

# 中性点 非有效接地系统 行波故障测距技术

季涛◎著

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 中性点非有效接地系统 行波故障测距技术

季 涛 著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书是一本涉及中性点非有效接地系统线路故障检测原理与技术的专业书籍,用简明的语言演绎行波故障测距的基本原理和关键技术。既是一本理论著作,又可作为教材使用。本书分析了中性点非有效接地系统线路故障暂态行波的模量特征以及故障行波在配电线路中的传播特性;提出了中性点非有效接地系统行波故障测距新算法,并首次提出利用配电变压器获取故障暂态行波的新方法;详细研究了各种行波测量互感器的暂态行波传递特性,为现场有效提取故障行波信号提供理论依据。书中解决了中性点非有效接地系统行波故障测距的诸多关键技术问题,并通过大量现场试验,验证了本技术的可行性和有效性。

本书可供有电力系统自动化理论基础的技术人员阅读,也可作为高等学校本科生和研究生的选修教材及参考书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

中性点非有效接地系统行波故障测距技术/季涛著. —北京:北京理工大学出版社, 2008.7

ISBN 978-7-5640-1608-1

I. 中… II. 季… III. 中性点接地-接地系统-应用-输配电线路-测距 IV. TM726

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第070885号

---

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京地质印刷厂

开 本/880毫米×1230毫米 1/32

印 张/5

字 数/131千字

版 次/2008年7月第1版 2008年7月第1次印刷

印 数/1~3000册

定 价/25.00元

责任校对/申玉琴

责任印制/周瑞红

---

图书出现印装质量问题,本社负责调换

## 前 言

本书是一本涉及中性点非有效接地系统行波故障测距原理与技术的专业书籍。既是一本理论著作，又可作为教材使用。书中用简明的语言演绎暂态行波故障测距原理与技术在中性点非有效接地系统中应用的基本思想和基本原理，分析了中性点非有效接地系统单相接地故障、短路故障暂态行波模量特征以及故障行波在线路中的传播特性；提出了适用于架空线、电缆混合线路故障测距的双端行波故障测距新原理；提出利用配电变压器获取故障行波的方法，解决了线路末端信号不易获取的难题；分析了各种行波测量互感器的行波传变特性，为获取行波测量信号提供理论依据；阐述了中性点非有效接地系统行波故障测距实际中面临的诸多关键技术问题的解决方案。

本书有以下特点：

(1) 注重全书的系统性和实用性。从对国内外现状的评价，到中性点非有效接地系统行波故障测距的实现原理与方法，到行波故障测距系统的设计以及现场实际试验验证，系统地阐述了适用于中性点非有效接地系统行波故障测距技术的原理与方法。

(2) 在分析各种不同电力介质波速度特性的基础上，得到了适用于多种电力介质并存线路的双端行波故障测距原理与方法。

(3) 详细分析了暂态行波在线路末端的折射、反射规律，提出了适用于不同结构配电线路故障测距的三种故障测距模式。

(4) 研究了配电变压器以及各种电磁式电压、电流互感器的行波传变特征，得到了各种类型故障暂态行波传变到行波测量互感器二次侧的特征及规律，为提取合适的故障行波提供理论依据，并可以利用检测到的故障行波特征实现故障选相。

(5) 开拓了暂态行波故障测距技术的新的应用领域, 提出了一系列故障暂态行波的新的原理与分析方法, 丰富了暂态行波保护内容。

本书由孙同景教授主审, 在此深表谢意。本书的编写得到山东科汇电力自动化有限公司的大力协助, 并得到许多师长、朋友和同事的鼓励和支持, 在这里, 对他们致以衷心的感谢。

