但故障点右侧的线路末端的暂态电流很小而不易检测到，此时的故障定位方法为：

1) 若相邻的暂态电流系数都很小且小于我们预先设定的阈值，阈值一般为 0.5~0.8，则该区段为故障区段；

2) 若所有的暂态电流相似系数均大于预先设定的阈值，阈值一般为 0.5~0.8，则最后一个配电终端的下游为故障区段。

文献[21]就是利用故障点两侧的暂态电流差异大、相似程度低，提出一种暂态电流相似性的方法来确定故障位置。该方法不用暂态电压信号，只采用暂态电流信号，能适用于所有的检测点，适应范围广。不足之处在于，当故障点两侧的谐振频率相近时，他们之间的相似程度就会很高，此方法就不能实现故障定位。

### 2.3.3. 暂态功率方向法

在某一特定频段内，根据暂态零模电压与零模电流的容性约束关系[22]，可以定义暂态无功功率  $Q_m$  等于电压  $u_0(t)$  Hilbert 变换的反极性与电流  $i_0(t)$  对应的平均功率：

$$Q_m = -\frac{1}{\pi T} \int_0^T i_0(t) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u_0(\tau)}{t-\tau} d\tau dt \quad (3)$$

式中： $T$  为暂态信号持续时间。

或，在某一特定频段内，定义暂态无功功率  $Q_m$  等于电压  $u_0(t)$  的导数与电流  $i_0(t)$  对应的平均功率：

$$Q_m = \frac{1}{T} \int_0^T i_0(t) du_0(t) \quad (4)$$

$Q_m$  则暂态功率方向是从线路到母线， $Q_m > 0$  则暂态功率方向从母线到线路。由故障点两侧的暂态(无功)功率的方向可知， $Q_m$  极性相反。文献[23]基于空间电磁场，提出了一种非接触式的测量方法。该方法理论上是可行的，但是灵敏度低且很容易受外界的干扰，实际应用起来还是存在一定的困难。

暂态功率方向法与中性点运行方式、间歇性电弧都没有关系，也不需要很高的对时精度或向系统注入信号，可靠性高。不足之处是需要安装大量的零序电压互感器，来获得电压信号，投资大、施工不方便。

## 2.4. 阻抗法

阻抗法的工作原理是首先假设线路是均匀的线路，计算各种故障类型的故障回路阻抗或电抗；然后再除以线路的单位阻抗或电抗，就得到距离测量点的长度，就可以用来确定故障位置。用于阻抗法的故障测距方法有代数法和微分方程法。文献[24]提出的方法是解决配电网架空线路的。文献[25]根据新的开发思路，设计了一个故障定位的装置。提出一种故障定位装置的设计与开发思路，该装置主要用于辐射状变电站馈线和配电线路的故障定位。

该方法成本少，适用于结构简单且不复杂的网络。但是其受运行方式、负荷电流等的影响，会造成故障定位不准确，而且根本避免不了伪故障点。

## 2.5. 行波法

行波法就是利用行波到达的不同时刻列方程求得故障点与检测点之间的距离。行波定位的方法主要有单端行波法和双端行波法。单端行波法是利用行波从故障点到母线来回一圈的时间求取故障的长度。单端行波法定位准确，不足之处是可靠性低。双端行波法利用故障行波到达线路两端检测点的时间差，

来确定故障的位置。双端行波法可靠性高,但需要安装检测装置且要求时间同步,其投资较大。文献[26]引入杆塔定位思想,提出了一种和线路长度没有关系的双端测距的新方法;文献[27]为了解决线路末端很难获取信号的问题,提出了变压器传变电压行波的方法;文献[28]借鉴行波能量的思想,通过能量比计算行波波头时差进而实现故障定位。

行波法能适用于高压线路;不足之处是由于线路复杂,分支多,所以配电网中较短的线路很难去辨认故障的波头和波阻抗变化问题。它还需要额外的行波检测设备,投资大。因此,该方法不太适用于配电网。

## 2.6. 中电阻法

中电阻法是指线路发生永久性故障后,在系统中性点与大地之间投入一个阻值合适的电阻,故障线路与母线之间就会形成一个人为的故障电流,能检测到这个故障电流的就是故障点的左侧,检测不到的就是无故障线路和故障点右侧线路。因此,通过这个人造的故障电流可以确定故障位置。

