

Jiyu Guzhang Leixing De

Danxiang Jiedi Guzhang Zonghe Xuanxian Yanjiu

# 基于故障类型的 单相接地故障 综合选线研究

梁睿 薛雪 著

继电保护

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

# 基于故障类型的单相接地故障 综合选线研究

梁 睿 薛 雪 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书提出了基于直觉模糊决策的小电流接地故障选线方法,该方法根据故障特征趋向于暂态和稳态的程度来合理确定暂态量和稳态量选线方法的权重,进而对故障特征信息进行融合,全面利用了各种故障信息,提高了选线准确性。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于故障类型的单相接地故障综合选线研究 / 梁睿,  
薛雪著. —徐州:中国矿业大学出版社,2017.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3748 - 4

I. ①基… II. ①梁… ②薛… III. ①电力系统—接  
地保护—故障诊断—研究 IV. ①TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 264377 号

- 书 名 基于故障类型的单相接地故障综合选线研究  
著 者 梁 睿 薛 雪  
责任编辑 王加俊 耿东锋  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpv@cumtp.com  
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司  
开 本 787×960 1/16 印张 8.5 字数 161 千字  
版次印次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷  
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



# 前 言

配电网发生的故障大部分都是单相接地故障。小电流接地系统的故障选线准确性受很多因素影响,因此小电流接地系统的单相接地故障选线问题一直是继电保护领域研究的一个难点。

针对不同中性点接地方式配电网的单相接地故障,本书详细分析了零序电压变化规律及故障暂态零序电流和稳态零序电流的变化规律,建立了电弧型接地故障模型并进行了仿真,将PT断线故障、系统断线故障及铁磁谐振故障引起的零序电压升高与单相接地故障引起的零序电压升高进行比较,得出正确判断单相接地故障发生的方法。

本书提出了消除不平衡电流的有功分量选线方法、基于比较暂态零序电流小波变换模极大值的平方值的选线方法和基于故障零序电流灰色关联分析的小电流接地选线方法三种选线新方法。本书采用一种改进型的傅氏算法来进行各物理量有效值的准确计算,用以消除干扰信号的影响;接地故障的暂态特征蕴含了丰富的故障信息,小波变换能准确地从暂态故障信号中提取出有用的故障信息,本书提出了一种基于比较暂态零序电流小波变换模极大值的平方值的选线判据,扩大了故障支路和非故障支路故障特征的差异;基于暂态零序电流灰色关联分析的小电流接地选线方法是利用非故障线路零序电流和故障线路零序电流的关联程度的强弱来构造故障选线判据的自适应方法。研究表明,单一的选线方法在某些情况下效果明显,但不能适用于所有的故障情形。只有采用多种方法对故障产生的各种信息进行全面的分析和综合运用,才能适应更多的故障情形,提高故障选线的准确性和有效范围。基于多种选线方法的综合选线是提高故障选线范围和准确性的一种很好的思路,也是目前故障选线领域的一个研究前沿。

本书分析了对不同故障的类型进行识别的必要性。综合选线法是利用加权关系法对基于稳态量和暂态量的多种方法进行组合来实现的,而不同单相接地故障的特征有所不同,如电弧型接地和瞬间性接地暂态特征比较丰富,而电阻性接地稳态分量丰富,因此有必要针对不同的故障特征合理地选用相应方法并确定方法权值,以期达到最佳选线效果。本书利用多重分形理论对稳定接地和不稳定接地故障的零序电压进行计算,得出多重分形特征和故障类型的关系。依据不同故障的零序电压多重分形特征可以判断出故障趋向于稳定接地和不稳定

接地的程度,从而为利用加权系数法的多信息融合选线中基于稳态量和暂态量的各方法的加权系数的制定提供了依据。模糊理论是处理复杂不确定问题的方法。本书分析了运用模糊理论实现多判据信息融合选线的方法,同时指出传统模糊理论不能完整表达故障全部信息的不足。直觉模糊集理论是传统模糊集理论的推广,能够更全面地利用故障信息,更好地实现多判据融合选线。

