



单相接地故障 分析与选线技术

王清亮 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

单相接地故障 分析与选线技术

王清亮 著
董张卓 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要论述谐振接地配电网单相接地故障特性、电磁暂态建模、单相接地故障模式及选线等方面的基础理论和系统分析方法。全书共6章。绪论对单相接地故障的基础知识、研究现状以及该领域的关键技术和难点等进行概述；第1章论述了谐振接地配电网的消弧技术及运行特性；第2章对单相接地故障的分布参数模型、研究方法、故障机理和暂态特性规律进行系统分析；第3章针对故障边界条件的不确定性、耦合性，探讨单相接地故障的模式分类及频谱特性；第4章从提高选线技术可靠性角度论述基于故障模式分类的单相接地故障选线方法；第5章引入非线性信号分析方法，论述基于经验模态分解原理的单相接地故障选线思路；第6章对单相电弧接地故障的建模方法、电路模型及电磁暂态仿真等进行阐述和分析。

本书可作为电力部门、科研院所及工矿企业从事电力系统相关工作的科技人员的参考书，也可作为高等院校电气工程相关专业的教师、研究生和高年级本科生的教材及参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

单相接地故障分析与选线技术/王清亮著. —北京：中国电力出版社，2013.7

ISBN 978-7-5123-4492-1

I. ①单… II. ①王… III. ①低压配电网—接地系统—故障诊断 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 109854 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 8.5 印张 179 千字

定价 17.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

单相接地是爆炸性环境供电系统中发生概率最高的电气故障，接地点的故障电流除容易引起爆炸事故外，还极易引发人身触电事故。近年来，在煤炭、石油、化工等有爆炸性气体环境的工矿企业中，多次发生电缆和电磁式互感器爆炸，人身触电伤亡事故也偶有发生，造成了较大的经济损失和负面的社会影响，单相接地故障未能及时检测出来是爆炸事故发生的重要原因之一。

经过多年的研究与实践，故障选线技术取得了一定的理论研究及应用成果，但其作为供电领域一项重要的实用技术还远不够理想，尤其是在中性点经消弧线圈接地的谐振接地配电网中，故障选线的可靠性还较差。因此，如何提高故障选线技术的准确性和可靠性，已成为配电自动化领域的一个长期未能有效解决的难题。

本书侧重于对单相接地故障发生机理、电磁暂态建模、单相接地故障模式等方面的基础研究和系统分析。针对单相接地故障边界条件的不确定性、耦合性，论述了单相接地故障的模式分类及频谱特性。针对绝大多数单相接地故障伴随有电弧现象，而电弧具有高度非线性时变特性和建模困难，同时又是影响选线装置可靠性能的一大因素等问题，书中阐述了单相电弧接地故障特性、建模仿真方法。在以上理论分析基础上，采用不同的数据挖掘方法对故障信息进行处理，依据不同故障模式探究单相接地故障辨识方法；同时，将新的复杂非线性信号处理工具引入谐振接地配电网研究中，以探索基于固有模态能量的选线方法。

本书是作者对多年科研教学研究成果的系统总结，也吸纳了同行的部分研究作为补充，对电气技术人员全面掌握单相接地基础理论和选线技术具有较大参考价值。

在本书的撰写过程中，付周兴教授和董张卓教授给予了大力支持和精心指导，并审阅了初稿，值此书稿完成之际，谨向他们表示深深的谢意。同时，对本书所列参考文献的作者表示感谢。研究生杜辉、于然等参与了本书的资料收集和文字整理工作。

本书得到陕西省教育厅专项科研项目（2013JK1007）资助，西安科技大学电气工程学科资助，西安科技大学电控学院优秀拔尖人才培养项目资助，在此作者表示由衷的感谢。

由于作者水平有限，加之电力系统新技术的发展迅速，书中错误和不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作 者

2013年6月



前言

0 绪论	1
0.1 引言	1
0.2 研究意义	3
0.3 故障选线技术现状分析	4
0.4 配电网故障选线的难点	8
0.5 相关术语	9
1 谐振接地配电网的补偿消弧原理	11
1.1 消弧线圈	11
1.2 自动跟踪补偿消弧线圈	12
1.3 谐振接地电网的运行	16
1.4 补偿装置的参数选择	18
2 单相接地故障建模及特性分析	22
2.1 单相接地故障的分布参数模型	22
2.2 单相接地故障的稳态特性分析	23
2.3 单相接地故障暂态特性的分析方法	28
2.4 单相接地故障的暂态建模	33
2.5 低阻抗单相接地故障电流	37
2.6 单相接地故障电流的振荡机理	42
2.7 高阻抗单相接地故障电流	44
2.8 单相接地故障的暂态规律	46
2.9 单相接地故障的仿真分析	50
3 单相接地的故障模式分类	57
3.1 故障暂态信号的分析方法	57

