



# 小电流接地故障

## 选线与定位技术

庞清乐 著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



# 小电流接地故障

## 选线与定位技术



策划编辑：董亚峰

责任编辑：夏平飞

封面设计：一克米工作室



ISBN 978-7-121-11529-5



9 787121 115295 >

定价：28.00元

本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书。

内容简介

# 小电流接地故障 选线与定位技术

庞清乐 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

http://phei.com.cn

服务热线：(010) 88528888

印 3000册  
定 28.00元  
开 850×1168  
北京海淀区中关村大街25号  
出版发行：电子工业出版社  
社址：北京海淀区中关村大街25号  
责任编辑：夏平  
封面设计：李燕

中国标准书号：CIP 2010·第12118号

定价：IV ① 21.00元

I. ① 庞... II. ① 庞... III. ① 小电流接地故障... IV. ① D712.3

ISBN 978-7-121-12592-8

2010.8

小电流接地故障选线及定位技术 / 庞清乐著. — 北京：电子工业出版社，2010.8

图书在版编目(CIP)数据

选线及定位技术 / 庞清乐著. — 北京：电子工业出版社，2010.8

内容全部

## 内 容 简 介

本书在分析小电流接地故障稳态和暂态特性的基础上,系统地介绍了各种故障选线和定位方法,尤其是基于智能算法的小电流接地故障选线和定位方法。主要内容包括基于故障暂态特征信息的智能选线方法、基于故障暂态和稳态特征信息的智能融合选线方法和基于暂态特征信息的小电流接地故障定位方法。其中,以基于智能算法的选线和定位方法为主,介绍了基于粗糙集信号增强的小波包选线方法、基于粗糙集的融合选线方法、基于神经网络的融合选线方法、基于粗糙集预处理的神经网络融合选线方法、基于复合导纳的小电流接地故障定位方法和基于 Multi-Agent 的智能配电网的故障定位方法等作者的创新性研究成果。

本书可作为从事小电流接地故障选线和定位技术研究和应用的科技人员的参考书,也可作为高等学校研究生学习继电保护、电力系统运行与控制 and 智能配电网的教学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

小电流接地故障选线与定位技术 / 庞清乐著. —北京: 电子工业出版社, 2010.8

ISBN 978-7-121-11529-5

I. ①小… II. ①庞… III. ①小电流接地—故障诊断 ②小电流接地—故障定位 IV. ①TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 151138 号

策划编辑: 董亚峰

责任编辑: 夏平飞

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 850×1 168 1/32 印张: 7 字数: 179 千字

印 次: 2010 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 2 000 册 定价: 28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlt@phei.com.cn](mailto:zlt@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

## 序 言

自愈是实现智能电网安全可靠运行的主要功能之一，配电网故障的快速、可靠检测是实现自愈功能的基础。配电网发生单相接地故障的概率很高，由于我国中压配电网大多采用小电流接地方式，一旦发生单相接地故障，很难查找故障线路和故障点，小电流接地故障选线和定位是一个迄今为止并未彻底解决的难题。随着传统电网向智能电网的发展，小电流接地故障自动选线和定位技术变得尤为重要。本书主要从两个方面对小电流接地故障进行了探讨和研究。

一方面，在研究近年来各种选线方法的基础上，提出了利用粗糙集理论和神经网络等智能算法实现小电流接地故障选线的方法；另一方面，在研究近年来各种定位方法基础上，提出了复合导纳的小电流接地故障定位方法，并在分析智能配电网功能的基础上对智能配电网故障定位的关键技术进行了初探。