本书提出了基于直觉模糊决策方法的小电流接地故障选线方法,合理地解决了故障选线问题中线路故障特征隶属度、非隶属度的确定问题,并根据故障零序电压多重分形谱计算不同故障特征的权重,解决了以往无法根据故障特征合理分配加权系数的问题。基于直觉模糊信息集成理论的故障综合选线方法,根据故障特征趋向于暂态和稳态的程度来合理确定暂态量选线方法及稳态量选线方法的权重,进而对故障特征信息进行融合,实现综合选线,全面利用了各种故障信息,提高了选线准确性。

本书基于直觉模糊理论的综合选线方法利用上述三种单一选线方法分别确定故障稳态特征、暂态特征和灰色关联特征的隶属度,用零序电压多重分形谱计算得到故障特征的权值进行信息融合,实现综合选线。大量仿真和模拟实验的结果证实了直觉模糊综合选线方法的可靠性和优越性。

本书的出版得到了中央高校基本科研业务费专项资金(2017XKQY033)资助。

著 者

2017年6月

## 目 录

1	绪论	1
1.1	课题的背景及意义	1
1.2	国内外研究现状	1
1.3	小电流接地故障准确选线困难的原因	7
1.4	本书的目标和主要研究工作	10
2	配电网单相接地故障分析	13
2.1	单相接地故障零序电压变化规律	13
2.2	接地故障稳态分析	17
2.3	小电流接地系统单相接地故障暂态过程分析	20
2.4	电弧模型建立	24
2.5	小电流选线装置启动判别	29
2.6	小结	34
3	小电流接地选线方法	35
3.1	消除不平衡电流的有功分量法选线	35
3.2	基于小波分析的暂态零序电流接地故障选线	44
3.3	基于灰色关联分析的接地选线	59
3.4	小结	64
4	基于分形理论的单相接地故障类型辨识	66
4.1	分形理论	67
4.2	基于分形理论的小电流接地系统故障类型识别	71
4.3	小结	76
5	利用直觉模糊的综合选线方法	78
5.1	引言	78
5.2	模糊选线原理	79
5.3	直觉模糊理论和信息集成	80

5.4	基于直觉模糊信息的多属性决策选线方法	85
5.5	小结	97
<b>6</b>	<b>故障选线的仿真与模拟实验</b>	<b>99</b>
6.1	仿真	99
6.2	模拟实验	106
6.3	小结	116
<b>7</b>	<b>结论</b>	<b>117</b>
7.1	主要成果	117
7.2	不足之处和需要进一步研究的问题	118
	<b>参考文献</b>	<b>119</b>

# 1 绪论

## 1.1 课题的背景及意义

在电力系统中,配电系统与电力用户的关系最密切、最直接。配电网量大面广,担负着直接为广大用户供电的任务,随着社会经济的发展,人们对电力的需求日益增长,同时对供电质量提出了更高的要求。因此,当发生故障后要能快速有效地检出、切除、隔离故障,快速恢复供电,保障供电可靠性,以减少故障对供电的影响<sup>[1]</sup>。

我国 3~66 kV 的配电网一般采用中性点不接地或经消弧线圈接地的工作方式。在这种工作方式下,发生单相接地故障时,流过接地点的电流很小,所以常被称为小电流接地系统。

小电流接地系统发生单相接地故障的概率最高,可占到总故障的 80%,但由于故障时三相线电压依然对称,且故障电流很小,不形成短路回路,不影响对负荷供电,因此,当系统发生单相接地故障时,一般要求继电保护能有选择地发出信号,不必马上跳闸,电力系统安全规程规定可以继续运行 1~2 h。但是随着配电网规模的扩大及城网、农网改造的进一步深化,尤其是电缆线路的大量使用,系统电容电流随之增大,长时间接地运行可能会发展成两相短路,也易诱发持续时间长、影响面广的间歇电弧过电压,进而损坏设备,破坏系统安全运行。因此,必须及时找到故障线路并予以切除<sup>[2-5]</sup>。

近年来,国内外学者对小电流接地系统单相接地故障选线问题做了很多研究,也提出了不少方法和选线装置,但现有装置的选线准确率仍然比较低,因此对小电流接地系统故障选线问题进一步研究,有着重要意义。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