3.2	单相接地故障的频谱特性	65
3.3	单相接地故障的特征参数	68
3.4	单相接地故障信号的能谱熵	73
3.5	单相接地的模式分类	76
4	基于故障模式的自适应故障选线方法	79
4.1	故障信号主频带	79
4.2	强故障模式的选线方法	79
4.3	小角故障模式的选线方法	84
4.4	弱故障模式的选线方法	90
4.5	单相接地故障的选线过程	91
4.6	谐波量对选线方法的影响	94
5	基于固有模态能量的选线方法	99
5.1	经验模态分解	99
5.2	故障信号的固有模态能量分析	102
5.3	固有模态能量选线算法	108
6	单相电弧接地故障	112
6.1	电弧基本理论	112
6.2	交流电弧的特性	114
6.3	单相电弧接地故障	117
6.4	电弧接地故障的数学模型	119
6.5	电弧故障的电磁暂态仿真	123

绪 论

0.1 引 言

我国的中压配电网采取中性点非有效接地运行方式,包括中性点经消弧线圈接地方式、中性点不接地方式和中性点经高阻接地方式三种。中性点经消弧线圈接地的电力系统通常又称为谐振接地系统^[1]。其中,66kV和35kV配电网主要采取中性点经消弧线圈接地的运行方式,大中型工矿企业的高压供电网也采用此种运行方式;而3~10kV配电网主要采用中性点不接地运行方式。随着电力系统容量不断增长,配电网中电缆线路的比例上升,单相接地故障点的电容电流越来越大,为了限制系统单相接地点的故障电流,许多10kV配电网也改用中性点经消弧线圈接地的谐振接地运行方式。

DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定,对于3~10kV不直接连接发电机的系统和35、66kV系统,当单相接地电容电流不超过下列数值时,应采用不接地方式;当电容电流超过下列数值又需在接地故障条件下运行时,应采用中性点经消弧线圈接地方式。

(1) 3~10kV钢筋混凝土或金属杆塔的架空线路构成的系统和所有35、66kV系统,电容电流为10A。

(2) 3~10kV非钢筋混凝土或金属杆塔的架空线路构成的系统,当电压为:

- 1) 3、6kV时,电容电流为30A;
- 2) 10kV时,电容电流为20A;
- 3) 3~10kV电缆线路构成的系统,电容电流为30A。

现场运行经验表明,配电网中单相接地故障的发生几率最高,约占系统电气总故障的80%。采用中性点非有效接地运行方式的主要优点有:

(1) 当系统发生单相接地故障时接地点故障电流小,再经过消弧线圈对流过接地点的故障电流进行补偿,故障电流会更小;

(2) 三相线电压仍保持对称关系,不影响对负荷的连续供电,故不必立即分断故障线路,中性点非有效接地系统在发生单相接地故障后可连续运行1~2h,从而显著提高了供电的可靠性;



(3) 由于故障的稳态接地电流小，跨步电压低，一般不影响人身安全；

(4) 在瞬时性故障条件下，多数情况下可以自行灭弧恢复绝缘，不需要运行人员采取特别措施，即使发生绝缘击穿，也由于故障电流小而损坏程度轻，便于维修。

工矿企业供电网单相接地故障发生的几率高于配电网，也远高于输电网，故采用中性点非有效接地的运行方式非常适合工矿企业。

但是，若中性点非有效接地配电网中发生永久性单相接地故障，非故障相电压会升高 $\sqrt{3}$ 倍，当发生间歇性弧光接地时，还会产生幅值高达 2.5~3 倍相电压值的过电压，严重威胁着系统的绝缘，极易形成相间短路和多点故障，此时系统会流过很大的短路电流，在接地点产生的大量热量可能会将附近的电气设备烧毁或引起避雷器爆炸，严重破坏了系统的安全运行。因此，中性点非有效接地配电网发生单相接地故障后，应尽快在规定的时间内确定故障线路并予以快速切除，这就是配电网的故障选线问题^[1-3]。

我国现行《煤矿安全规程》规定：

(1) 严禁井下配电变压器中性点直接接地，严禁由地面中性点直接接地的变压器或发电机直接向井下供电。

(2) 井下由采区变电站、移动变电站或配电点引出的馈电线上，应装设短路、过负荷和漏电保护装置。

(3) 地面变电站和井下中央变电站的高压馈线上必须装设有选择性的单相接地故障保护装置；供移动变电站的高压馈线上，必须装设有选择性的动作于跳闸的单相接地保护装置；井下低压馈电线上必须装设检漏保护装置或有选择性的漏电保护装置，保证自动切断漏电的馈电线路。

