

文本复制检测报告单(全文标明引文)

№:ADBD2021R_2021072315351220210723154736311182995860

检测时间:2021-07-23 15:47:36

检测文献: 013

作者: 养方式

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

图书资源

优先出版文献库

学术论文联合比对库

互联网资源(包含贴吧等论坛资源)

英文数据库(涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

互联网文档资源

源代码库

CNKI大成编客-原创作品库

个人比对库

时间范围: 1900-01-01至2021-07-23

检测结果

去除本人文献复制比: 4.5%

跨语言检测结果: 0%

去除引用文献复制比: 3.8%

总文字复制比: 4.5%

单篇最大文字复制比: 0.8% (192)

重复字数: [3130]

总段落数: [7]

总字数: [70125]

疑似段落数: [5]

单篇最大重复字数: [591]

前部重合字数: [1742]

疑似段落最大重合字数: [1130]

后部重合字数: [1388]

疑似段落最小重合字数: [118]



指 标: ☐ 疑似剽窃观点 ☒ 疑似剽窃文字表述 ☐ 疑似整体剽窃 ☐ 过度引用

表 格: 0

公 式: 没有公式

疑似文字的图片: 0

脚注与尾注: 0

10.4% (1130) 10.4% (1130) 013_第1部分 (总10824字)

8.8% (911) 8.8% (911) 013_第2部分 (总10320字)

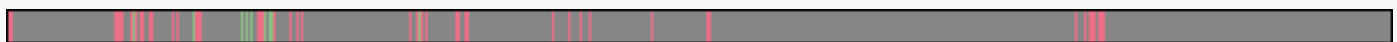
4.3% (380) 4.3% (380) 013_第3部分 (总8874字)

0.9% (118) 0.9% (118) 013_第4部分 (总13503字)

5.4% (591) 5.4% (591) 013_第5部分 (总10990字)

0% (0) 0% (0) 013_第6部分 (总12611字)

0% (0) 0% (0) 013_第7部分 (总3003字)



(注释: 无问题部分 文字复制部分 引用部分)

1. 013_第1部分

总字数: 10824

相似文献列表

去除本人文献复制比: 10.4% (1130)

文字复制比: 10.4% (1130)

疑似剽窃观点: (0)

1 036

2.4% (255)

- 《学术论文联合比对库》- 2019-12-02

是否引证: 否

2 变压器偏磁治理装置的安全性评估和保护方法研究

1.7% (189)

是否引证: 否

	崔浩天(导师：刘连光;刘文琳) - 《华北电力大学(北京) 硕士学位论文》 - 2020-04-01	
3	GIC引发直流偏磁对距离保护Ⅲ段动作性能影响的分析 郑涛;卢婷;杨国生;刘连光; - 《电力系统保护与控制》 - 2015-01-16 1	1.6% (168) 是否引证: 否
4	基于行星际太阳风信息和三维磁流体力学模型预测电网GIC的计算方法 王开让;刘连光;魏恺;刘春明;吴伟丽; - 《中国电机工程学报》 - 2015-12-20	1.3% (138) 是否引证: 否
5	高压直流偏磁对变压器的影响及抑制方法研究 闫振华;怡凯;郝金鹏; - 《河南理工大学学报(自然科学版)》 - 2011-12-15	1.2% (135) 是否引证: 否
6	±660kV银东直流输电对变压器噪声影响分析与对策 张冰;张玉磊;闫广鑫;王小波; - 《山东电力技术》 - 2013-03-15	1.1% (122) 是否引证: 否
7	电力变压器直流偏磁特性研究 原辉(导师：李琳) - 《华北电力大学硕士学位论文》 - 2013-03-01	0.8% (88) 是否引证: 否
8	交流电网地磁感应电流分析的全模型及其应用 徐碧川;潘卓洪;刘玉;文豹;鲁海亮;文习山; - 《电网技术》 - 2015-06-05	0.6% (67) 是否引证: 是
9	直流偏磁对变压器影响的研究 蒯狄正, 刘成民, 万达 - 《江苏电机工程》 - 2004-06-28	0.3% (35) 是否引证: 是
10	直流入侵对变压器励磁特性的影响分析 陈自强;田超; - 《华北电力技术》 - 2013-04-25	0.3% (32) 是否引证: 否
11	广东电网变压器直流偏磁问题及其抑制措施 黄成;吕金壮;刘艳村; - 《广东输电与变电技术》 - 2007-05-10	0.3% (29) 是否引证: 否