由于作者水平所限, 书中难免有不妥和错误, 恳请读者批评指正。

季 涛

# 目 录

▼ 第 1 章 绪论 .....	1
1.1 课题背景及意义 .....	1
1.2 小电流接地系统故障定位现状及评价 .....	2
1.2.1 主动式故障定位方法 .....	3
1.2.2 被动式故障定位方法 .....	6
1.3 本书的主要工作及章节安排 .....	14
1.3.1 本书主要工作 .....	14
1.3.2 本书章节安排 .....	17
▼ 第 2 章 配电线路故障行波暂态特征分析 .....	19
2.1 行波基本理论 .....	19
2.1.1 行波的基本概念 .....	19
2.1.2 波速度与波阻抗 .....	23
2.1.3 行波的折射与反射 .....	24
2.1.4 行波在传输过程中的衰减 .....	25
2.2 配电线路故障行波模量分析 .....	27
2.2.1 模量分析基本原理 .....	27
2.2.2 单相接地故障行波模量分析 .....	30
2.2.3 短路故障行波模量分析 .....	34
2.3 行波在混合线路中的传播特性 .....	35
2.4 行波在线路分支处的传播特性 .....	38
2.5 本章小结 .....	39

第3章 配电线路行波故障测距实现方法	41
3.1 现代行波故障测距基本原理	41
3.1.1 D型双端行波测距原理	41
3.1.2 A型单端行波测距原理	42
3.1.3 E型单端行波测距原理	44
3.1.4 F型单端行波测距原理	45
3.2 配电线路行波故障测距原理的确定	46
3.3 基于时间中点的双端行波故障测距新方法	47
3.4 利用故障行波线模分量实现测距	49
3.4.1 模行波分量特性分析	49
3.4.2 利用行波线模分量实现测距	52
3.5 线路末端行波测量信号的选择	53
3.5.1 行波在线路末端的反射规律	53
3.5.2 三种双端行波故障测距模式的提出	55
3.6 本章小结	56
第4章 配电变压器行波传变特性研究	57
4.1 利用配电变压器获取行波信号的重要性	57
4.2 故障测距用行波信号分析	58
4.2.1 行波特征频段的确定	58
4.2.2 行波有效传变对测量互感器的要求	58
4.3 变压器行波传变特性分析模型	59
4.4 配电变压器行波传变特性研究	61
4.4.1 变压器行波传变特性分析	61
4.4.2 变压器二次输出上升时间对测距的影响	64
4.4.3 变压器行波传变性能验证	65
4.5 三相配电变压器行波传变特征分析	66
4.5.1 三相配电变压器行波传变特征分析	66
4.5.2 三相变压器低压侧测距信号的选择	73

4.5.3 三相配电变压器行波传变特征验证	73
4.6 本章小结	75
<b>第5章 配电线路行波测距关键技术研究</b>	76
5.1 行波信号的获取方式研究	76
5.1.1 一般配电线路行波信号获取方式	76
5.1.2 特殊配电线路行波信号获取方式	77
5.2 故障类型的快速识别	83
5.2.1 利用TA记录的波形识别故障类型	83
5.2.2 利用TV记录的波形识别故障类型	86
5.2.3 利用变压器记录的波形识别故障类型	87
5.3 超高速数据连续采集技术	88
5.3.1 目前行波数据记录方式及存在的问题	88
5.3.2 超高速数据连续采集技术	91
5.4 GPS精确时钟同步技术	92
5.5 行波测距系统数据通信方案	94
5.5.1 通信问题的解决方案	94
5.5.2 无线GPRS技术的应用	96
5.6 故障测距可靠性的提高	98
5.6.1 影响故障测距可靠性的因素	98
5.6.2 故障测距可靠性的提高	100
5.7 故障测距精度的提高	103
5.7.1 行波波头到达时间的确定依据	103
5.7.2 波头起始点的准确识别	105
5.8 多分支线路故障测距	108
5.9 本章小结	110
<b>第6章 仿真验证</b>	112
6.1 仿真模型及参数	112



6.2	行波特征不受系统运行方式影响的验证 .....	114
6.3	行波各模分量特征仿真 .....	115
6.4	单相接地故障测距仿真 .....	116
6.5	短路故障测距仿真 .....	119
6.6	分支线路故障测距仿真 .....	120
6.7	本章小结 .....	122
▼ 第7章 行波故障测距试验系统及现场验证 .....		
7.1	配电线路行波故障测距试验系统 .....	123
7.1.1	系统构成 .....	123
7.1.2	系统工作原理 .....	125
7.1.3	行波分析功能描述 .....	126
7.2	配电变压器用作行波测量互感器的验证 .....	127
7.3	配电线路行波故障测距试验系统运行分析 .....	129
7.3.1	人工故障试验及结果 .....	129
7.3.2	电压互感器行波传变特征验证 .....	133
7.3.3	试验结果分析及改进措施 .....	133
7.3.4	现场实际运行数据统计 .....	134
7.3.5	测距系统改进后的试验效果 .....	136
7.4	本章小结 .....	139
▼ 第8章 结论及展望 .....		
8.1	研究过程所取得的主要结论 .....	141
8.2	研究展望 .....	143
▼ 参考文献 .....		