(4) 矿井高压电网必须采取措施限制单相接地电容电流不超过 20A。

根据《煤矿安全规程》的上述规定，为了降低触电电流，保障人身安全，在井下变压器出口设有人为中性点，在人为中性点处接有零序电抗器，以补偿流过人体的触电电流，如图 0-1 所示。图中 T 为井下供电变压器；N 为人为中性点；SK 为三相电抗器；LN 为零序电抗器，其作用与消弧线圈类似。因此，矿井配电网实质上是一个中性点非有

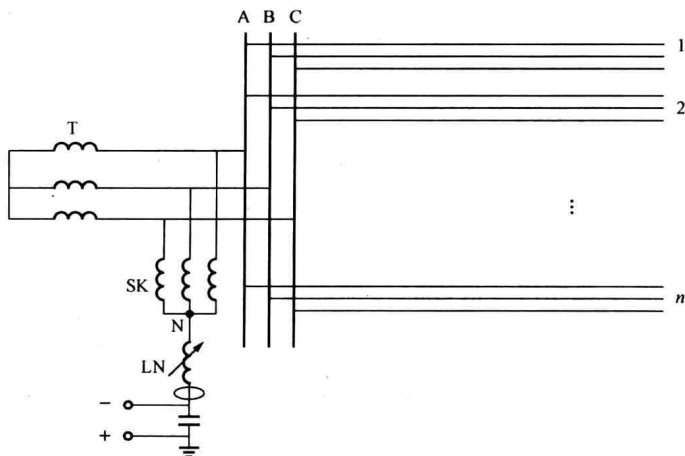


图 0-1 煤矿井下配电网示意图

效接地电网。

在工矿企业配电网中，漏电泛指发生的各种单相接地故障。在中性点绝缘的供电系统中，单相接地或两相、三相对地的总绝缘阻抗下降到危险值的电气故障，称为漏电故障，流入大地的电流，叫做漏电电流^[4]。在这种供电系统中，人身触及一相带电导体的情况属于单相经过渡阻抗接地，对人来说是发生了触电，对整个供电系统来说是发生了漏电。针对这些故障设置的选择性漏电保护装置，实质上就是完成故障选线任务。煤矿井下空间狭窄，空气潮湿，电气设备和电缆易受到砸、碰、压而使绝缘损坏，发生漏电故障，如果缺乏可靠的故障选线装置，除了引起人身触电事故外，还容易引起瓦斯、煤尘爆炸和电雷管超前引爆等恶劣的安全事故。当单相接地故障转化为相间短路故障时，会产生高达上千安培的故障电流，可直接烧毁附近的电动机，从而导致主排水泵或主通风机等关键设备停运，给企业带来巨大的经济损失，导致人员伤亡等重大安全事故。

0.2 研究意义

近年来，随着配电网规模的发展，电缆线路比例上升，尤其在有爆炸性气体的工矿企业中电缆供电的比例更高，达95%以上，供电容量也在迅速增加，线路总长度不断延伸，使得单相接地故障的危害日益增大，严重影响着电网安全运行及工矿企业的正常生产。工矿企业的高压供电系统中多次发生电缆和电压互感器爆炸，甚至烧毁母线的恶性事故，给企业带来严重的经济损失，造成恶劣的社会影响。因此，探寻解决中性点非有效接地电网故障选线难题的理论，研究高灵敏度、高可靠性的选线方法，对提高配电网的供电安全性，保证工矿企业的安全生产，具有重要的理论意义和很强的实用价值。

(1) 提高故障选线装置的灵敏度和可靠性，对保证配电网安全运行具有重要意义。

1) 有效降低电气设备绝缘污闪事故率。系统在带单相接地故障运行时，非故障相电压升为线电压，使得污秽设备在线电压的作用下加速沿面放电的发展，更容易造成污闪的恶性事故。

2) 降低电压互感器等电气设备的绝缘事故率。当发生单相接地故障时，电压互感器铁芯可能会出现饱和现象，在线电压作用下产生谐振，使得电压互感器励磁电流大幅增加。在线电压作用下，电压互感器的高压熔断器频繁熔断，电压互感器过热喷油或爆炸事故不断发生，也会导致电气设备的绝缘加速劣化。

3) 降低形成两相异地短路和相间短路的几率。配电系统不可避免地存在着绝缘薄弱点，系统在单相接地故障时产生的过电压很容易导致两相异地短路的发生，单相接地电弧可能直接波及相间，形成相间直接短路，在电动力的作用下，短路电弧会向着备用电源方向跳跃，可能造成“火烧连营”的事故^[4]。