原文内容

专业硕士学位论文

电阻型偏磁治理装置对零序保护的影响研究

Research on Influence of Resistance-type Magnetic Bias Treatment Device on Zero-sequence Protection

2021 年 6 月

国内图书分类号: TM72 学校代码: 10079

国际图书分类号: 621.3 密级: 公开

专业硕士学位论文电阻型偏磁治理装置对零序保护的影响研究

硕士研究生：

导师：

企业导师：

申请学位：工程硕士

专业领域：电气工程培养方式：非全日制

所在学院：电气与电子工程学院

答辩日期：2021 年 6 月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM72

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

Research on Influence of Resistance-type Magnetic Bias Treatment Device on Zero-sequence Protection

Candidate:

Supervisor:

Enterprise mentor:

Academic Degree Applied for: Master of Engineering

Speciality: Electrical Engineering

Cultivation ways: Part-time

School:

School of Electrical and Electronic Engineering

Date of Defence: June, 2021

Degree-Conferring-Institution: North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《电阻型偏磁治理装置对零序保护的影响研究》，是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以

明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名： 日期： 年月日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《电阻型偏磁治理装置对零序保护的影响研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户

提供文献传递服务和交换服务。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或其

他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于(请在以上相应方框内打“√”)：

保密□，在年解密后适用本授权书

不保密√

作者签名： 日期： 年月日 导师签名： 日期： 年月日

摘要

直流输电在单极大地运行方式下会向大地注入直流电流，继而在附近接地的交流网络中产生偏磁电流，造成变压器激磁电流畸变，影响变压器甚至电网系统安全稳定运行。为抑制直流偏磁，常用的手段是在变压器中性点接入偏磁治理装置，限制流入变压器的直流电流，但这样会改变电网的零序阻抗，是否会对零序继电保护产生影响需要研究。本文主要研究电阻型偏磁治理装置接入后的影响，主要研究工作和取得成果如下。

(1) 分析了常见的交流系统零序保护的原理，以及三种偏磁治理装置抑制偏磁电流原理，从经济性、可靠性、实现难度等方面综合比较了它们的优劣，选择适用的电阻型偏磁治理装置进行后续分析。

(2) 分析了多种绕组连接方式和中性点接地变压器的零序等效电路，建立了两端接地网的数学模型，计算了接入电阻型偏磁治理装置前后，接入侧和非接入侧零序电流、零序电压、变压器中性点电流、方向元件阻抗角等与零序保护相关的零序电量，研究了对线路零序电流保护、零序方向元件、变压器中性点零序电流保护的影响。

(3) 在 MATLAB/Simulink 中搭建了两端网络的仿真模型，根据工程参考实际选取合适的电阻阻值，并通过控制变压器中性点接入电阻阻值在一定范围内变化，

测量了零序电量的数值，并对串入电阻装置前后对线路和变压器零序 I、II 段整定值保护的影响进行了计算。

研究结果表明，两端系统一侧接入电阻型偏磁治理装置后相比直接接地，1) 对线路零序保护的影响：在接入阻值较小时对线路零序保护的影响不大，仅限于灵敏度变化。推测电阻较大情况下，如不改变零序 I、II 段原有整定值，接入侧正方向保护灵敏度降低，保护范围缩短，非接入侧正方向保护灵敏度升高，区外不对称故

障且无方向元件时有可能产生误动。因此应该调整灵敏度校验不合格处的零序 I、

II 段整定值，接入侧正方向整定值减小，非接入侧增大。此外线路零序方向元件的判定基本不受影响。2) 对变压器中性点零序保护的影响：在接入阻值较小时对变压器零序保护的影响不大。中性点零序 I、II 段不需要灵敏度校验，但中性点零序 I

段需要按照它下一级线路零序 I 段的调整策略进行相同调整。

关键词：电阻型偏磁治理装置；零序电量；零序等效电路；线路零序保护；变压器

中性点零序保护

II

Abstract

DC transmission system operating in a transformer monopole-to-earth mode injects DC current into ground, and then a bias current in the nearby grounded AC network generates, which causes transformer excitation current distortion and affects the normal operation of transformer. In order to suppress DC bias, a common method is to connect a DC magnetic bias treatment device (MBTD) at the transformer neutral point to limit DC current, but this will change the grid zero-sequence impedance. Whether it will affect the zero-sequence relay protection needs to be studied. This thesis mainly studies the impact of the resistance-type MBTD, the main research work and achievements are as follows.

