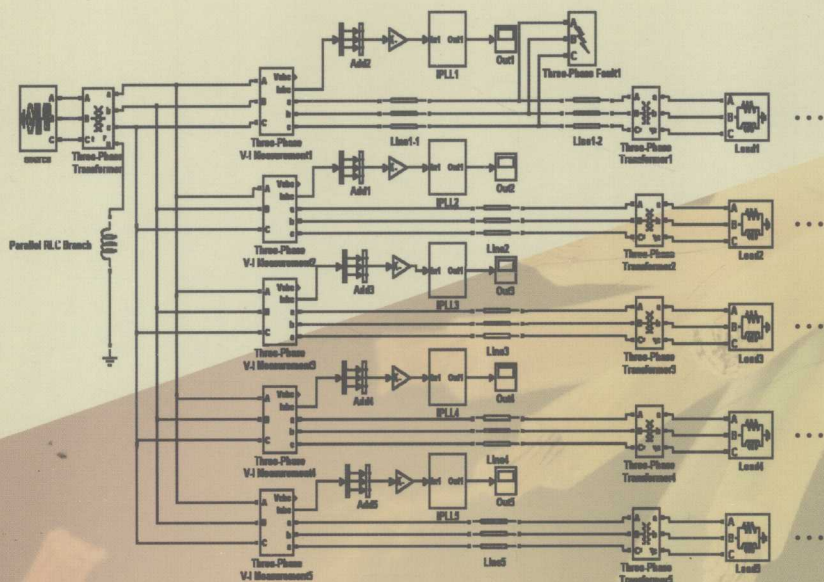




● 张志霞 编著

小电流接地系统 单相接地故障选线理论研究

Small Current Grounding Power
System Fault Line Selection Theory Research



014039177

TM711
38

辽宁省优秀自然科学著作

小电流接地系统单相接地 故障选线理论研究

张志霞 编著



辽宁科学技术出版社

沈阳



北航

C1726641

TM711

38

© 2014 张志霞

图书在版编目 (CIP) 数据

小电流接地系统单相接地故障选线理论研究 / 张志霞编著. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2014.4

(辽宁省优秀自然科学著作)

ISBN 978-7-5381-8539-3

I. ①小… II. ①张… III. ①小电流接地系统 IV. ①
TM711

中国版本图书馆CIP数据核字 (2014) 第049877号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路29号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳新华印刷厂

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 12.75

字 数: 280千字

印 数: 1~2000

出版时间: 2014年4月第1版

印刷时间: 2014年4月第1次印刷

责任编辑: 李伟民

特邀编辑: 王奉安

封面设计: 嵘 嵘

责任校对: 李淑敏

书 号: ISBN 978-7-5381-8539-3

定 价: 40.00元

联系电话: 024-23284360

邮购热线: 024-23284502

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

《辽宁省优秀自然科学著作》评审委员会

主任：

康捷 辽宁省科学技术协会党组书记、副主席

执行副主任：

黄其励 东北电网有限公司名誉总工程师
中国工程院院士
辽宁省科学技术协会副主席

副主任：

金太元 辽宁省科学技术协会副主席
宋纯智 辽宁科学技术出版社社长兼总编辑 编审

委员：

郭永新 辽宁大学副校长
陈宝智 东北大学安全工程研究所所长
刘文明 大连船舶重工集团有限公司副总工程师
李天来 沈阳农业大学副校长
刘明国 沈阳农业大学林学院院长
邢兆凯 辽宁省林业科学研究院院长
辽宁省科学技术协会委员
吴春福 沈阳药科大学校长
辽宁省科学技术协会常委
张兰 辽宁中医药大学附属医院副院长
王恩华 中国医科大学基础医学院副院长
李伟民 辽宁科学技术出版社总编室主任 编审