# 第1章

## >>>>> 绪论

### 1.1 课题背景及意义

电力系统中性点是否接地及以何种形式接地，是涉及技术、经济、安全等多个方面的综合问题。目前处理方式主要有：直接接地、电抗接地、低阻接地、高阻接地、消弧线圈接地（又称谐振接地）和不接地。前三种称为大电流接地系统，后三种称为小电流接地系统<sup>[1]</sup>。

由于历史原因和具体条件迥异，各个国家配电网中性点处理方式不尽相同，甚至同一国家、同一地区的同一电压等级的电网也有不同接地方式并存的现象。我国3~66 kV的中压配电网大多采用中性点不接地或经消弧线圈接地的运行方式（统称小电流接地系统）。

中压配电网多存在架空线、电缆混合线路，还存在分支线路，网络结构复杂，线路故障中绝大部分是单相接地故障。在小电流接地运行方式下，由于单相接地故障（俗称小电流接地故障）电流微弱，系统可在故障发生后继续运行一定时间，因此，小电流接地运行方式可显著提高供电可靠性，同时也具有对通信系统干扰小等优点。但长期带故障运行，特别是间歇性弧光接地故障时，过电压（特别是弧光过电压）容易使电力设备出现新的接地点，从而使事故扩大；同时，故障电流可能使故障点永久烧坏，最终引起短路故障<sup>[2]</sup>。当线路发生相间短路故障时，线路出现过电流，继电保护装置动作，断路器跳闸，造成线路停电事故。因此，小电流接地系统线路故障发生后，快速准确定位出单相接地故障及短路故障点对于提高配电网供电

可靠性、减少停电损失有重要意义。

小电流接地系统单相接地故障是发生几率最高的故障类型，由于故障电流微弱、故障电弧不稳定等原因<sup>[3-6]</sup>，其故障点的定位比较困难。长期以来，尽管已经提出许多检测方法并研制了检测装置，但实际运行效果并不理想<sup>[7]</sup>。时至今日，许多地方仍然采用人工巡线的方法查找故障位置，大大浪费了人力物力。对于线路相间短路故障，由于伴随过流现象，一般比较容易定位故障点，但目前方法多不具有故障自动定位功能，故障后仍然需要人工沿线查找故障点。本课题即致力于小电流接地运行方式的配电网单相接地故障以及短路故障自动定位原理、方法的研究。

## 1.2 小电流接地系统故障定位现状及评价

当线路发生短路故障时，由于故障特征明显<sup>[8]</sup>，检测原理简单，利用线路故障点前出现过电流，而故障点后不存在过电流的现象就可以实现故障点的定位。

目前主要有两种实用方法实现短路故障定位：

(1) 实现配电自动化 (FA)，利用线路负荷开关处装设的 FTU 实现故障分段定位。文献 [8] 提出通过线路 FTU 检测，测量 TA 二次电流是否出现间断角，以判断线路过流故障，并将检测结果送至 SCADA 系统，系统主站根据各 FTU 上报信息，利用相应的故障定位算法确定故障所在区段<sup>[9]</sup>。对于利用 FTU 实现线路故障定位，只适合于实现了配网自动化的地区，但实现配网自动化造价太高，限制了此方法的大面积使用。

(2) 沿线悬挂故障指示器，根据故障点前后指示器检测信息的不同实现故障分段定位<sup>[10,11]</sup>。文献 [10] 给出了利用故障指示器检测短路故障的故障启动条件，即突增电流应大于允许的过负荷电流，而小于线路末端的短路电流，同时还必须具备继电保护装置动作最短或最长时间内电流突降为零。文献 [11] 介绍了根据故障电流幅值