本书共分 9 章。第 1 章为概述，第 2 章为小电流接地系统单相接地故障特征分析，第 3 章至第 6 章给出了基于智能算法小电流接地故障选线方法，第 3 章为基于故障暂态特征信息的智能选线研究，第 4 章为基于故障暂态和稳态特征信息的融合选线研究，第 5 章为小电流接地故障选线方法的仿真与现场验证，第 6 章讨论了小电流接地故障选线装置设计，第 7 章至第 9 章给出小电流接地故障定位方法，第 7 章为基于暂态特征信息的小电流接地故障定位方法研究，第 8 章为小电流接地故障定位方法的仿真与试验验证，第 9 章主要讨论了智能配电网故障定位关键技术初探。

本书的研究工作得到国家自然科学基金（50777040，60970105）、中国博士后科学基金（20090461204）、山东省自然科

学基金（Z2006F05，Y2007G26）、山东省博士后创新项目专项资金（200903066）、山东省高等学校科技计划（J09LG09）和烟台市科技发展计划（2008159）等项目的资助。

参加研究工作的还有杨福刚博士、孙波博士、高文博士、闫龙博士、初永丽老师、张勇老师、孙静老师、金杰老师等，在此一并致谢！

另外要特别致谢孙同景教授、高厚磊教授、华臻教授、朱智林教授、刘成印教授等，感谢他们为本书写作所提供的帮助和支持。

本书可作为从事小电流接地故障选线定位技术研究和应用的科技人员的参考书，也可作为高等学校研究生学习继电保护的教学参考书。

由于撰写时间和作者水平之限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

作者

2010.05.10

# 目 录

<b>第 1 章 配电网概述</b> .....	1
1.1 配电网概况 .....	1
1.2 小电流接地故障选线现状及评价 .....	3
1.2.1 被动式选线方法 .....	4
1.2.2 主动式选线方法 .....	9
1.3 小电流接地故障定位现状及评价 .....	10
1.3.1 被动式定位方法 .....	10
1.3.2 主动式定位方法 .....	14
1.4 小电流接地故障选线存在的问题 .....	16
1.5 小电流接地故障定位存在的问题 .....	17
1.6 人工智能算法在电力系统中的应用 .....	20
1.7 本书内容摘要 .....	22
1.7.1 本书研究的主要工作概述 .....	22
1.7.2 本书的章节安排 .....	25
<b>第 2 章 小电流接地系统单相接地故障特征分析</b> .....	27
2.1 小电流接地系统的中性点接地方式 .....	27
2.1.1 中性点不接地方式 .....	28
2.1.2 中性点经消弧线圈接地方式 .....	28
2.2 小电流接地系统单相接地故障的基波稳态特征分析 .....	29
2.2.1 中性点不接地系统单相接地故障的基波稳态 特征分析 .....	30
2.2.2 消弧线圈接地系统单相接地故障的基波稳态 特征分析 .....	33



2.3	小电流接地系统单相接地故障的暂态特征分析	37
2.4	小电流接地系统单相接地故障的谐波特征分析	41
2.5	小电流接地系统的模量分析	43
2.5.1	基于线路分布参数的高精度复合模网	43
2.5.2	基于 $\pi$ 型电路的故障简化模型及特点	44
2.5.3	小电流接地故障频域特征分析	51
2.6	本章小结	57
<b>第3章 基于故障暂态特征信息的智能选线研究</b>		<b>58</b>
3.1	基于小波包分析的故障选线方法分析	58
3.1.1	小波包基本理论	58
3.1.2	基于小波包分析的故障选线方法原理	63
3.1.3	基于小波包分析的故障选线方法存在的问题	66
3.2	基于粗糙集的信号增强理论	69
3.2.1	暂态零序电流信号的增强	69
3.2.2	粗糙集基本理论	70
3.2.3	基于粗糙集的信号增强信息系统	74
3.3	基于粗糙集信号增强的智能选线实现	75
3.3.1	基于粗糙集的信号增强	75
3.3.2	故障选线实现	78
3.4	本章小结	78
<b>第4章 基于故障暂态和稳态特征信息的融合选线研究</b>		<b>80</b>
4.1	问题的提出	80
4.2	信息融合基本理论	82
4.2.1	信息融合的产生与发展	82
4.2.2	信息融合的功能与层次	83
4.3	信息融合技术在故障选线中的应用	84
4.4	故障测度函数	85