(2) 符合电气安全技术学科发展的实际需要，对于促进和加强“爆炸性环境电气安全理论”方面的基础研究具有重要意义。

1) 降低爆炸性事故的发生几率。由于爆炸性物质普遍存在于煤炭、石油、化工等行

业，单相接地故障（漏电）所产生的电气火花是引发爆炸的主要火源，这些场合发生爆炸会造成巨大的经济损失和人员伤亡。

2) 有效提高人身安全性。在煤矿井下等含有爆炸性气体环境中，一般工作空间狭小，散热条件差，空气潮湿，供电线路易受掉矸的碾压，在如此恶劣的环境中，非常容易发生漏电、触电等形式的单相接地故障。从人身安全性出发，一般要求人身触电电流与触电时间应小于 $30\text{mA} \cdot \text{s}$ 。发生单相接地故障时，必然要经历一个暂态过程，持续时间为 $10 \sim 60\text{ms}$ ，再考虑保护装置的动作时间和断路器的分闸时间，流过人体的触电电流已远大于 $30\text{mA} \cdot \text{s}$ 。通过对单相接地的故障机理和特性研究，可为有效保障人身安全提供理论基础。

3) 促进快速断电技术的研究。快速断电保护的基本原理是在故障形成产生电火花而引燃瓦斯煤尘之前就切断电源，确保人身及生产安全。快速断电技术的实现依赖于快速取样技术，而单相接地故障机理的充分研究和暂态信息的提取是实现快速取样技术的理论基础。

(3) 配电自动化技术发展的迫切需求。

配电网单相接地故障问题是电力企业实际运行中的一个技术难题，长期以来没有得到满意的解决。目前我国供电企业正在积极进行配电自动化技术更新，配电自动化的一个重要内容是自动故障定位、隔离和健全线路恢复供电，已经运行的配电自动化系统大多不能可靠地检出接地故障线路，因此，开发出可靠实用的故障选线技术迫在眉睫^[2]。

0.3 故障选线技术现状分析

到目前为止，已有的选线装置基本上是针对中性点不接地或经高阻接地配电网研发的，相关的选线技术也比较成熟。而在中性点经消弧线圈接地配电网中发生单相接地后，其故障特性与中性点不接地及经高阻接地有很大差异，因此，相关的选线技术并不完全适用于中性点经消弧线圈接地配电网。例如零序电流群体比幅比相法、零序无功功率法、零序电流比相等在中性点不接地系统中可以达到很高的准确率，但在中性点经消弧线圈接地配电网中却很不理想。因此，当前故障选线技术的难点和焦点主要集中于能适用于中性点经消弧线圈接地配电网的选线方法上。综合国内外研究现状，能在中性点经消弧线圈接地配电网中应用的选线原理，根据是否利用故障信号可分为两类：注入信号跟踪法和利用故障信号法。其中利用故障信号的选线方法又可分为稳态量选线和暂态量选线两类。稳态量选线方法主要有接地监视法、有功分量法、5次谐波分量法、残留增量法、负序电流法、零序导纳法等。暂态量选线方法主要有小波分析法、首半波法、能量法、Prony法等。以下对现有中性点经消弧线圈接地配电网的故障选线方法及研究动态做简要分析。

0.3.1 注入信号跟踪法

注入信号跟踪法基本原理是，在故障后通过电压互感器向系统注入一个高频电流信



号,只有故障线路的故障相才会出现注入的特定信号,根据寻迹原理,采用信号电流探测器检测各线路是否有注入的特定频率信号电流来实现故障选线^[5]。

注入信号跟踪法不利用故障提供的故障信息进行被动式选线,而是主动注入一个选线信号,故障选线不受消弧线圈补偿度的影响。该方法的主要不足之处是需要附加电源信号装置,每条线路上需装设信号电流探测器,现场实现复杂;注入信号的功率受电压互感器容量限制比较微弱,很难准确测量,在接地点过渡阻抗较大时,线路分布电容对注入信号的干扰大,对间歇性电弧接地故障,注入信号变化不连续,直接影响选线的效果。与此方法类似的还有注入变频信号法。

0.3.2 接地监视法

利用配电网发生单相接地故障后出现零序电压这一特点,可以监视是否发生了单相接地故障。一般是在配电网的母线处装设接地监视装置(又称绝缘监视),将其接入电压互感器二次侧开口三角形绕组处,当电压互感器出现零序电压后,装置延时动作于信号。

由于同一母线上的线路任何一处发生单相接地故障,都将出现零序电压,因此,这种绝缘监视方法不能检出故障线路,没有选择性。要想判别接地故障是在哪一条线路上,还需要由运行人员依次短时断开每条线路,当断开某条线路时,零序电压信号消失,即表明故障是在该线路上。