在苏联,配电网主要采用中性点不接地方式和中性点经消弧线圈接地方式,对其保护原理的研究给予了很大的重视,发表了多篇论文,并研制出了几代装置,在供电和煤炭行业中得到了应用。保护原理从零序电流过流、零序无功方向



发展到了全体比幅,装置由电磁式继电器、晶体管发展到模拟集成电路和数字电路,而由微机构成的装置较少。

日本在供电、钢铁、化工行业中普遍采用中性点不接地或经电阻接地系统,其选线主要采用基波无功方向法。近年来,日本在获取零序电流信号以及接地点分区段方面做了不少工作,利用光导纤维研制的架空线和电缆零序互感器(OZCT)试验获得成功,同时将神经网络应用到接地保护中。

德国多使用中性点经消弧线圈接地系统,并于 20 世纪 30 年代就提出了反映接地故障开始时暂态过程的单相接地保护原理,研制了便携式接地报警装置。

法国在使用中性点经电阻接地系统几十年后,从 20 世纪 90 年代开始以中性点经消弧线圈接地系统取代中性点经电阻接地系统,其选线方法主要有有功分量法、零序导纳法等。近年来,又提出了利用 Prony 方法和小波变换来提取故障暂态信号中 useful 信息,从而判别该线路是否发生故障。

挪威一公司利用测量空间电场和磁场的相位,反映零序电压和零序电流的相位,研制了一种悬挂式接地故障指示器,分段悬挂在线路和分叉点上。

在美国,小电流接地系统中单相接地保护被认为难于实现,且引起的过电压严重。他们宁愿在供电网架结构上多投资以保证供电可靠性,也不采用小电流接地系统。但是,近年来 IEEE 的专题报告中也认为应当加强小电流接地系统的保护研究<sup>[5-9]</sup>。

### 1.2.2 国内研究现状

我国从 1958 年起就一直对小电流接地系统单相接地故障的选线问题进行研究<sup>[5]</sup>,保护方案从零序过流到无功方向保护,从基波方案发展到五次谐波方案,从步进式继电器到微机群体比幅比相,以及首半波方案等。近些年来对小电流接地选线的研究出现很多新方法,大致来说主要分成两大方向:(1) 在小电流接地系统发生单相接地故障时,利用故障线路与非故障线路稳态零序电流之间在大小、相位等方面存在着区别,也即利用电网单相接地故障稳态分量进行选线,其中主要有群体幅相比较法、零序电流有功分量法、能量法、零序导纳法、五次谐波法、残流增量法、注入法、负序电流法等;(2) 当小电流接地系统单相接地故障发生在相电压最大值附近或发生电弧性接地故障时,除有稳态工频零序电压、零序电流产生外,还有高频暂态信号产生,且这些高频暂态信号中包含许多故障信息,因此利用这些暂态信息也可实现小电流接地系统的单相接地选线。利用暂态信息构成的选线原理和方法主要有首半波原理、特征频带法、小波分析法等<sup>[9]</sup>。现对各种方法的原理和特征进行分析。

#### 1.2.2.1 单相接地故障稳态分量分析的选线原理

##### (1) 群体幅相比较法

零序幅相比较法是通过比较零序电流的大小来实现选线的,因此零序电流互感器变比的一致要求较高。具体方法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<sup>[5]</sup>。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。当电网馈电线路较多,且线路分布较均匀的情况下,故障线路零序电流与非故障线路零序电流的大小差别较大,零序电流幅值比较法具有较好的准确性。但是,当电网线路数少,且存在某一长线路时,故障线路与非故障线路零序电流差别不大,容易造成误选或拒选现象。同时,当电网发生高阻接地故障时,由于各线路零序电流更小,因此,其灵敏度和可靠性必然降低。并且该方法只在中性点不接地系统和中性点经高阻接地系统中有效,而在中性点经消弧线圈接地或经消弧线圈并(串)电阻接地系统中该方法失效<sup>[10]</sup>。