序言

安全、可靠、优质、经济是电力系统运行的基本要求。电力线路的运行关乎国民生产、人民生活的各个方面。电力系统不同的运行方式，关系到供电的可靠性、设备的安全性、运行的经济性。在我国6~66 kV中低压配电网中广泛采用小电流接地系统。小电流接地系统中单相接地故障是电力系统各类故障中最容易发生的故障，约占各类短路故障的90%以上。当系统发生单相接地故障时，非故障两相电压升高为原来的 $\sqrt{3}$ 倍，这样会对电力系统绝缘薄弱点处造成威胁而引发事故。因此，必须及时准确地确定出故障线路，并将其在最短时间内修复，以免对用户造成不利影响。

本书主要从以下两个方面对小电流接地故障进行了研究：一、对近年来各种选线、定位方法进行了分析，总结了影响选线准确性的原因，并对故障后稳态、暂态信号量进行了阐述。二、详细阐述了4种改进后小电流接地故障选线的方法：零序导纳法、基于改进型锁相环的选线方法、小波变换法、自适应陷波滤波器法，利用Matlab/Simulink软件进行仿真分析，验证了上述理论的正确性，并对上述理论进行分析、对比，总结它们的选线优势，为进一步研究提供依据。

本课题得到辽宁省自然科学基金(20092063)、沈阳农业大学研究生创新培育项目、凌海供电有限责任公司等资助。本课题获得国家专利3项，获得辽宁省自然科学学术成果一、二等奖各1项，发表学术论文10余篇，指导完成博士研究生论文2篇、硕士研究生论文4篇。

本书是众人智慧的结晶，除封面署名的作者外，参与编写和资料整理的人员还有田景辅(辽宁省电力有限公司)、刘晓、李欣(凌海供电有限责任公司)、刘建国(朝阳供电公司)、王九龙、王志磊。在此表示由衷感谢。需要特别致谢沈阳农业大学朴在林教授，感谢他为本书写作所提供的帮助与支持。

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系统的教学参考书。

由于撰写时间与作者水平有限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

编著者

2013年6月10日

目 录

1 概论	001
1.1 配电网单相接地故障简介	001
1.2 国内外选线方法研究现状	003
1.3 小电流接地系统各种选线原理的分析与比较	004
1.3.1 基于零序电压电流工频分量的方法	004
1.3.2 5次谐波法	009
1.3.3 S注入法	009
1.3.4 小波法	012
1.3.5 7次谐波选线法	015
1.3.6 相关分析法	017
1.3.7 模糊控制及故障选线原理	021
1.3.8 配电网智能故障选线技术初探	024
1.3.9 证据理论在小电流接地系统故障选线中的应用	033
1.4 影响故障选线准确性的原因	042
1.4.1 单相接地故障类型的建模较困难	042
1.4.2 装置本身特性对选线特征量的影响	042
1.4.3 中性点接地方式的影响	043
1.4.4 互感器特性的影响	043
1.4.5 线路不平衡电流的影响	043
1.4.6 发展趋势	044
1.5 提高小电流接地选线装置选线正确率的措施	047
1.5.1 把好设备选型和出厂验收关	047
1.5.2 加强运行维护管理	048

1.5.3	正确施工	048
1.6	小电流接地系统故障定位	049
1.6.1	小电流接地系统故障定位的特点和意义	049
1.6.2	国内外研究现状	050
1.6.3	小电流接地系统各种定位原理的分析与比较	050
1.6.4	小电流接地故障定位存在的主要问题及困难	055
2	小电流接地系统单相接地故障特征分析	057
2.1	小电流接地系统单相接地故障的计算方法	057
2.1.1	短路计算的基本假设	057
2.1.2	对称分量法	058
2.1.3	小电流接地方式的主要特点	059
2.2	小电流接地系统发生单相接地故障的稳态特征分析	060
2.2.1	中性点不接地系统对地电压、零序电流的分析	061
2.2.2	中性点经消弧线圈接地系统对地电压、零序电流的分析	065
2.3	小电流接地系统发生单相接地故障的暂态特征分析	068
2.3.1	暂态电容电流	069
2.3.2	暂态电感电流	070
2.3.3	暂态接地电流	071
2.4	零序不平衡量的抑制	071
2.4.1	零序不平衡量产生的原因	072
2.4.2	抑制零序不平衡量的方法	072
2.5	本章小结	073
3	零序导纳与小电流接地选线	074
3.1	零序导纳的计算	074
3.2	基于零序导纳的中性点不接地选线方法	074
3.2.1	零序导纳的计算	074
3.2.2	零序导纳法判据	075
3.3	基于零序导纳法的中性点经消弧线圈接地选线方法	076
3.3.1	零序导纳的计算	076
3.3.2	零序导纳法判据	077
3.4	基于区段零序导纳的故障定位	077
3.4.1	定位原理	077
3.4.2	定位方法实现	079
3.5	MATLAB仿真软件	079