0.3.3 有功分量法

有功分量法的原理是系统发生单相接地故障时,提取各条线路的零序有功分量,利用各线路零序有功分量的相对大小和相位关系识别故障线路^[6]。非故障线路的零序有功分量方向是由母线流向线路,大小等于线路自身的有功损耗电流值;故障线路的零序有功分量方向是由线路流向母线,大小等于系统所有非故障线路的零序有功分量和消弧线圈零序有功分量之和。

有功分量法不受消弧线圈补偿度的影响。单相接地故障电流本身就很小,其有功分量更小,一般是故障稳态零序电流的 $1.5\% \sim 4\%$,当电缆绝缘老化或架空线路污秽严重时达到 5% 以上;三相不平衡引起的虚假有功电流分量对算法影响较大;该方法受线路长短、过渡阻抗的影响较大,因而选线的灵敏度低。

与此方法类似的还有零序有功功率法和法国电力公司开发的DESIR法。有功分量法原理是以电网的基波电流信号为基础,从所有线路中抽取零序电流的基波有功分量,算出故障点的残余有功电流,即所有线路的基波零序有功电流的相量和,并选取该相量和的垂直线作为参考轴,再对所有线路基波零序电流在参考轴上的投影进行比较,此时故障线路接地电流的投影与各非故障线路零序电流的投影不仅相位相反,而且数值最大。该方法不要求测量零序电压,只需采用电流互感器。

0.3.4 5次谐波分量法

由于变压器等电气设备具有非线性特性,单相接地故障电流中存在着谐波信号,并且以5次谐波分量为

谐波之所以可以利用,主要在于消弧线圈的补偿仅仅是针对零序基波电流的,其总



容量依据电网的总电容电流来确定，因此消弧线圈的电抗满足

$$X_L = \omega L = p \frac{1}{\omega C_{0\Sigma}} = pX_C \quad (0-1)$$

式中 X_L ——消弧线圈的感抗；

ω ——基波电流的角频率；

L ——消弧线圈的电感；

p ——消弧线圈的和谐度；

X_C ——电网的总容抗；

$C_{0\Sigma}$ ——电网总的对地分布电容。

对于5次谐波，在一定的中性点谐波电压作用下，电容的容抗将减小至基波情况的1/5，而消弧线圈的电抗则要增加为基波情况的5倍。可见，对于5次谐波电流，消弧线圈的阻抗要比全部分布电容的阻抗大得多，因而消弧线圈的补偿作用不会对5次零序谐波电流的大小和方向产生太大影响。

5次谐波分量法的基本原理是，消弧线圈对5次谐波的功率补偿作用仅相当于工频分量的1/25，故障线路上的零序5次谐波电流比非故障线路上的零序5次谐波电流大且二者方向相反。5次谐波分量法的缺点是灵敏度较低，因为故障电流中5次谐波含量很小。为此，有人提出了谐波平方和法，主要是将3、5、7次等高次谐波分量求平方和后作为故障选线信号，虽然能在一定程度上克服了单一的5次谐波信号小的缺点，但并不能从根本上解决问题。

0.3.5 残流增量法

残留增量法是在线路发生永久性接地故障时，通过增大消弧线圈的脱谐度或中性点投入电阻来降低零序阻抗，提高故障线路零序电流，只有故障线路中的零序电流（故障点残流）会随之增大^[7]。

这种方法是以为人为增大故障电流，牺牲自动跟踪消弧线圈功能为代价的，有可能因为故障残流的增大而发生弧光接地过电压，而且操作复杂，在过渡阻抗很大时，也会出现误判，只适用于具有自动调节功能的消弧线圈。

0.3.6 零序导纳法

零序导纳法的原理是，假定配电网中有数条馈电线路，在电网正常运行下利用消弧线圈适当的失谐状况和位移电压的相位改变，实时计算每条线路的对地导纳，如果所有零序导纳系数都不超过健全电网限定的允许值，就将其存储起来作为相应线路的参考值；当任何一条线路发生单相接地故障时，重新计算每条线路的对地导纳，比较故障前后线路零序导纳的变化，便可检出发生接地故障的线路。

零序导纳故障法在欧洲国家研究较多，主要用来检测高阻接地故障。该方法需要复杂的信号处理技术和灵敏、精确的测量变送通道做保障，否则将得不到可靠的基波电流向量，使该方法失去价值。该方法不适用于消弧线圈不能自动调谐的系统，对于间歇性电弧接地故障几乎是失效的。

0.3.7 小波分析法

近年来将小波变换用于继电保护中的研究十分活跃,国内外许多专家学者在研究中将小波分析引入到故障选线中,利用小波变换处理故障信号,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,可对接地支路进行判别。