4.4.1	故障测度函数的定义	86
4.4.2	零序电流暂态分量的故障测度函数	86
4.4.3	零序电流有功分量的故障测度函数	88
4.4.4	零序电流五次谐波分量的故障测度函数	90
4.4.5	零序电流基波分量的故障测度函数	92
4.5	基于粗糙集理论的融合选线方法	93
4.5.1	基于粗糙集理论的融合选线原理	93
4.5.2	基于粗糙集理论的融合选线方法实现	95
4.6	基于神经网络的融合选线方法	98
4.6.1	神经网络基本理论	98
4.6.2	基于神经网络的融合选线方法	102
4.7	基于神经网络的融合选线方法改进	105
4.7.1	BP神经网络的局限性及改进	106
4.7.2	基于粗糙集理论的样本归一化方法	108
4.7.3	基于粗糙集样本归一化的神经网络融合选线	112
4.8	本章小结	115
<b>第 5 章</b>	<b>小电流接地故障选线方法的仿真与现场验证</b>	<b>116</b>
5.1	仿真模型及参数	116
5.2	基于故障暂态特征信息的智能选线方法验证	117
5.3	基于故障暂态和稳态特征信息的融合选线方法验证	133
5.3.1	基于粗糙集理论的融合选线方法验证	133
5.3.2	基于神经网络的融合选线方法验证	138
5.4	本章小结	141
<b>第 6 章</b>	<b>小电流接地故障选线装置设计</b>	<b>142</b>
6.1	小电流接地故障选线装置的总体结构	142
6.2	硬件设计	143
6.2.1	数据采集单元	143



6.2.2	数据存储单元	144
6.2.3	DSP 系统	146
6.2.4	FPGA 系统	146
6.2.5	通信端口	146
6.3	软件设计	147
6.4	本章小结	149
<b>第 7 章 基于暂态特征信息的小电流接地故障定位方法研究</b>		<b>150</b>
7.1	暂态 0 模电流特征分析	150
7.1.1	故障点同侧暂态 0 模电流特征分析	150
7.1.2	故障点两侧暂态 0 模电流特征分析	151
7.2	基于复合导纳的小电流接地故障定位方法	153
7.2.1	单一频率 0 模导纳及其不足	153
7.2.2	特征频段内 0 模复合导纳	155
7.2.3	0 模复合导纳应用于故障定位的可行性分析	157
7.2.4	复合导纳法故障定位原理	158
7.2.5	0 模复合导纳法特点	158
7.3	定位方法性能比较	159
7.4	本章小结	162
<b>第 8 章 小电流接地故障定位方法的仿真与试验验证</b>		<b>163</b>
8.1	仿真验证	163
8.2	试验验证	165
8.2.1	试验平台介绍	165
8.2.2	试验验证	166
8.3	本章小结	167



第 9 章 智能配电网故障定位关键技术初探 .....	168
9.1 智能电网概述 .....	168
9.2 智能配电网模型 .....	172
9.3 智能终端单元模型 .....	173
9.4 基于 Multi-Agent 的智能配电网的故障定位技术 .....	175
9.4.1 面向智能配电网的 MAS 结构 .....	175
9.4.2 适用于智能配电网的故障区段定位技术 .....	175
9.4.3 适用于智能配电网的网络重构方法 .....	176
9.4.4 适用于智能配电网的故障诊断方法 .....	177
9.4.5 智能配电网分布式控制方法 .....	177
9.5 智能配电网的通信网络 .....	177
9.6 智能终端单元 ITU 的硬件和软件设计 .....	178
9.7 本章小结 .....	179
附录 现场数据 .....	180
附录 1 竹园站 2004 年 4 月 16 日发生单相接地故障的 部分数据 .....	180
附录 2 竹园站 2004 年 12 月 18 日发生单相接地故障的 部分数据 .....	182
附录 3 清濛变 2005 年 5 月 18 日发生单相接地故障的 部分数据 .....	184
附录 4 清濛变 2005 年 9 月 30 日发生单相接地故障的 部分数据 .....	186
附录 5 潮湖变 2005 年 9 月 30 日发生单相接地故障的 部分数据 .....	188
参考文献 .....	190