3.5.1	仿真软件简介	079
3.5.2	建模所需参数的计算	080
3.5.3	建模所需三相变压器参数的计算	085
3.6	Matlab 建模	087
3.6.1	理想电源	087
3.6.2	主变模块	088
3.6.3	导线模型	088
3.6.4	监测零序导纳波形	089
3.6.5	三相故障发生器	090
3.6.6	负荷环节	090
3.6.7	消弧线圈	091
3.7	Matlab 建模中参数的设定	091
3.8	仿真与仿真结果分析	094
3.8.1	中性点不接地系统单相接地故障的仿真结果及分析	095
3.8.2	中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障的仿真结果及分析	097
3.5	本章小结	098
4	基于改进型锁相环的故障选线	099
4.1	5次谐波选线原理	099
4.2	经典锁相环	100
4.2.1	锁相环的国内外研究现状	100
4.2.2	锁相环的种类	101
4.2.3	经典锁相环	102
4.2.4	锁相环的基本工作过程	106
4.2.5	锁相环路的工作状态	106
4.3	改进型锁相环	107
4.3.1	改进型锁相环的结构	107
4.3.2	改进型锁相环的数学模型	108
4.3.3	相位调整电路	109
4.3.4	幅值调整电路	109
4.4	基于改进型锁相环的谐波选线方法	110
4.4.1	信号提取	110
4.4.2	数据处理并选线	111
4.5	仿真分析	112
4.6	算例分析	113
4.6.1	单相间歇性电弧接地故障	113

4.6.2	单相 1Ω 接地故障	114
4.6.3	单相 10Ω 接地故障	115
4.7	本章小结	117
5	小波变换理论与小电流接地选线	118
5.1	傅里叶变换	118
5.2	小波变换	119
5.2.1	小波理论的产生与发展	119
5.2.2	小波变换理论	120
5.2.3	连续小波变换	121
5.2.4	离散小波变换	121
5.2.5	多分辨率分析	121
5.2.6	Mallat算法	123
5.2.7	小波变换的奇异性检测理论	124
5.2.8	故障选线原理	125
5.2.9	故障选线的具体实现	126
5.3	仿真模型的确立	128
5.4	选线算例	128
5.4.1	中性点不接地系统仿真	128
5.4.2	中性点经消弧线圈接地系统仿真	135
5.5	基于小波分析的定位技术研究	139
5.5.1	基于小波分析的行波故障测距原理	139
5.5.2	小电流接地系统单相接地故障行波测距仿真	140
5.6	行波故障测距算例仿真	143
5.6.1	接地电阻对行波测距的影响	143
5.6.2	故障相角对行波测距的影响	145
5.7	本章小结	148
6	基于自适应陷波滤波器的故障选线	149
6.1	自适应陷波滤波器的发展	149
6.2	自适应陷波滤波器原理	150
6.2.1	陷波滤波器	151
6.2.2	自适应算法	152
6.3	自适应陷波滤波器的结构	153
6.4	自适应陷波滤波器的性能分析	157
6.4.1	周期轨道的合理性	157