故障信号的暂态特性复杂,故障条件不同,故障暂态量的频率成分、衰减特性、频谱能量分布差异很大,如在相电压过零时发生故障,系统中就不存在高频暂态容性电流。为了避免故障条件对选线的影响,许多研究者假设接地故障发生在相电压过 $\pi/2$ 时刻,弧光电阻为一固定值,这些假设都限制了小波分析法在实际中的应用,而且小波变换尺度的选取及特征量在尺度上的定位缺乏理论依据。

0.3.8 首半波法

首半波法的基本原理是,假设单相接地故障发生在相电压接近最大值瞬间,此时故障相电容的电荷通过故障线路向故障点放电,以零序电压为参考方向,非故障线路零序电压瞬时值与零序电流瞬时值在故障后的首半波里具有相同极性,故障线路零序电流瞬时值在首半波与零序电压瞬时值具有相反的极性。

由机械损伤、雷击等外因引起的单相接地故障很多,接地故障并不总发生在相电压接近最大值瞬间;而通道零漂、不平衡电流等各种干扰可能会改变首半波的极性,因此首半波法在现场应用中的可靠性不高。

0.3.9 能量法

零序电流和零序电压乘积的积分称为能量函数。单相接地后非故障线路的能量函数总是大于零,故障线路上的能量函数总是小于零,且故障线路能量等于所有非故障线路和消弧线圈能量之和。能量法是通过比较能量函数的方向和大小识别故障线路。能量法选线不受负荷谐波源和暂态过程的影响,灵敏性高。能量函数本质上是瞬时功率的累加,由于瞬时无功功率为交替变化的周期函数,因此其实质是零序有功功率在暂态信号上的应用。能量法的缺点是有功分量比例小,对暂态信号的利用不充分,积分函数易将一些固定误差累积,因此在实际中的应用效果还有待观察。

0.3.10 Prony 法

Prony 法是将故障零序电流看成是由不同频率、不同幅值、不同初始相位的按指数衰减的正弦函数的组合,采用指数函数的线性组合拟合故障电流的频谱分析方法^[8]。利用 Prony 法分析高频分量的频率和直流分量,具有较高的计算精度,但计算量较大,不便于工程应用。

0.3.11 其他故障选线方法

其他故障选线法有模型参数识别法、人工智能法、信息融合法等。模型参数识别法首先对每条线路建立其外部故障下的数学模型,利用零序电压、电流数据求解模型参数,依据得到的线路对地电容判断实际发生的故障是否符合所建立的模型,从而进一步识别出故障线路。人工智能选线法是将故障后系统各线路零序电流的幅值和相位组合起来,将此看作是此类故障的一个模式,这样把故障选线问题转变为一种识别故障电流模式所



属类别的模式识别问题。信息融合法从信息融合角度出发,通过粗糙集理论及证据理论对故障样本进行数据挖掘和知识发现来识别故障线路。目前应用于谐振接地系统故障选线的信息融合技术主要有可拓理论、人工神经网络、粗糙集理论、D—S证据理论等。

单一的选线方法具有各自的局限性和动作死区,无法满足谐振接地系统的各种故障情况,不能实现100%的正确选线。使用信息融合技术,采用更多的故障特征进行综合故障选线,有望提高选线的准确度。

以上选线方法利用了现代分析工具,但仅在信号处理层次上做出了改进,没有深入分析信号的本质特征,实际应用效果还有待检验。

0.4 配电网故障选线的难点

综合国内外研究现状,故障选线技术经过多年的研究与实践取得了一定的理论研究及应用成果,但作为供电领域一项重要的实用技术,故障选线技术的发展还远不够理想,已有的选线装置还未达到在电网中推广应用所应具备的可靠性和准确性,尤其是在中性点经消弧线圈接地的谐振配电网中,选线的可靠性较差。到目前为止,该项技术仍然不够成熟,尚无准确可靠的微机选线装置能准确动作于跳闸,致使不少变电站仍不得不采用原始的顺序拉闸方法确定故障线路,大大降低了供电安全性。作为现场运行中的一大难题,故障选线的难点主要体现在五个方面。

0.4.1 故障稳态信号微弱,检测灵敏度低

中性点不接地电网的单相接地故障电流小,经消弧线圈补偿后的接地电流更小,甚至比健全线路流过的电流信号还小,一般小于2~5A,有的甚至只有0.2~0.5A,其中电流的有功分量和谐波分量就更小。这是所有基于稳态量的故障选线技术面临的主要问题之一。