# 第1章 配电网概述

国内外中压配电网中性点广泛采用小电流接地方式，以避免发生单相接地故障时跳闸造成供电中断。对于小电流接地故障，由于故障电流微弱、电弧不稳定和随机因素影响等原因，接地故障选线和定位比较困难，一直缺乏可靠的故障选线方法和高准确度的小电流接地故障选线和定位装置，至今许多变电站仍然使用人工拉路方法查找故障线路。随着人们对配电网自动化水平要求的提高，小电流接地故障自动选线和定位问题更加突出，迫切需要从根本上予以解决。

本章重点论述了小电流接地故障选线和定位技术现状及评价，并指出了小电流接地故障选线和定位技术存在的问题。

## 1.1 配电网概况

电力系统中性点接地方式可划分为两大类：大电流接地方式（中性点有效接地方式）和小电流接地方式（中性点非有效接地方式）。在大电流接地方式中，主要有中性点直接接地和中性点经低电阻、低电抗或中电阻接地；小电流接地方式主要有中性点经消弧线圈接地、中性点不接地和中性点经高电阻接地等。

世界各国以及各地区配电网中性点接地方式都不尽相同，主要是根据自己的运行经验和传统做法来确定的。美国中压电网以大电流接地方式为主，在22~70kV电网中，中性点直接接地方式占72%。英国电网采用中性点经低电阻接地方式，而对33kV以下由架空线路组成的配电网，中性点逐步由直接接地改为消弧线圈接地；电缆组成的配电网，仍采用中性点经低电阻接地方式。日



本东京电力公司 66kV 配电网采用中性点经电阻接地或消弧线圈接地；6.6kV 电网采用不接地方式。法国电力公司（EDF）在 1990 年前后开始对中压电网中性点接地方式进行改造，将运行了 30 多年的大电流接地方式全部改为谐振接地方式。芬兰全国 10kV、20kV 中压电网都采用小电流接地方式，中性点不接地方式和中性点经消弧线圈接地方式各占 80% 和 20%。德国、前苏联等国家也多采用消弧线圈接地或不接地方式。

我国 6~66kV 配电网多数为小电流接地方式，其中 66kV 和 35kV 电网主要采用中性点经消弧线圈接地方式；6~10kV 电网部分采用中性点不接地方式，部分采用中性点经消弧线圈接地方式。个别地区如上海、北京、广州等城市电网采用低电阻接地方式。就小电流接地方式的优越性和世界各国所采用的中性点接地方式以及发展趋势来看，中性点采用小电流接地方式仍是一种典型的、有竞争力的接地方式，不会被大电流接地方式取代。在中国，至少在较长的一段时间内，小电流接地方式仍将占主要地位。小电流接地系统使配电网结构复杂，故障选线与定位成为一个公认的难题；随着传统电力网向智能电网的转变，实现智能电网的自愈功能所需的故障快速、可靠地检测和定位极为重要，因此研究小电流接地系统的故障选线和定位技术具有重要而深远的意义。

小电流接地系统的故障绝大多数是单相对地短路故障。小电流接地系统的发生单相接地故障时，由于大地与中性点之间没有直接的电器连接或串接了电抗器，因此短路电流很小，保护装置不需要立刻动作跳闸，从而提高了系统运行的可靠性。尤其在瞬时故障条件下，短路点可以自行灭弧、恢复绝缘，不需要运行人员采取什么措施，这对于减少用户短时停电次数具有积极的意义。但是，小电流接地系统的发生单相接地故障时，非故障相对地电压升高，在发生间歇性弧光接地时，能够引起弧光过电压，系统绝缘受到威胁，容易扩大为相间短路。因此应尽快找到故障线路和故障地点，排除故障。为了确定故障线路，传统的方法是通过