大于正常情况电流幅值的现象,以实现电缆线路故障定位的一种故障指示器。利用故障指示器实现线路短路故障的定位,具有成本低,安装方便的优点,但目前的故障指示器不具有故障信息自动上报功能,故障后需要根据线路上故障指示器的指示状态,人工沿线查找故障所在区段,费时费力。现在有人也提出设计具有信息自动上报功能的故障指示器,但增加通信功能后,故障指示器的成本将会大大增加,从而限制其大面积推广应用。

配电网小电流接地故障发生几率最高,且故障定位困难。目前对于小电流接地系统故障定位的研究也大多集中在单相接地故障定位方面<sup>[12]</sup>。

对于小电流接地故障点的定位,许多学者做了大量研究,按照定位利用的信号方式不同可分为主动式故障定位方法和被动式故障定位方法两大类。主动式故障定位方法是在线路故障发生后向系统注入特定信号,根据相应的定位原理确定故障位置<sup>[13]</sup>;被动式故障定位方法则是利用线路故障前后线路本身电压、电流信号特征的变化设计定位判据,确定故障位置。

### 1.2.1 主动式故障定位方法

#### 1. 注入信号寻迹法

注入信号寻迹法简称注入法,是在故障发生后,通过母线 PT 向接地线路注入特定频率的电流信号,注入信号会沿着故障线路经接地点注入大地,用信号探测器检测每一条线路,有注入信号流过的线路为故障线路。选出故障线路后,手持探测器沿线查找,利用信号寻迹原理即可确定故障点的位置<sup>[14]</sup>。

该方法的优点是不受消弧线圈的影响,不要求装设零序电流互感器,适合于线路上只安装两相电流互感器的系统。其缺点在于:注入信号的强度受 TV 容量限制;接地电阻较大时,线路上分布电容会对注入的信号分流,给故障定点带来干扰;如果接地点存在间歇性电弧现象,注入的信号在线路中将不连续,给检测带来困难。该方法寻找

故障点花费时间较长,有可能在此期间引发系统的第2点接地,造成线路自动跳闸。

不少电力部门要求在系统出现单相接地时选出接地线路后立即停电,在停电状况下进行接地点定位。针对此种情况,文献<sup>[15]</sup>在基于注入信号电流定位法的基础上,提出了“直流开路,交流寻踪”的离线故障定位新方法。考虑到线路停电后绝缘可能恢复,该方法首先通过外加直流高压使接地点处于保持击穿状态,然后注入交流检测信号,通过寻踪注入的交流信号找出故障的准确位置。此种方法需要制造大功率的一次设备,成本太高,且不适合于长距离的线路。

## 2. 中电阻法

中电阻法是在接地故障发生后,人为地在系统中性点投入一定值电阻,在故障线路故障相与系统母线间形成一人为的故障工频电流,故障线路故障点上游可以检测到此故障电流,而故障点下游和非故障线路检测不到此故障电流,通过检测工频电流突变量就可以实现线路接地故障的定位<sup>[16]</sup>。

利用中电阻法实现单相接地故障检测的原理,如图1-1所示,系统正常工作时,真空接触器K处于断开状态,并联电阻 $R_b$ 不投入系统。对于瞬时接地故障,由于消弧线圈的灭弧作用,系统可自动恢复正常;对于永久性接地故障,在经过一定延时后,按一定规律投切并联的电阻(可投入3次,每隔2s投入一次,每次投入1s后自动断开)。并联电阻投入后,将产生阻性电流,该电流主要流经故障线路故障相的故障点与母线间,且按并联电阻的投切规律变化。故障点上游可以检测到此有规律变化的信息,而故障点下游检测不到此变化信息,从而确定出故障点的位置。

该方法人为地增大了接地故障电流,使得接地点容易检测,目前与消弧线圈配合使用,得到了比较理想的效果。但该方法所需的中性点电阻设计困难,所需投资较高,增大了系统安全隐患和对通信系统的干扰,也不利于人身安全。