0.4.2 单相接地状况复杂,故障点电弧影响大

配电网的单相接地故障可能是直接接地、雷击放电接地、电阻接地、电弧接地。单相接地故障一般伴随有电弧现象。绝大多数永久性接地故障都是有一个发展过程,通常是经历间歇性电弧接地→稳定电弧接地→直接接地发展而来。电弧燃烧是典型的暂态非平稳过程,稳态过程基本不会出现,因而不会出现稳定的故障电流。

0.4.3 现场干扰大,信噪比小

干扰主要来源于三个方面:故障选线装置的装设地点电磁干扰大,零序回路对高次谐波的放大作用及不平衡电流的影响大,故障电流叠加在较大的负荷电流上。

0.4.4 消弧线圈补偿度影响大

当消弧线圈处在全补偿状态时,接地点稳态故障电流中仅含有有功分量,此时故障电流最小,且与零序性质的中性点位移电压同相位;当消弧线圈处在欠补偿状态时,接地点稳态故障电流中不仅含有有功分量,同时还含有容性无功电流分量,此时稳态故障电流相位超前于零序性质的中性点位移电压;当消弧线圈处在过补偿状态时,接地点故障电流中不仅含有有功分量,同时还含有感性无功电流分量,此时故障电流相位滞后于

零序性质的中性点位移电压；当消弧线圈采用过补偿运行方式时，故障线路和非故障线路的稳态特征差别非常微小。

以上四个方面的技术难题及长期的现场实践证明：在中性点经消弧线圈接地系统中，基于单相接地故障稳态量信息的故障选线方法存在不可避免的缺陷，因而许多相关学者把研究重点转向了对故障暂态量信息的提取和利用上。

0.4.5 故障暂态特性复杂，随机性强

发生单相接地故障时，故障电压和电流在暂态过程中含有丰富的特征量，其值较稳态时大数倍甚至数十倍，而且故障暂态量不受消弧线圈补偿度变化的影响。若在故障选线中能充分利用这些暂态量，可有效克服稳态量选线存在的各种缺陷，将非常有利于故障选线问题的有效解决。但是故障信号的暂态特性非常复杂，不同的故障发生条件会直接导致故障暂态量的频率成分、振荡特性、频谱能量分布差异很大。为了避免故障条件对故障选线的影响，通常假设接地故障发生在相电压过峰值附近，弧光电阻为一固定值，这些假设严重制约着基于故障暂态量选线装置的可靠性能。如何判断并避免接地点过渡阻抗、故障时刻以及线路长短和结构对故障信号暂态特性的影响，是暂态量故障选线技术中无法回避的问题。

0.4.6 中性点经消弧线圈接地系统中存在零序瞬时功率倒相

消弧线圈一般运行在过补偿和全补偿状态，单相接地故障发生后，故障线路首端流过的零序电流为感性电流，随后由于零序电压的作用，消弧线圈开始，对故障点电流起补偿作用，故障线路首端及故障点流过的电流逐渐变为容性电流，因此单相接地暂态过程会出现倒相现象。倒相现象影响暂态量选线方法的可靠性。

除了上面所论述的技术难点外，还有一个非常重要的原因：现有研究缺乏对单相接地故障发生机理进行系统性的分析和研究，而过分依赖于数学分析工具。由于单相接地故障边界条件复杂，随机性大，如何从信号中准确、充分地提取故障信息是实现故障选线的前提。基础性研究工作的缺失，尤其是故障暂态特性的研究及利用方式的缺失，是导致对故障量理解和运用出现片面性的直接原因，也是导致故障选线装置可靠性不高的根本原因^[9]。

本书主要论述谐振接地配电网中的单相接地故障及选线技术，对于其他非有效接地方式配电网的单相接地故障，由于相关书籍较多，选线技术也较为成熟，本书不论述与此方面有关的内容。

0.5 相 关 术 语

(1) 小电流接地系统 (neutral point ineffectively grounded system)：中性点不接地或经消弧线圈或经高阻抗接地的电力系统，又称非有效接地系统^[10]。

(2) 系统电容电流 (system capacitive current)：三相系统总的电容电流。

(3) 单相接地 (single-phase to grounding)：非有效接地系统的某一相发生的接地

故障。

(4) 永久接地 (permanent grounding): 非有效接地系统单相接地后在人工修复之前一直保持接地状态。

(5) 瞬间接地 (instantaneous grounding): 非有效接地系统单相接地持续一段时间后自动恢复到正常状态。

(6) 系统单相接地电容电流 (single-phase grounding capacitive current): 中性点不接地或中性点谐振接地系统发生单相接地时流经接地点的电容电流。当系统发生单相金属性接地时, 系统单相接地电容电流数值等于或接近系统电容电流。