检测母线上零序电压的数值来判断是否发生单相接地故障，若发生接地故障，则采用人工逐条线路拉闸的方法判断哪条线路出现故障。当故障线路被断开时，接地故障指示消失，这样就可以确定故障线路。然后，通过人工巡检方法查找故障地点。人工拉路的方法使正常线路也会瞬间停电；若自动重合闸动作不成功，停电时间将延长；拉路还会对电网形成冲击，容易产生操作过电压和谐振过电压，可能引起断路器或PT损坏；对于无人值班变电站，需远方遥控操作，更增加了事故的危险性和设备的负担。

综上所述，小电流接地系统单相接地故障选线与定位技术将对提高供电可靠性、提高供电部门和用户的经济效益和维护电网设备，具有重要的意义。尽管每年都有新的选线和定位装置投入运行，且新的选线和定位技术也层出不穷，但是，小电流接地系统故障选线与定位技术是多年来一直未能很好解决的一个难题，在实际应用中还存在不少问题，现有的小电流接地故障选线和定位装置的准确度依然很低，很多供电部门仍在使用拉路法确定故障线路，采用人工巡检方法进行故障定位。随着人们对配电网自动化水平要求的提高，小电流接地故障自动选线和定位问题更加突出，迫切需要从根本上予以解决。因此研究自动选线和定位技术并研制相应的装置，具有很强的实用价值，市场需求也是非常广泛的。

## 1.2 小电流接地故障选线现状及评价

20世纪80年代以来，随着微机技术的不断成熟，多种微机在线自动选线装置被研制开发出来，目前国内生产选线装置的厂家达到几十家。虽然各厂家都宣称自己的装置选线准确，但从用户方面返回的意见却是选线效果普遍不好。某地区供电局对自动选线装置的使用情况进行过统计，发现该局共安装选线装置170台，



因选线效果极差退出运行 146 台，退出率达 86%。在其他地区调查的情况也基本类似，这说明选线技术目前并不成熟。

小电流接地故障选线的主要任务是选择故障线路。现有故障选线原理，按照利用信号方式不同可分为主动式与被动式。主动式方法需向电网注入信号，而被动式方法则利用接地故障产生的电压、电流信号。被动式又可分为利用故障稳态信息、暂态信息以及同时利用稳态和暂态信息三大类。

### 1.2.1 被动式选线方法

#### (1) 基于故障稳态信息的选线方法

##### 1) 零序电流幅值法

利用中性点不接地系统故障线路工频零序电流幅值比健全线路大的特点，选择工频零序电流幅值超越一预设门槛的线路或者选择零序电流幅值最大的线路为故障线路。也可将故障后线路的零序电流与自身对地电容电流作幅值比较，选择有变化的线路为故障线路。

这种选线方法检测灵敏度较低，除了不能排除电流互感器 (TA) 不平衡影响和不能检测母线接地故障外，还受系统运行方式、线路长短和过渡电阻大小等许多因素的影响，从而导致误选、多选、漏选。从整定方式上看，这种整定方式可能导致死区，不能满足系统多变的情况。

##### 2) 零序电流比相法

利用中性点不接地系统故障线路工频零序电流方向与健全线路相反的特点，选择与其他线路电流相位相反的线路为故障线路。

这种选线方法在经大电阻接地或线路较短时，零序电压、零序电流均较小，容易产生“时钟效应”使相位判断困难，而受电流互感器不平衡电流、受过渡电阻大小、继电器工作死区及系统运行方式的影响，容易发生误判，并且不能适应谐振接地时完全