6.4.2	系统的稳定性	158
6.4.3	系统的响应时间	159
6.5	基于自适应陷波滤波器的故障选线判据	160
6.6	仿真分析	160
6.7	本章小结	162
7	四类选线方法的综合分析	163
7.1	基于零序导纳法的故障选线分析	163
7.2	基于改进型锁相环的故障选线分析	164
7.3	基于小波变换的故障选线分析	165
7.4	基于自适应陷波滤波器的故障选线分析	167
7.5	本章小结	167
8	小电流接地选线装置的研制	169
8.1	采样电路模块的设计	169
8.1.1	电压形成回路	171
8.1.2	低通滤波器	171
8.1.3	多路模拟开关	171
8.1.4	采样保持	173
8.2	A/D转换模块的设计	173
8.2.1	零序电流的转换	174
8.2.2	零序电压转换	174
8.3	单片机的控制系统模块的设计	176
8.3.1	片内存储器	176
8.3.2	JTAG调试和边界扫描	178
8.3.3	输入输出端口的配置	178
8.3.4	看门狗计数器	178
8.3.5	系统时钟初始化	179
8.3.6	C8051F040中断系统	179
8.4	输出显示与键盘操作模块的设计	180
8.4.1	122×32A液晶显示器	180
8.4.2	键盘	181
8.4.3	电平转换电路	182
8.5	软件的开发环境	182
8.6	软件开发的需求分析	183
8.7	装置实现的主要功能	183

8.8	主要程序模块的设计	184
8.8.1	主程序设计	184
8.8.2	程序的全局变量及数组使用说明	185
8.8.3	主模块说明	185
8.8.4	中断采样服务子程序	186
8.8.5	故障处理模块	186
8.8.6	显示模块	186
8.9	本章小结	187
	参考文献	188

1 概论

1.1 配电网单相接地故障简介

随着经济建设的全面发展,人们对电的需求越来越大,配电网也越来越密集。安全、可靠、优质、经济是电力系统运行的基本要求。电力线路的运行关乎国民生产、人民生活的各个方面。电力系统不同的运行方式,关系到供电的可靠性、设备的安全性、运行的经济性等。

在我国6~66 kV中低压配电网中广泛采用小电流接地系统,又称中性点不直接接地系统(NUGS),包括中性点不接地系统(Neutral Un-grounded Power System,即NUS)、中性点经消弧线圈接地系统(Neutral Resonant Grounded Power System,即NES)和中性点经高阻接地系统(Neutral Resister Grounded Power System,即NRS),小电流接地系统中单相接地故障是电力系统各类故障中最容易发生的故障,而之所以被广泛应用是由于它具有显著的优点,即以小电流接地为接地方式的配电网,当系统中有一相发生地故障时不形成低阻抗的短路回路,而是由线路对地电容形成高阻抗回路,短路电流非常小,同时发生单相接地故障后线电压依然保持对称,短时间内不会对负荷的连续供电造成一定的影响,因此故障后不必立即跳闸,相关规程规定可带故障运行1~2 h,提高了供电的可靠性。

但是以小电流接地为接地方式的配电网,当系统中有一相发生接地故障时,非故障两相电压升高为原来的 $\sqrt{3}$ 倍,这样会对电力系统绝缘薄弱点处造成一定的威胁,引发事故;此外,发生间歇性电弧接地还会引起全系统的过电压,这将对系统绝缘形成更严重的危机。由于过电压而引发电力电缆爆炸,TV保险熔断甚至烧坏,母线短路等事故,大大地降低了电力系统的运行可靠性,破坏系统安全运行,因此必须及时找出故障线路,尽快排除故障。近年来,随着配电网规模的扩大和城市农村电网改造的进一步深化,线路总长度增加,尤其是电缆线路的大量使用,使得电力系统电容电流增大,这样很容易诱发持续时间长、影响面广的间歇电弧过电压,同时过电压也变得越来越严重,会损坏电力网络中的设备,影响电力系统的安全运行,因此,当系统中有一相发生接地故障时,必须及时准确地确定出故障线路,并将其与系统隔离或者切除。