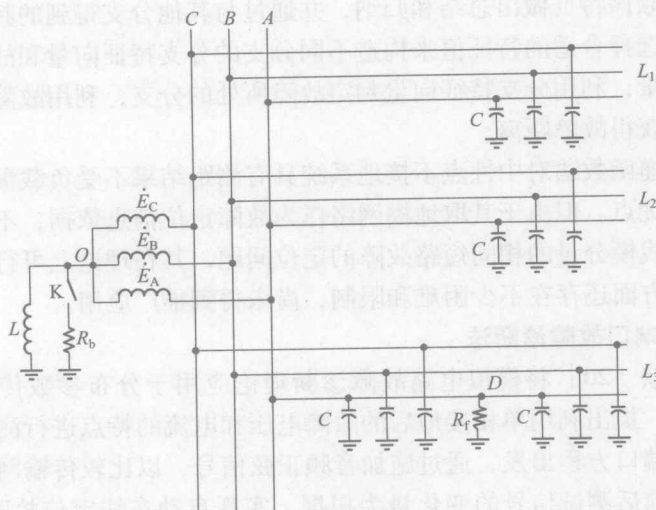


图 1-1 中性点经消弧线圈并联电阻接地示意图

### 3. 加信传递函数法

文献 [17] 提出在故障线路出线处加方波诊断信号, 根据故障后电路拓扑结构的变化, 用频域分析进行定位的单端测距算法。该方法基于频谱分析的原理和线路的分布参数模型, 从线路首端施加方波激励信号源, 在首端测量时域为零序电压和电流数据, 计算得到频域传递函数, 根据各分支端口传递函数频谱的频率、相位和波形特征实现接地故障定位。

文献 [18] 详细推导了三相配电网接地故障定位的传递函数表达式, 并给出了依据传递函数波形的频率、相位和幅值特征进行故障定位的判据。

为了实现多分支线路的故障定位, 文献 [19] 在利用系统传递函数作为故障分析的基本方法的基础上, 提出了解决多分支配电网接地故障定位的特征向量法。这种方法通过数字信号处理手段获得传递函数频谱特性, 结合对网络结构以及波过程的分析, 对一个分支的传

递函数频谱特征做出总结和归纳,并与其他分支得到的频谱特征比较,选择合适的特征值来构造不同分支的分支特征向量和故障距离特征向量,利用分支特征向量判定故障所处的分支,利用故障距离特征向量获得故障距离。

传递函数法对中性点不接地系统具有测距结果不受负载参数变化影响的优点。但由于其取地模网络作为故障定位信息依据,不能解决只存在线模分量的相间短路故障的定位问题,其在理论上可行,但在实用化方面还存在不少困难和限制,尚未得到推广应用。

#### 4. 端口故障诊断法

文献[20]将模拟电路故障诊断理论应用于分布参数传输网故障诊断,提出利用单相接地后的故障电压和电流的特点进行测距和定位,从端口方程出发,通过施加音频正弦信号,以比较传输网可测端口故障前后测试信号的变化量为根据,实现自动在线定位故障分支。文献[21]详细描述了端口故障诊断法的原理及算法。端口故障诊断法的优点是故障诊断测后工作量小,适用于较大网络的故障诊断,缺点是分支上的故障点位置只能归结为分支与主支的连接点,确切的故障距离无法确定,且采用线路两侧信息,需要数据通信,实用性不强。

### 1.2.2 被动式故障定位方法

#### 1. 阻抗法

阻抗法故障测距原理是假定线路参数单一,在不同故障类型条件下计算出的故障回路阻抗或电抗值与测量点到故障点的距离成正比,从而通过计算故障时测量点的阻抗或电抗值除以线路的单位阻抗或电抗值得到测量点到故障点的距离<sup>[22~26]</sup>。

阻抗法具有投资少的优点,但受路径阻抗、负荷电流、系统运行方式等因素的影响,故障测距误差较大。对于带有多分支的配电线路,阻抗法无法排除伪故障点,它只适合于结构比较简单的线路。

## 2. 零序电流幅值法

小电流接地系统发生单相接地故障时,故障点上游检测到的暂态零序电流的幅值大于其下游检测到的暂态零序电流幅值,通过检测故障点前后暂态零序电流幅值的变化就可以确定出故障位置<sup>[27,28]</sup>。