### (2) 零序电流有功分量法

对于中性点经消弧线圈接地系统,消弧线圈不能补偿零序电流有功分量,非故障线路零序电流有功分量等于该线路对地绝缘电阻产生的有功电流,且与零序电压同方向;故障线路零序电流有功分量等于所有非故障线路零序电流有功分量和消弧线圈并(串)电阻产生的有功电流之和,与零序电压反向。通过傅里叶变换计算各线路零序电流中的有功分量的大小和方向,幅值最大且与其他线路反向的就是故障线路。在实际使用中,各线路零序电流有功分量与无功分量相比要小得多,因此,该方法对零序电流互感器的方向特性、灵敏度要求较高。当电网发生高阻接地故障时,由于零序电压和零序电流的值都很小,其灵敏度也将降低。此外,对于利用三相 CT 并联获得零序电流的系统,该方法受三相 CT 不平衡的影响较大。同时,在中性点经消弧线圈并(串)电阻接地系统中,当发生接地故障后,一般该电阻应很快被切除,因此要求接地选线装置必须具有较快的速度,否则无法实现连续判断<sup>[11]</sup>。

### (3) 能量法

零序能量法分析依据线性系统中的叠加原理,对小电流接地系统发生单相接地故障后的全部过程均以能量观点来解释,以线路零序电压与零序电流乘积的积分为能量函数,故障前所有线路为零,故障后故障线路恒小于零而非故障线路恒大于零,且故障线路能量幅值等于所有非故障线路和消弧线圈的能量幅值之和<sup>[12-13]</sup>。零序能量法的本质,在中性点不接地或中性点经高阻接地系统中就是零序电流方向选线原理,而在中性点经消弧线圈接地系统中为零序电流有功分量法。电阻元件消耗能量,其零序能量函数单调上升,有利于选线的实现,而电感元件和电容元件的零序能量是波动的,仅仅通过判断能量函数是否过零,很

容易造成误判,实际效果较差<sup>[14]</sup>。

#### (4) 零序导纳法

零序导纳法是根据各线路零序测量导纳的大小与方向实现的接地选线方法,是零序电流方向法的改进。由于零序测量导纳的大小不受故障点接地电阻的影响,该方法具有较高的灵敏度。零序导纳法在中性点不接地系统中有较高的灵敏度,在中性点经高阻接地系统中也可采用零序电导法来实现选线。在中性点经消弧线圈接地或经消弧线圈并(串)电阻接地系统中,可采用零序电导法或零序五次谐波导纳法来选线。零序导纳法同样受零序互感器特性以及测量精度的影响,尤其是在高阻接地时,由于零序电压和零序电流较小,影响更大<sup>[15-16]</sup>。

#### (5) 五次谐波法

零序电流方向法原理在中性点经消弧线圈接地系统中无法应用,是由消弧线圈电感电流的补偿问题而造成的。由于消弧线圈不能对谐波进行完全补偿,因此可以通过对零序电流谐波分量幅比相进行选线,由于系统中的五次谐波含量最大,可通过零序五次谐波电流的大小和方向来实现选线。由于五次谐波的含量相对于基波而言要小得多,且各电网的谐波含量大小不一,因此零序五次谐波电流方向法的灵敏度要比零序电流方向法低得多,尤其是在接地过渡电阻很大时,其灵敏度更低<sup>[5]</sup>。

#### (6) 残流增量法

在电网发生单相永久性接地故障的情况下,故障线路零序电流的大小和方向与消弧线圈的补偿程度有关,只要消弧线圈补偿电流调整前后脱谐度变化足够大,则故障线路零序测量电流的变化量就远远大于非故障线路零序电流的变化量;同理,通过改变消弧线圈阻尼的大小,然后判断各线路零序电流有功分量的变化,同样可判断出故障线路,因此有学者提出了通过改变消弧线圈补偿电流的大小来实现选线的残流增量法。

残流增量法是通过改变消弧线圈补偿电流的大小来实现的。因此,该方法只能应用在具有随调式的消弧线圈中,且消弧线圈的调节控制与接地选线装置之间要一体化或两者之间有通信联系。该方法在固定补偿消弧线圈接地电网和预调式消弧线圈接地电网中无法应用。残流增量法由于是利用消弧线圈调整前后两次测量差来实现选线的,该方法可消除 TA 等带来的测量误差,灵敏度及可靠性较高,但需要配合自动调谐消弧线圈使用,且刻意要求消弧线圈脱挡调节<sup>[17]</sup>。