在小电流接地系统中,发生单相接地故障时,系统出现零序电压,线路上有零序电流通过。对于中性点不接地系统发生单相接地故障,非故障线路上通过的零序电流在数值上等于线路本身对地电容电流,其相位超前零序电压 90° ,容性无功功率的方向是由

母线流向线路；故障线路出口通过的零序电流是非故障元件对地电容电流之和，其相位滞后零序电压 90° ，容性无功功率的方向是由线路流向母线。对于中性点经消弧线圈接地的系统发生单相接地故障，流过接地点的电流除了全系统对地电容电流之和外，还有消弧线圈产生的电感电流，此电流与电容电流相抵消，大大地减小了流经接地点的电流。为防止线路发生串联谐振，补偿方式通常采用过补偿，这样故障线路与非故障线路零序电流方向一致，故障线路零序电流的大小发生了变化，给选线增加了难度。中性点经小电阻接地方式的特点是，一旦发生单相接地故障，故障线路立即被切除，继电保护选择性好。但由于其不能区分瞬时单相接地故障与永久性单相接地故障，使瞬时单相接地故障也跳闸，影响了供电可靠性。同时，采用这种方式，需具备性能良好的开关设备及备用电源等条件，否则跳闸停电频繁，供电可靠性差，开关的维护工作量加重。对于架空线电网，该方式将对通信线路产生电磁干扰。因此，采用中性点经消弧线圈接地的方式具有供电可靠性高、电磁干扰小等优点，但不足的是在系统发生单相接地故障时残流小、实现继电保护选线较为困难，制约了其优点的充分发挥。中性点经小电阻接地的方式具有继电保护选择性好等优点，可快速切除接地故障线路，但跳闸率高，供电可靠性差，对设备冲击较大。

单相接地故障占小电流接地系统故障的80%以上。发生单相接地故障后故障电流小，系统中电气量的故障特征不明显，准确及时地判断出故障所在的线路有一定的难度。谐振接地系统更是如此，所以给故障选线增加了不小的难度。通过调研并查阅大量资料发现，现有的选线技术在现场的选线效果并不理想，主要原因是在实际配电网运行中，由于在小电流接地系统中发生单相接地故障的情况下，单相短路接地故障将不会形成大电流回路，故障电流主要由线路对地电容提供，这个电流在数值上是很小的，为10A左右。而零序电流对于10 kV架空线路来说，每30 km线路产生大约1 A的零序电流，电缆线路产生零序电流稍大一些。这样微弱的故障信号混杂在上百安培的负荷电流中，使得传统的基于过流、方向、距离等原理的继电保护装置根本不可能正确反应故障的情况，再加上小电流系统运行方式多样，线路结构多变，故障情况复杂，单相接地故障电流仅为线路对地电容电流或消弧线圈补偿后的残流，数值非常小，使得故障特征不明显。一些选线方法都存在着各自的使用局限性和动作死区，因此，配电网的单相接地故障选线至今仍是需要研究解决的难题。虽然我国在20世纪80年代开始对基于微机系统的小电流接地选线装置进行研究和推广，至今仍没有很好的解决实际问题。传统的选线方法为顺序拉闸法，既费时费力，又造成了用户不必要的停电损失，而且不利于人身及设备安全。小电流接地选线技术一直没有得到很好的解决。此外，单相接地故障状况复杂，不同系统在馈线长度、中性点接地方面有较大差异，而且系统运行方式多变，要求选线装置有较大的适应性和灵活性。由此可见，小电流接地选线方法研究及新的高性能选线装置的开发具有较大的潜力和挑战性。小电流接地故障的快速准确定位对于提高供电可靠性、减少停电损失具有重要的意义，现场也迫切需要一种有效的故障定位方法。