补偿、过补偿运行方式，检测可靠性受接地电弧不稳定的影响。

### 3) 零序电流群体比幅比相法

其原理是先进行零序电流比较，选出几个幅值较大的作为候选，然后在此基础上进行相位比较，如果某条线路方向与其他线路不同，则其为故障线路，如果所有零序电流同相位，则为母线故障。该方法是中性点不接地系统的常用选线方法，被大多数选线装置所采用。

该方法在一定程度上解决了前两种方法存在的问题，但同样不能排除电流互感器不平衡电流及过渡电阻大小的影响。

### 4) 零序无功功率方向法

利用中性点不接地系统故障线路零序电流相位滞后零序电压 $90^\circ$ 、而健全线路超前 $90^\circ$ 的特点，选择无功功率小于零（流向母线）的线路为故障线路。该方法也是比较传统的方法，在欧洲应用较为广泛。

该方法也是利用了容性电流的幅值与方向，所以从本质上，无功功率法与比幅比相方法如出一辙，两者的优缺点是一致的。

### 5) 最大 $I\sin\varphi$ 或 $\Delta(I\sin\varphi)$ 法

利用一中间参考正弦信号，通过检测母线电压确定发生故障后，首先依次检测各出线零序电流落后母线电压的相角关系，由此再把所有线路故障前后的零序电流都投影到故障线路的零序电流 $I_{0f}$ 的理论方向上，然后计算各出线故障前后的投影值之差 $\Delta I_{0k}$ ，找出差值最大的 $\Delta I_{0k}$ ，即最大的 $\Delta(I\sin\varphi)$ 。若 $\Delta I_{0k} > 0$ ，则线路 $k$ 为故障线路，否则为母线故障。

此法的本质是寻求最大无功功率突变量的代数值，从理论上基本消除了CT不平衡的影响，但也有两个缺陷：首先，计算过程中需要取一参考信号，若该信号出现问题，将造成该算法失效；其次，计算过程中需要求出有关向量的相位关系，计算量很大。

方法1)~5)共同的特点是只适用于中性点不接地系统，而不适用于中性点经消弧线圈接地系统。为克服此缺点，可使用以





下几种方法。

### 6) 零序电流有功分量或有功功率法

电网线路、特别是消弧线圈串/并联的非线性电阻将产生一定有功电流且不能被消弧线圈补偿。故障线路零序电流有功分量或有功功率比健全线路大且流向相反，利用该特征可选出故障线路。因为该方法的故障信息同样是不够突出，受 CT 不平衡、线路长短、过渡电阻大小的影响也较大，并且由于三相电容不平衡引起的“虚假有功电流分量”对有功分量算法的影响较大。

### 7) DESIR 法

故障后从所有出线中的零序电流中提取基波有功分量，计算出故障点残余有功电流，将每一出线零序电流在故障点有功电流垂直轴上进行投影比较，故障馈线零序电流的投影与其他非故障馈线零序电流的投影不仅相位相反，而且数值最大，据此便可检出故障馈线。该方法是有功分量方法的改进，优点是不需要零序电压信号。缺点是对零序电流的精度要求很高，一般 TA 不易满足。

### 8) 五次谐波法

故障点和线路设备等非线性因素会产生谐波电流，其中以五次谐波分量为主。由于消弧线圈是按基波整定的，消弧线圈对五次谐波的补偿作用仅相当于工频时  $1/25$ 。因此一般条件下故障线路的五次谐波电流比非故障线路的大且方向相反，根据比幅比相法便可以确定故障线路。接地电流中的谐波分量较小（一般小于 10%），不利于检测，且负荷中的五次谐波源、CT 不平衡电流和过渡电阻的大小，都会在一定程度上影响选线结果。

### 9) 各次谐波综合法

将零序电流 3、5、7 等多次谐波分量求和后再根据五次谐波理论进行选线。虽然能一定程度上克服单次谐波信号小的缺点，却不能从根本上解决问题。