(1) This thesis firstly summarizes the types and working principles of common zero-sequence protection in AC system, analyzes the basic principles of DC magnetic bias suppression, introduces the structure of three types of MBTD. Their advantages and disadvantages from different aspects such as working principle, economics, reliability, and difficulty of realization are compared. The most suitable resistance-type MBTD is selected for subsequent analysis.

(2) The zero-sequence equivalent circuits of transformer under various winding connection modes and neutral point grounding modes are analyzed, and the mathematical model of two-terminal-grounding network is established. Calculate the zero-sequence electric quantities related to zero-sequence protection such as zero-sequence current, zero-sequence voltage, transformer neutral point current, impedance angle of direction element between the Access side and non-access side, before and after accessing the MBTD. It further analyzes the influence on the zero-sequence current protection of line and transformer neutral point, and the zero-sequence direction element.

(3) A simulation model of the two-terminal network is built in MATLAB / Simulink.

According to the actual engineering parameters, select the appropriate resistance value. By controlling the neutral point of the transformer to access the resistance whose value changes within a certain range, the value of the zero-sequence electric quantities is measured and the setting value of the unsuitable line and transformer zero-sequence section I, II sections after being connected into the device are calculated. After the resistance-type MBTD access either terminal of two-terminal system, this research results show that: 1) When the access resistance value is small, it has little effect on the line zero-sequence protection, which is limited to the sensitivity change. Presumably when the resistance is high, the impact on the line zero-sequence protection: if the original setting values of the zero-sequence I, II sections are not changed, the protection sensitivity in the positive direction of the access side will be reduced, and the III protection range will be shortened; the protection sensitivity of the non-access side will be increased, and misoperation might arise when asymmetric faults outside the zone happens and there are no directional components. Therefore, the setting values of the zero-sequence I and II sections where the sensitivity check fails should be adjusted, the positive setting value of the access side should be reduced, and the non-access side of which should be increased. Therefore, the setting values of the zero sequence I and II sections where the sensitivity check fails should be adjusted, the positive setting value of the access side should be reduced, and the non-access side should be increased. In addition, the determination of line zero-sequence direction components is basically not affected. 2) The impact on transformer neutral point zero-sequence protection: When the access resistance value is small, it has little effect on the transformer neutral point zero-sequence protection. neutral point zero-sequence I and II sections do not need sensitivity verification, while I section of which needs to follow the adjustment strategy of its next level line zero-sequence I section to make the same adjustments.

Keywords: resistance-type magnetic bias treatment device; zero-sequence electric quantities; zero-sequence equivalent circuit; line zero-sequence protection; transformer neutral point zero-sequence protection

IV
目录
摘要

..... I	
Abstract	
..... II	
第 1 章绪论	
... 1	
1.1 选题背景与意义	
..... 1	
1.2 偏磁以及其抑制方法研究现状	3
1.2.1 直流偏磁现象与建模	3
1.2.2 直流偏磁抑制的措施	4
1.2.3 偏磁治理装置对零序保护的影响	6
1.2.4 研究现状总结	
..... 8	
1.3 本文的主要研究内容	
..... 8	
第 2 章零序保护和直流偏磁治理方法	
10	
2.1 零序保护的类型和基本原理	10
2.1.1 线路零序保护	
10	
2.1.2 变压器零序保护	
13	
2.2 偏磁抑制的原理和偏磁治理装置	14
2.2.1 偏磁抑制基本原理	14
2.2.2 几种偏磁治理装置	15
2.2.3 偏磁治理装置对比	20