1.2 国内外选线方法研究现状

为了解决小电流系统单相接地故障后的选线问题,国内外研究人员对其的研究一直没有停止过,当然也取得了一些成就,提出了不少选线方法并研发了几种选线装置。

国外对小电流接地系统的应用和研究起步较早且研究也比较多,苏联在20世纪以来,以小电流接地为接地方式的电力系统的应用就已经很多,该国的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(NUS & NES)的系统,研究出的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,并研制出了电磁式继电器、晶体管、模拟集成电路和数字电路几代装置,这些装置在从苏联的一些行业都得到了一定的应用,只是在该国利用微机实现选线的装置比较少。

日本在钢铁、化工这些行业中,主要采用高阻接地方式和不接地方式(NRS & NUS)的配电系统为其供电,系统中有一相发生接地故障的选线原理以基波无功方向法为主,最近几年,随着计算机技术的快速发展,神经网络也被应用到单相接地保护中。

在德国,主要采用中性点经消弧线圈接地方式(NES)的配电网,该国于20世纪30年代就提出了利用发生单相接地故障时瞬间暂态过程的特征实现选线的单相接地保护方法——首半波法,并依据该选线方法的原理研发生产了便携式的单相接地报警装置。

在法国,中性点经电阻接地方式的系统(NRS)在配电网中被采用了几十年后,从20世纪90年代开始采用中性点经消弧线圈接地方式的系统(NES),而原先的中性点经电阻接地的配电系统逐渐退出了,其有一相发生接地故障的选线方法主要为有功分量法和零序导纳法等;近年来,又提出了利用Prony算法和小波变换算法来提取单相接地故障暂态过程中的有用信息的选线方法。

美国认为,对以小电流接地为接地方式的配电网,当系统中有一相发生接地故障时的保护很难,而且接地故障会引起严重的过电压,对用户安全可靠地供电的目的不容易达到,因此为了保证供电的可靠性他们在供电网架结构上多投资而不采用小电流接地系统;但是,近年来电气电子工程师协会(IEEE)的专题报告中提出该国应该加强和重视以小电流接地为接地方式的配电网接地保护的的应用的研究。

在我国,从1958年起就一直对此问题进行研究,提出了多种选线方法,并开发出了相应的装置。已经提出的选线方法均以零序电压来启动保护或选线装置,因此可根据是否利用故障电流把它们分成两类:第一类包括比幅法、比相法、群体比幅比相法、首半波法、谐波电流方向法、五次谐波分量法、有功分量法、能量法,还有近年出现的应用小波分析、最大A ($I\sin\phi$)原理、模糊推理或模式识别来实现故障选线的多种方法。第二类包括拉线法、注入信号跟踪法。随着选线理论的发展,各种选线装置也相继问世,20世纪50年代末,我国就利用接地故障暂态过程研制成功了选线装置。到80年代中期,我国又研制成功了微机接地选线装置,最近又增添了残流增量法微机接地选线装

置。到目前为止, 基于上述不同选线理论已经先后推出了几代产品。但在实际应用中的效果并不十分理想, 所以此问题还有必要进一步研究。

目前, 国内的选线装置多采用零序电流及其高次谐波原理实现故障选线, 首半波法、有功分量法等其他方法均有采用。但是, 小电流系统的一个重要特征就是故障电流稳态分量幅值小, 无论是谐波分量还是基波分量, 都容易被干扰信号所淹没, 二次侧的零序电流又容易受到电流互感器中的不平衡电流的影响。因此, 基于谐波原理的装置在实际运行中易造成误判。

1.3 小电流接地系统各种选线原理的分析与比较

1.3.1 基于零序电压电流工频分量的方法

1.3.1.1 零序网络相频特性及零序电流分布规律

1. 单线路的相频特性

基于零序电压电流工频分量的选线方法以零序电流比幅比相法应用的最为典型。单线路的相频特性如下分析。

在分析较高频率暂态信号特性时, 必须考虑线路自身电感的影响。一般用 π 形网络来等效一条线路, 如图1-1(a)所示。其中 C , L 和 R 分别为该线路对地分布电容、电感和电阻, D 为检测点。