#### (7) 注入法

注入法不利用故障产生的信号,而是利用单相接地故障时原边被短接,暂时处于不工作状态的接地相 PT 人为向系统注入一个特殊电流信号,用寻迹原理

即通过检测、跟踪该信号电流的通路来实现接地故障选线的。一般从 PT 二次侧注入电流信号,为区分电网原有信号和注入信号,注入信号的频率一般位于工频  $n$  次谐波与  $n+1$  次谐波之间( $n$  为正整数),从而保证不被工频分量及高次谐波分量干扰。对于非故障线路注入信号,回路电阻为故障相对地的绝缘电阻,其值一般很大,则在该线路中几乎无注入信号电流流过。而对于故障线路注入信号回路电阻为故障点接地阻抗,其值较绝缘电阻小得多,因此故障线路中注入信号电流最大,据此即可选出故障线路。该方法的最大优点在于适用于线路上只安装两相 CT 的系统。

但利用该方法的选线装置大量投入运行,效果并不理想,这是因为该方法存在下列问题:① 经高阻接地时,注入信号微弱,不易检测;② 对于电弧接地或间歇性电弧接地故障,该方法准确性不高;③ 注入信号法对于线路零序阻抗较高的架空线电网较为有利,而对于电缆电网,尤其是像煤矿供电网,下井线路为长电缆线路,其每相工频容抗较小,对高频注入信号的容抗更小,甚至可能比故障电阻的阻抗还小,注入信号法在有较长电缆线路的电网中效果较差<sup>[18-22]</sup>。

#### (8) 负序电流法

单相接地后故障点产生负序及零序电流,零序电流以所有线路为回路,而负序电流仅以故障线路为回路。该方法利用比较各线路的负序电流大小,选择负序电流最大者为故障线路。该方法受系统不对称度和负荷不平衡的影响较大,容易发生误判,尚无利用负序电流选线方法的产品真正投入使用<sup>[23-24]</sup>。

小结:目前,基于稳态信息选线方法的一个共同特点是,需要所有线路在数据采集的过程中保持稳定,为提高选线的准确性,一般装置设计在进行选线时都是对故障信息进行连续选线,进行简单多次加权判别。对于电弧接地尤其是间歇性电弧接地故障,由于工频零序电流小或者几乎不存在稳态工频零序电流,则这些方法全部失效。

### 1.2.2.2 单相接地故障暂态分量分析的选线原理

#### (1) 首半波原理

首半波原理是基于接地故障发生在相电压在最大值附近这一假设而提出的。当相电压在最大值附近时发生接地故障,故障相电容放电,非故障相对地电容充电。同时,线路电感和分布电容的影响使电流具有衰减振荡特性,以上衰减振荡电流频率较高,对消弧线圈补偿电感而言,相当于开路,因此中性点不接地和中性点经消弧线圈接地系统具有相同特性。发生接地后的第一个半周期,故障线路零序暂态电流与正常线路零序暂态电流极性相反,而在非故障线路上两者极性相同,利用暂态零序电流方向相反的特征来实现选线。该方法可检测不稳定接地故障,但极性关系成立的时间很短,要求检测装置的数据同步采样速度

快,且易受线路参数、故障初相角等因素的影响,当故障发生在相电压过零附近时,电流的暂态分量值较小,易引起极性误判<sup>[25-26]</sup>。

### (2) 特征频带法

该方法认为,无论是中性点不接地还是中性点经消弧线圈接地系统,小电流接地系统发生单相接地故障时,非故障线路的阻抗的相频特性相同,而故障线路检测点后阻抗是所有非故障线路并联后的总体等效阻抗,非故障线路将发生无数次串联和并联谐振,其阻抗在低频段呈现容性,随着频率增加将交替呈现感性和容性。设 $\omega'$ 为所有非故障线路自身串联谐振频最小值,则在0到 $\omega'$ 频段(SFB)内,每条非故障线路阻抗均呈容性,均可等效为以集中参数电容。在SFB频带内母线处检测到的零序电压、零序电流具有的特性为:故障线路的容性电流幅值大于任何一条非故障线路;故障线路中的容性电流从线路流向母线,而非故障相中的容性电流为母线流向线路,二者流向相反。因此,可以通过检测SFB频段内零序电流的方向实现选线。