该方法适用于谐振接地系统,但人为的故障电流存在安全隐患,中性点投入电阻的设比较难。

## 2.7. 残流增量法

残流增量法是通过调整消弧线圈的补偿度来改变故障点的残余电流,从而使线路的零序电流也发生变化,其中变化最大的是故障线路的零序电流,根据这一性质可以实现故障定位。具体的实现方法:故障发生后,首先测量和记录每条出线的零序电流;然后调整消弧线圈的补偿度并再一次的测量并记录每条出线的零序电流;对比消弧线圈补偿度变化前后,每条出线的零序电流变化,其中变化最大的就是故障线路,再进一步故障点的位置[29]。文献[30]主要是通过比较消弧线圈补偿度变化前后,馈线终端单元(Feeder Terminal Unit, FTU)测量到的零序电流变化,以此来实现故障定位。

残流增量法原理简单,不受电气量测量设备的误差影响,可靠性和灵敏度高;不足之处在于需要增加专门的设备,就大大限制了它的发展。

## 2.8. 五次谐波法

五次谐波法是利用故障点前边支路、后边支路以及无故障线路的零序电流、零序电压的特性,来分析五次谐波测量空间电场和磁场的幅值和相位关系,以此来确定故障的位置[31]。该方法受消弧线圈补偿的效果很小,故不受消弧线圈影响,适用于谐振接地系统。不足之处灵敏度低,很容易受到外界的干扰。

## 2.9. 基于数学工具和人工智能的定位方法

人工智能[32]-[34]定位方法是在网络结构改变、上传信息发生畸变或不完备等情况下依然能够准确地定位故障区段,主要方法有人工神经网络、遗传算法、粗糙集理论、数据挖掘、Petri网、仿电磁学等算法。近年来,许多人把数学工具应用到故障定位中来,如近似熵法、粗糙集理论、神经网络、遗传算法、小波分析等。把人工智能算法和数学工具的定位方法引入到故障定位中,信号的获取和判别都有很重要的意义。文献[35]结合小波神经网络和奇异性检测原理,提出了一种单相断线故障定位的方法。

目前,基于人工智能和数学工具的故障定位方法在理论、仿真方面都有很大的成效,但是这种方法还没有大量投入到实际应用中。

## 3. 目前故障定位存在的问题及发展趋势

目前小电流接地故障存在的问题主要有以下几种:

1) 单一方法使用的领域小。我们使用单纯的一种方法去实现故障定位往往有一定的局限性,会存在

定位不准确,如单纯的暂态电流相似法在故障点两侧若谐振频率相等时,他们的相似系数很高,此时该方法就不适合故障定位。

2) 信号的获取困难。在配电网中小电流单相接地故障它的信号很微弱,检测不到,这就给信号提取的工作增加了负担,如暂态无功功率法需要投入 TV 设备,来提取零序电压信号。

3) 定位方法都是理论的阐述缺少实际的产品。目前来说,大部分的小电流定位方法都是理论的阐述,有很少的产品投入市场,我们应把理论转化为实际,在实践中去检验方法的可行性。

针对以上不足,小电流接地故障定位未来的发展方向应是采用多种定位方法结合,以弥补单一方法的缺陷;深入研究故障信号的获取方式,以便更好的实现故障定位;我们应尽可能多的去把理论的方法应用于实际,让更多的产品投入市场。据目前的发展来看,小电流接地故障的定位方法越来越向智能化的方向发展,迅速的找到故障区段并及时切除,以恢复非故障区段的供电,提高了供电质量的可靠性。

#### 4. 结论

小电流接地故障定位对提高供电的可靠性有着重要的意义。多年来,国内外学者做了很多关于小电流接地故障的定位方法方面的研究,取得了一定的成效。本论文主要介绍了阻抗法、行波法、注入法、稳态电流法、暂态法、稳态零序电流比较法、基于数学工具和人工智能的定位方法等的工作原理,并叙述了各自的优缺点。概括了故障定位目前存在的问题,并阐述了小电流故障定位未来的发展方向。