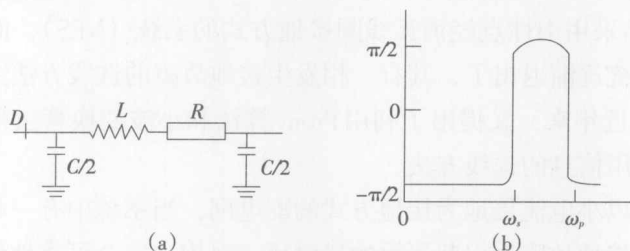


图1-1 单线路模型及相频特性

当 R 相对较小时, 线路的串联谐振频率 ω_s 和并联谐振频率 ω_p 分别为:

$$\omega_s \approx \sqrt{\frac{2}{LC}}, \quad \omega_p \approx \frac{2}{\sqrt{LC}} \approx \sqrt{2}\omega_s \quad (1-1)$$

从检测点 D 看, 该线路等效阻抗的相角和频率关系(简称相频特性)如图1-1(b)所示。当频率在 $0 \sim \omega_s$ 内时, 线路阻抗呈容性, 在 $\omega_s \sim \omega_p$ 频带内呈感性, 大于 ω_p 又呈容性。因此当 R 较小时, 在低频段整条线路可以等效一个电容。

2. 中性点不接地系统零序网络的相频特性及零序电流分布规律

在单相接地故障时, 其零序网络可表示为图1-2所示(开关 K 打开)。 U_0 为故障点在零序网络上的压降; L_0 、 R_0 、 C_0 分别为第 j 条健全线路或者故障线路故障点到母线之间的零序线路电感、电阻和分布电容; D_j 为各出线检测点, L 为消弧线圈零序电感; n

为系统出线数。

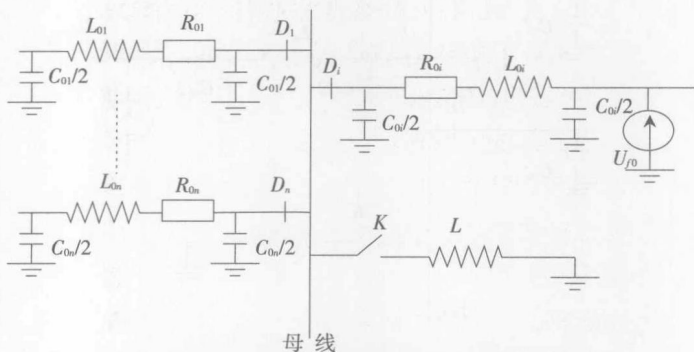


图 1-2 单项接地故障的零序网络等效图

健全线路 j 检测点 D_j 检测的是本线路等效阻抗，其相频特性与单线路的相频特性相同，即串联谐振和并联谐振各只有一次。故障线路 i 检测点 D_i 检测的背后阻抗是所有健全线路总体等效阻抗。它存在多个串联谐振（各条健全线路自身的）过程和并联谐振（所有健全线路之间的）过程。图 1-3 所示为由 4 条简单出线、中性点不接地系统典型的相频特性示意图。更多出线系统故障线的相频特性将更为复杂。

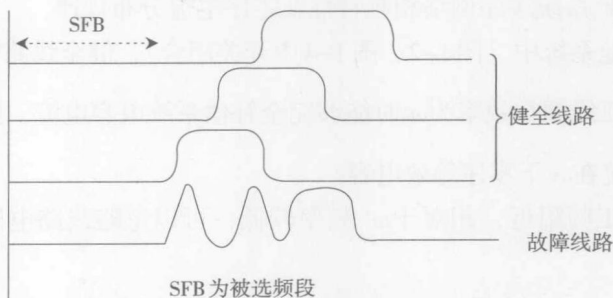


图 1-3 不接地系统零序网络相频特性示意图

如果设 ω' 为所有健全线路自身串联谐振频率的最小值。则在 $0 \sim \omega'$ 频带内，每条健全线路的阻抗均为容性，即故障线 D_i 检测的背后阻抗也为容性，而在频率 ω' 上， D_i 检测的背后网络首次进入谐振状态。频率刚越过 ω' 时， D_i 检测到的背后阻抗就体现为感性。更高频段上的阻抗特性较为复杂，主要取决于系统出线数，各出线长度，线路阻抗等参数。