暂态方向选线法是利用SFB频段故障线路与非故障线路零序电流方向相反的特性实现选线的,因此,对于电弧接地故障,具有较高的灵敏度;对于间歇性电弧接地故障,由于暂态分量大,且持续时间长,从而提高了选线的可靠性。除SFB频段范围受消弧线圈影响外,该方法不受中性点接地方式、系统结构和容量变化的影响。一般配电网中的 $\omega'$ 远远大于工频,因此在不接地系统中,SFB包含了工频和部分谐波频率,即该方法对中性点不接地系统中稳态分量也适用<sup>[27-28]</sup>。

### (3) 小波分析法

小波变换在频域和时域同时具有良好的局部化特性,对于非平稳信号具有比傅里叶变换更好的分析效果。通过小波函数的伸缩和平移产生可变的时频窗,使小波变换在分析暂态和非平稳信号方面具有独特的优越性。小波法利用近年来新兴的小波变换理论,提取故障暂态信号的特征量进行故障选线。选用合适的小波基对暂态零序电流的特征分量进行小波变换后,对采集到的故障信号进行小波变换,确定模极大值点,并比较各线路零序电流模极大值的大小和极性,就可以判断出故障线路。

小波分析法适合于对暂态突变信号进行分析,可应用在电弧、间歇性电弧等暂态分量较大的故障选线中。在具体使用时还要选择好合适的小波基函数及小波分解尺度。对于稳态接地故障,尤其是高阻接地故障,由于突变量小,有可能使其漏选。小波分析由于是利用了其对于突变信号敏感的特点,其抗干扰能力较差,稍大一些的干扰,就有可能使其发生误选。近几年有许多有利用小波分析来实现选线的文章,但都是基于理论分析和数据仿真。随着高速处理器的出现,该

方法的可行性进一步增强<sup>[29-31]</sup>。

小结:目前的选线装置都是利用零序电压越限启动选线,而很多故障的最初暂态过程发生一段时间后零序电压才越限,这时再记录的波形已不满足暂态信号选线的前提。一般认为,接地故障发生后先经过暂态过渡过程(1~2个周波),然后进入稳态过程,但是根据现场录波数据分析,暂态过程和稳态过程不太好用时间严格区分。对单相电弧型接地故障,故障发生相当长的时间后波形依然表现为连续的暂态过程,这时应用小波法进行选线,其效果明显好于基于稳态的各种方法。但对于稳态接地尤其是高阻接地故障,零序电压和零序电流中暂态分量很少或没有暂态分量,因此这种情况下只能利用稳态分量原理来实现选线。

### 1.3 小电流接地故障准确选线困难的原因

上述的一些基于稳态分量和暂态分量的小电流接地选线方法,在各种装置上得到应用。从理论上讲,上述方法应该能够实现故障线路的判别,但是实际应用中由于多种因素的影响,如故障信息特征提取易受干扰,没有针对不同类型的接地故障进行合理信息配置,高阻或电弧接地故障信息获取较为困难等,选线装置的准确性并不高。

#### 1.3.1 单相接地故障类型的建模较困难

小电流接地系统单相接地故障有多种类型,主要可分为稳定性接地故障和非稳定性接地故障。稳定性接地又包括金属性接地故障、低阻接地故障和高阻接地故障等类型;而非稳定性接地故障又包括短时性的电弧接地故障和不稳定的间歇性电弧接地故障。

小电流接地系统单相接地故障的情况很复杂,系统发生单相接地故障的建模较为困难。由于故障发生的位置、故障性质的不确定性,很难建立系统的单相接地模型来准确地计算零序分量的定量大小,但从接地故障电流特征看,主要有两种成分:一是工频稳态零序电流,工频稳态零序电流具有稳定和长时间两个特点,为精确分析故障状态提供了极好的条件,极有利于准确选线。稳定电弧电流故障,高阻接地故障,都具有工频稳态故障电流特征。二是单相接地故障零序暂态信号。它存在于瞬时性接地故障和单相低阻性接地故障开始至进入稳态的过渡期,其值可能达到稳态故障信号的几十至上百倍,这为判断故障选线提供了有利条件,但同时又存在衰减快、时间短、频带不定等对信号处理不利的因素。由于配电网的许多单相接地故障是短时的或是不稳定的间歇性电弧接地故障,往往接地故障信号中稳态成分很低。