(7) 残流 (residual current): 谐振接地系统发生单相接地时, 经消弧线圈补偿后流过接地点的全电流。

(8) 启动电压 (threshold voltage): 装置判断系统发生单相接地从而进入补偿状态的系统中性点对地电压。

(9) 金属性接地故障 (direct grounded fault): 系统某一相直接与地连接的故障, 此时系统中性点对地电压通常达到或接近相电压。

(10) 阻抗性接地故障 (resistance): 系统某一相经过一定的阻抗与地连接的故障, 此时系统中性点对地电压受接地阻抗影响, 通常小于相电压。

(11) 电弧接地故障 (arc grounded fault): 系统某一相经过电弧与地连接的故障。

(12) 间歇性电弧接地故障 (intermittent arc grounded fault): 电弧熄灭和重燃相互交替的弧光接地故障。

(13) 故障选线装置 (single-phase grounding fault line selection device): 非有效接地系统中用于检测单相接地、选线或进一步发出跳闸命令的装置。

绪论参考文献

- [1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 束洪春. 配电网故障选线. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 牟龙华, 孟庆海. 供配电安全技术. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 龚静. 配电网综合自动化技术. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 曾祥君, 尹项根, 于永源, 等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法. 中国电机工程学报, 2001, 20 (11): 29~32.
- [6] 唐轶, 陈庆, 刘昊. 补偿电网单相接地故障选线. 电力系统自动化, 2007, 31 (16): 83~86.
- [7] 牟龙华, 周伟, 岳清玉. 消弧线圈并串电阻接地式与接地保护原理研究. 煤炭学报, 2009, 34 (8): 1138~1142.
- [8] 张新慧. 基于 Prony 算法的小电流接地故障暂态选线技术 [D]. 山东: 山东大学, 2008.
- [9] 张艳霞, 王清亮. 应用故障暂态特性实现配电网故障选线的新方法. 电力系统自动化, 2009, 33 (16): 76~80.
- [10] DL/T 1057—2007《自动跟踪补偿消弧线圈成套装置技术条件》, 2007.

谐振接地配电网的补偿消弧原理

1.1 消弧线圈

消弧线圈是一种铁芯带有空气间隙的电感线圈，是1916年由德国工程师彼得逊（W. Petersen）首先提出并应用的，因此，消弧线圈又称为彼得逊线圈（Petersen Coil）。在配电网中性点与大地之间接入消弧线圈后，单相接地电容电流就会得到有效补偿，可使故障点电弧不易重燃，从而防止事故扩大，因此通常把接有消弧线圈的配电网称为补偿电网或谐振接地电网。

1.1.1 消弧原理^[1]

在中性点不接地配电网中发生单相接地故障后，接地点的接地电流是非故障相对地电容电流之和，为了限制接地点故障电流的值，在电网中性点接入消弧线圈，此时流过接地点的电流为消弧线圈的电感电流与系统电容电流相量之和。因为电感电流与电容电流方向相反，可相互抵消，减小了流过接地点的电流，当残流小于10A时，接地电弧过零后易于熄灭，从而防止事故扩大。一般可限制残流在5A以下。

图1-1、图1-2是单相接地示意图及其相量图。图中， \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 为电源三相电动势， C_0 为每相导线对地电容，略去线路损耗阻抗，A相接地后接地点流过的电流为

$$\dot{I}_t = \dot{I}_C + \dot{I}_L \quad (1-1)$$

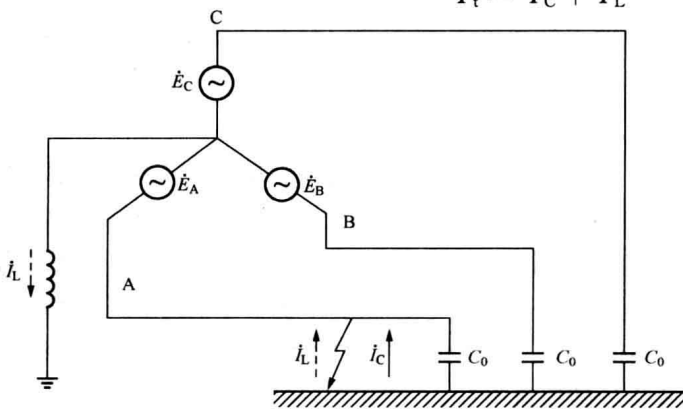


图 1-1 单相接地示意图

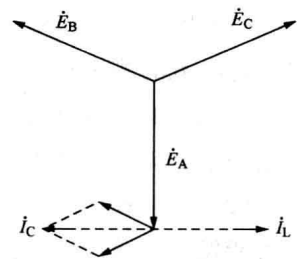


图 1-2 单相接地相量图