#### 参考文献 (References)

- [1] 张保会. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 苏宏升, 张耘川. 小电流接地系统故障定位方法综述[J]. 电源技术, 2015(4): 867-870.
- [3] 梁秋艳, 周海波, 牛国玲, 马翔. 小电流接地系统单端行波故障定位新算法[J]. 输配电工程与技术, 2012, 1(2): 13-20.
- [4] 岳凯旋, 王宝华. 基于萤火虫算法的含 DG 配电网故障区段定位[J]. 智能电网, 2015, 5(4): 197-203.
- [5] 王新超, 张玉海. 零序电流比例增量法在小电流接地故障选线中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 125-130.
- [6] 张新佳, 朱敏珊. 中山配网故障定位分析快速复电系统的设计与实现[J]. 智能电网, 2015, 5(6): 308-314.
- [7] 张杨, 栗亚伟, 张鹏飞, 张明哲, 柴守信, 徐信华. 基于整定计算系统的输电线路故障点定位方法的研究[J]. 电气工程, 2015, 3(4): 137-141.
- [8] 岳凯旋, 王宝华. 基于萤火虫算法的含 DG 配电网故障区段定位[J]. 智能电网, 2015, 5(4): 197-203.
- [9] 罗梅, 杨洪耕. 配电网故障定位的一种改进通用矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012(40): 64-68.
- [10] 李超文, 何正友, 张海平, 等. 基于二进制粒子群算法的辐射状配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2009(37): 35-39.
- [11] 王进强, 陈少华. 基于改进遗传算法的含分布式电源的配电网故障定位[J]. 电力科学与工程, 2013(29): 13-17.
- [12] 张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64-66.
- [13] 刘蓓, 汪泓, 陈春, 等. 和声算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013(28): 280-284.
- [14] Yang, X.S. (2009) Firefly Algorithms for Multimodal Optimization. Stochastic Algorithms: Foundations and Applications. Springer, Berlin, Heidelberg, 169-178. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6\\_14](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6_14)
- [15] 陈家俊, 蒋铁铮, 周勇, 等. 考虑电压骤降的分布式电源定容和选址[J]. 电网技术, 2014(38): 2244-2249.
- [16] 王晶, 王宗礼, 陈骏宇, 等. 基于萤火虫优化算法的微网源-荷博弈模型及分析[J]. 电力系统自动化, 2014(21): 7-12.
- [17] 刘长平, 叶春明. 一种新颖的仿生群智能优化算法: 萤火虫算法[J]. 计算机应用研究, 2011(28): 3295-3297.
- [18] Chandrasekaran, K., Simon, S.P. and Padhy, N.P. (2013) Binary Real Coded Firefly Algorithm for Solving Unit Commitment Problem. *Information Sciences*, **16**, 67-84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2013.06.022>

- [19] 周淙, 郑柏林, 廖瑞金, 等. 基于粒子群和差分进化算法的含分布式电源配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2013(4): 33-37.
- [20] Kennedy, J. and Eberhart, R.C. (1997) A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm. *Proceedings of Conference on System, Man, and Cybernetics*, 4104-4109. <http://dx.doi.org/10.1109/icsmc.1997.637339>
- [21] 马士聪, 徐丙垠, 高厚磊, 薛永端, 王敬华. 检测暂态零模电流相关性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008(7): 48-52.
- [22] 祝骊伟, 钱洲亥, 沈晓明, 周海飞, 刘凯. 基于 GPS 的无人值守变电站故障设备定位系统研究[J]. 智能电网, 2014, 4(4): 154-162.
- [23] 孙波, 薛永端, 孙同景, 等. 架空线路小电流接地故障电流信息获取新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 74-78.
- [24] Aggarwal, R.L., Aslan, Y. and Johns, A.T. (1997) An Interactive Approach to Fault Location on Overhead Distribution Lines with Load Taps. *Developments in Power System Protection*, 25-27 March 1997, Conference Publication No. 434, 184-187.
- [25] Das, R., Sachdev, M.S. and Sidhu, T.S. (2000) A Fault Locator for Radial Subtransmission and Distribution Lines. *IEEE*, 443-448. <http://dx.doi.org/10.1109/pess.2000.867627>
- [26] 郑州, 吕艳萍, 王杰, 等. 基于小波变换的双端行波测距新方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 203-207.
- [27] 季涛, 薛永端, 孙同景, 等. 配电线路行波故障测距初探[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 66-71.
- [28] 韩志锟, 饶曙勇, 姜玉山, 等. 基于能量比法的输电线路行波故障测距[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 216-220.
- [29] 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.
- [30] 齐郑, 郑朝, 杨以涵. 谐振接地系统单相接地故障区段定位方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 77-80.
- [31] 孙波, 孙同景, 薛永端, 等. 基于暂态信息的小电流接地故障区段定位[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 52-55.
- [32] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 基于粗糙集理论的配电网故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 73-77.
- [33] 孙雅明, 吕航. Petri 网和冗余纠错技术结合的配网故障区段定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 61-67.
- [34] 郭壮志, 吴杰康. 配电网故障区间定位的仿电磁学算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 34-40.
- [35] 朱玲玲, 张华中, 王正刚. 基于小波神经网络单相断线故障选线和定位[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 12-17.