### 1.3.2 影响故障选线准确性的因素<sup>[3]</sup>

导致小电流接地故障准确选线困难的原因,一是对小电流接地系统情况复杂的单相接地故障难以建立系统的模型来准确计算零序分量的定量大小,二是零序分量的大小受特定因素的影响,检测装置和选线装置本身的特性也会影响选线的准确性。影响故障选线准确性的因素主要有以下几种。

#### (1) 接地阻值和故障合闸角的影响

发生单相接地故障时,接地阻值可能很小,也可能很大。当接地阻值较小时,故障暂态零序电流较大,电流明显有一个从暂态到稳态的过渡过程,但对高阻接地故障,各馈电线路零序电流很小,同时受零序电流互感器误差、检测装置误差以及干扰信号等因素的影响,必然使故障线路与非故障线路的故障特征差别减小<sup>[32-39]</sup>,且故障开始到进入故障稳态,其暂态信号很弱,需要采取有效的措施增强选线信号或提高信噪比对工频稳态故障电流信号进行精确分析,才有可能判断出故障线路。小电流接地系统单相接地故障一般发生在相电压峰值附近,可以产生明显的暂态电流,但是单相接地故障也可能发生在相电压过零值附近,此时故障零序电流中高频暂态分量很小,衰减直流分量很大。

#### (2) 中性点接地方式的影响

小电流接地系统发生稳态单相接地故障时,故障线路零序基波电流的大小除与系统结构、系统对地电容、故障点接地电阻等有关外,还与系统中性点的接地方式有关。当中性点采用消弧线圈接地方式时,系统故障时的接地电流得到补偿,扰乱了原有不接地系统的零序电流分布规律<sup>[40-44]</sup>,使得信号特征量提取困难,规律重复性差,故障线路与非故障线路之间的差别减小,影响了选线的准确性。现场选线装置的运行情况也表明,中性点不接地系统或中性点经高阻接地系统选线的准确性远较中性点经消弧线圈接地或经消弧线圈并(串)电阻接地系统高。小电流接地系统中,国内外很多学者、专家提出在消弧线圈上并电阻以增大阻尼率、消弧线圈主动调节脱谐度获得故障残流增量等措施,这些主动式措施一定程度上克服了选线干扰,但是大大提高了弧光过电压的概率。

#### (3) 互感器特性的影响

在理想的电流互感器中,励磁损耗电流为零,在数值上一次和二次侧安匝数相等,并且一次电流和二次电流的相位相同,但在实际使用中,由于励磁电流的存在,一次和二次侧的安匝数并不相等,电流的相位存在一定的角差。零序电流互感器存在非线性特性,受磁化特性影响的电流互感器往往在小信号和大信号时呈现非线性的特性,造成测量误差。这必然影响到依靠零序幅值和相角原理制成的选线装置,尤其是小信号时的非线性影响尤其严重。同时,零序电流互感器特性的非一致性也必然影响到选线的准确性。

同样电压互感器也存在电压值误差和相角误差问题,特别是作为许多小电流接地选线的启动信号,零序电压互感器还易受到原边 PT 断线、铁磁谐振等现象的干扰,因此需要对单相接地故障各相电压进行分析,准确判别出零序电压升高的原因<sup>[5]</sup>。

#### (4) 线路长度及结构的影响

小电流接地系统发生单相接地故障时,故障支路和非故障支路都产生零序电流,其值大小主要由线路对地电容和绝缘电阻决定,单位长度的电缆线路的电容远远大于架空线路的电容。因此,对于配电网,尤其是煤矿配电网,有大量的电缆线路,且电缆集中在主要的下井线路上,当发生单相接地故障时,其零序电流大小远比其他支路要大,且暂态过程更明显,自由振荡频率更高<sup>[45-49]</sup>。在高阻接地时,本身故障信息较为微弱,如果再受到零序电流互感器偏差的影响,则容易发生误判,选线装置误动作。