定义 $0 \sim \omega'$ 为 SFB 频带。配电网架空线路和电缆的电阻都较少，可忽略。则在 SFB 频带内，图 1-2 所示零序网络可简化为如图 1-4 所示。

其中， C_{0j}' 为健全线路 j 在 SFB 频带内的等效电容。

$$C_{0j}' = \frac{C_{0j}}{2} \left(1 + \frac{\omega_{js}^2}{\omega_{js}^2 - \omega^2} \right) \geq C_{0j} \quad (1-2)$$

显而易见， C_{0j}' 是频率 ω 的变量，其大小在 SFB 频带内随频率的增加而增加，即受

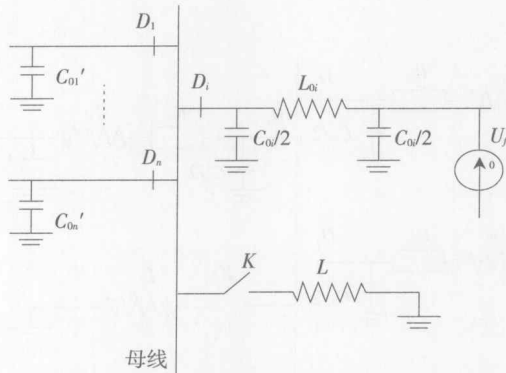


图 1-4 接地故障在 SFB 频带内的零序网络等效图

线路电感影响，等效电容要大于实际分布电容。

根据图 1-4 所有出线检测到的零序电压电流均呈容性关系，即所有健全线路零序电流极性相同，而与故障线路反极性。同时，在故障线路的零序电流幅值等于所有健全线路幅值之和。因此，在 SFB 频带范围内，零序电流存在下述分布规律：故障线路零序电流幅值最大；所有健全线路零序电流极性相同，而故障线路与之相反。

3. 消弧线圈接地系统零序网络相频特性及零序电流分布规律

在消弧线圈接地系统中（图 1-2、图 1-4 中开关闭合），健全线路检测点的相频特性不受影响。假设消弧线圈在频率为 ω_0 时能够完全补偿系统电容电流，则有： $L = \frac{1}{\omega_0^2 C_0}$ 。式中， C_0 为整个系统在 ω_0 下零序等效电容。

由于 ω_0 一般在工频附近，相对于 ω' 频率较低，可以忽略线路电感的影响，即近似为： $C_0 = \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{0j}$ 。 (1-3)

再令 C_{0h} 为所有健全线路的零序电容： $C_{0h} = C_0 - C_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{0j}$ 。 (1-4)

定义 ρ 为健全线路零序电容和整个系统零序电容之比： $\rho = \frac{C_{0h}}{C_0}$ 。 (1-5)

则在任意频率下接地点经过补偿的故障过电流为：

$$I_f = -I_c - I_L = -\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) I_c \quad (1-6)$$

式中， $I_c = j\omega C_0 \dot{U}_0$ ， $I_L = \frac{\dot{U}_0}{j\omega L}$ 分别为整个系统零序电容和消弧线圈在频率 ω 下流过的零序电流； \dot{U}_0 为频率 ω 下的零序电压。

而故障线路检测到的零序电流 I_i 为：

$$I_i = I_f + I_{i0} = -\sum_{j=1, j \neq i}^n I_{j0} - I_L = -\left(\rho - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) I_c \quad (1-7)$$