文献[29]根据配电网结构和各分支点的零序电流大小进行故障分支的定位,其只适用于中性点不接地系统,不适用于中性点经消弧线圈接地系统。

文献[30]、[31]提出利用接地点前后零序电流所产生的磁场大小来确定故障点。发生接地故障时,接地故障点前的线路周围存在由负荷电流产生的垂直磁场和由接地故障电流产生的水平磁场,由于接地故障电流产生的磁场比负荷电流产生的磁场的垂直衰减速度慢,因此,在故障点上游可以检测到接地故障电流产生的磁场,而在故障点下游将检测不到此磁场信息。由于零序电流与电网的分布电容大小与接地方式有关,此方法探测精度不高。国外对此已有研究和应用,如挪威分段悬挂在线路和分叉点上的悬挂式接地故障指示器等,其投资较大,不利于大面积推广。

## 3. 5次谐波法

文献[32]根据故障点前向支路、后向支路和非故障支路的零序电压、零序电流的特点,提出通过测量空间电场和磁场的5次谐波,并分析其幅值和相位关系,从而判断小电流接地系统单相接地故障点。但由于5次谐波幅值较小,不易检测,因此,提高检测装置的灵敏度和抗干扰能力,是其推广应用的关键。

## 4. 暂态无功功率方向法

线路的检测阻抗随频率变化而呈阻容变化,利用某一选择频段的信号作为测量信号(在此频段下线路检测阻抗呈容性),定义暂态无功功率为电压信号的 Hilbert 变换与电流信号在暂态时段内的平均功率<sup>[33]</sup>。

设  $u_0(t)$ 、 $i_0(t)$  为检测点的零模电压特征分量、零模电流特征分量,  $u_0(t)$  的 Hilbert 变换为



$$u_{0h}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^t \frac{u_0(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1-1)$$

则基于暂态零模特征信号的无功功率为

$$Q_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i_0(t) u_{0h}(t) dt = \frac{1}{\pi T} \int_0^T i_0(t) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u_{0h}(\tau)}{t - \tau} d\tau dt \quad (1-2)$$

故障线路故障点上游到母线侧之间满足  $Q_0 > 0$ ，而故障点下游和非故障线路满足  $Q_0 < 0$ ，利用该特征即可对故障区段进行定位<sup>[34]</sup>。

该方法检测效果比较理想，不受系统接地方式的影响。但其需要同时获取暂态零序电压和零序电流信号，而实际中又不容易同时获取这两个信号，从而限制了此方法的推广应用。

### 5. 行波法

人们很早就认识到，通过检测故障线路上暂态行波在母线与故障点之间的传播时间，可以测量故障距离。由于暂态行波的传播速度比较稳定（接近光速），因此行波故障测距方法具有很高的测距精度。

早期行波法利用电子计数器或者阴极射线示波器来测量暂态行波的到达时刻和传播时间<sup>[35,36]</sup>。此法在 20 世纪 50~60 年代期间曾被认为是当时最为理想的故障测距方法，甚至到了 20 世纪 70 年代，日本还有大量的 B、C 型行波故障测距装置在运行<sup>[37]</sup>。由于受当时人们对行波现象的认识水平以及客观技术条件的限制，早期的行波故障测距装置在可靠性、准确性、经济性以及方便性等方面都存在一系列的问题。

20 世纪 70 年代，随着计算机继电保护技术的发展，早期行波法逐渐被阻抗法所取代。20 世纪 90 年代，行波法重新受到瞩目，这就是现代行波测距法。现代行波法是利用各种数字信号处理算法来测量暂态行波的到达时刻和传播时间。严格来讲，现代行波测距法是在 20 世纪 70 年代末和 80 年代所提出的行波距离保护算法的基础上发展起来的，其发展的基础是电力系统电磁暂态计算理论<sup>[38]</sup>和数字信号处理（DSP）技术的发展。这一时期，行波保护和故障测距的研究重点是在 A 型早期行波测距原理的基础上，通过构造各种数字信号