#### (5) 线路不平衡电流的影响

由于三相对地参数的不平衡,在消弧线圈接地系统中,在合适的脱谐度和阻尼率的情况下,线路本身的偏移电压会等效产生不平衡电流,该电流的大小和方向变化不定,且各线路各不相同,当电网发生单相接地故障时,检测到的零序电流为该线路零序电流与不平衡电流的矢量和。因此当不平衡电流足够大时,必然会使选线产生错误。

对于电网中的架空线路,由于直接安装零序电流互感器不方便,多采用三相电流互感器的组合合成零序电流。互感器本身固有的不平衡输出使其准确性较低,由于电流互感器测量的线路本身的工作电流较大,而发生单相接地故障时合成零序电流较小,测得的零序电流量线性度较差,对于选线装置实现准确选线较为困难<sup>[5]</sup>。

#### (6) 选线装置的影响

目前来说,选线装置多采用一种方法进行选线,或者是对几种方法的简单加权处理,没有针对故障特征故障类型进行深入分析,选线装置可能在一些情况下选线较为准确,有些情况选线效果较差。应针对不同故障类型采用不同权值的多种选线方法进行信息融合综合决策,以提高选线的准确性。另外单相接地故障时故障特征信息小,尤其是高阻接地故障。为准确检测出故障线路,除要求有高灵敏度的零序电流互感器外,对检测装置水平也提出了较高的要求,同时由于小电流接地系统一般出线较多,且要求同步采样,因此对检测装置的性能和采样速率提出了较高要求。为提高选线装置的准确性,也应处理好装置灵敏启动及单相接地故障和其他故障导致零序电压升高的准确判别问题<sup>[5]</sup>。



### 1.3.3 小结

综上所述,由于单相接地故障情况较为复杂,影响小电流接地选线准确性和可靠性的因素较多,任何一类选线方法都不能保证百分之百的选线正确性。因此,不可能仅采用一种选线方法就完成选线功能。为提高选线的准确性,需要在以下几个方面进行再研究:

(1) 对于选线的可靠启动要进行分析,减小和消除各种外界因素的影响,提高选线动作的准确性。

(2) 对基于稳态分析的选线方法进行改进,对影响选线的各种因素进行分析,消除干扰信号对故障信号的影响。采取措施,增大故障线路与非故障线路之间的差别,提高保护裕度,提高选线的准确性。

(3) 由于单相接地故障时常有不稳定电弧接地和瞬接性电阻故障,暂态信息较为明显,因此需要对现有的暂态选线方法进行改进,提高选线方法的可行性。并可以考虑新方法应用于选线,提高选线的准确性。

(4) 分析不同的单相接地故障类型,针对不同的类型,合理配置各种选线方法的权值进行信息融合,以期达到最佳选线结果。

## 1.4 本书的目标和主要研究工作

本书的目标:对配电网单相接地故障特征进行详细分析,得出小电流接地选线启动的准确判断方法;对现有的有功分量法选线和暂态信号的小波分析选线方法进行改进;提出一种能在不同接地方式下及对不同接地故障类型都能适用的选线方法;采用多重分形理论对单相接地故障信息进行分析,区别出不同类型的接地故障,以期采用更好的分配故障方法权值,利用直觉模糊方法进行综合选线。

本书的结构和主要研究内容如图 1-1 所示。

第 1 章介绍课题研究背景及意义,在总结小电流接地系统现有的单相接地故障选线方法的基础上,指出了小电流接地系统选线存在的问题和难点。

第 2 章对不同中性点接地方式的配电网单相接地故障零序电压变化规律及故障时暂态零序电流和稳态零序电流的变化规律进行了详细的分析,建立了电弧型接地故障模型并进行了仿真,对 PT 断线故障、系统断线故障及铁磁谐振故障引起的零序电压升高和发生单相接地故障时的零序电压升高进行比较,得出正确区分单相接地故障发生的方法。

第 3 章对本书采用的选线方法进行了分析,并提出了三种选线方法。分析了影响有功分量法选线准确性的因素,提出了一种消除不平衡电流的有功分量