2.3	偏磁治理装置对零序保护影响定性分析	21
2.3.1	对线路零序保护的影响	21
2.3.2	对变压器中性点零序保护的影响	21
2.4	本章小结	22
第 3 章	输电线路和变压器零序保护模型	23
3.1	输电线路的零序保护模型	23
3.2	变压器的零序保护模型	23
3.2.1	普通变压器	24
3.2.2	自耦变压器	26
3.3	电阻型偏磁治理装置对零序保护的影响分析	28
3.3.1	零序电量分析	28
3.3.2	线路零序保护的影响分析	34
3.3.3	变压器中性点零序保护的影响分析	V
3.3.4	复杂系统零序保护的影响分析	37
3.4	本章小结	40
第 4 章	电阻型偏磁治理装置对零序保护的影响计算	41
4.1	治理装置参数选取原则	41
4.1.1	电阻的选取原则	41
4.1.2	旁路系统设计	41
4.1.3	总体标准	42
4.2	治理装置对零序保护的影响计算	43
4.2.1	两端系统零序电量仿真计算	43
4.2.2	对线路零序保护影响计算	48
4.2.3	对变压器中性点零序保护影响计算	52
4.3	仿真分析结论	52
4.3.1	对线路零序电量和零序保护的影响	52
4.3.2	对变压器中性点零序电量和零序保护的影响	53
4.4	本章小结	53
第 5 章	总结及展望	55
5.1	总结	55
5.2	展望	56
	参考文献	57
	致谢	61
	作者简介	1
第 1 章	绪论	
1.1	选题背景与意义	

自从工业革命发展百年以来，主要以煤、石油和天然气等不可再生的化石资源为主能源的开发利用速

度骤然增长，能源利用方式低效、环境污染加剧的弊端日益显现。高速发展的现代经济社会运行模式给环境安全和资源储量带来了巨大的压力，在人类社会无止境的需求、化石能源总量和环境承载力的三者矛盾日益凸显情况下，在可持续发展思想、环境保护理念的不断倡导下，目前 21 世纪的主要发展方向即是不断促进能源结构的转型[1]，逐渐降低不可再生的能源占有所有能源的比重，

逐步加大加快可再生能源的开发与利用，促进各类能源资源的高效、多重利用。

在目前众多可再生能源的利用方式中，发电是可再生能源的最主要也是最有效率的利用途径之一，而光伏和风电是常见的两种新能源发电形式。根据国家能源局的有关数据统计，我国 2018 年能源消费总量为 46.4 亿，其中非化石能源占比为 14.3%，总发电量约为 6.994 万亿 kWh。图 1-1 是我国 2018 年发电量的组成饼状图。

图 1-1 我国 2018 发电量组成饼状图由于光伏、风能等新能源自身具有的布局分散、规模小型、远离负荷中心、发电量不稳定、受自然环境的影响大等特点，使得采用交流输电技术或传统的电流源换流器型直流输电技术来长距离大容量输送电能，变得一方面相当不具有经济优势，

另一方面又在技术实现上存在不可避免的困难[3]。高压直流输电技术(HVDC)和特高 2

压直流输电(UHVDC)逐渐成为解决上述问题的关键技术。随着我国两大自西向东、南北贯通的多条交直流互联超高压/特高压走廊的建设，电网规模逐渐扩大，输电能力不断增强，能源利用日渐提高。长距离、超高压的输电方式在推进了资源的高效利用的同时，也带来了新的问题。

直流偏磁现象在新问题中尤为突出。直流偏磁是变压器的非正常工作状态[4]，

指的是在变压器励磁电流中出现了非常规的直流分量，引起变压器铁芯磁通趋近或达到饱和，导致励磁电流波形产生畸变，致使系统电网被大量谐波注入，对交流电网和变压器本身的正常运行造成危害的现象。

直流偏磁的诱因主要有以下两种，其一是当直流输电系统采用单极大地回路运行方式或双极不平衡运行方式时地中直流在不同站点产生电位差，变压器中性点产生直流电势，入地电流在地表形成感应电场，产生直流电流流入交流电网引起直流偏磁(HVDC 型直流偏磁)[5]，其二是太阳磁暴在输电线、中性点接地的变压器和大地构成的一个闭合的回路中产生地磁感应电流从而诱发的直流偏磁(GIC 型直流偏磁)[6-7]。当电网系统中出现直流偏磁时，变压器铁芯磁通受影响接近或达到饱和，

励磁电流由此畸变，导致产生大量谐波，致使铁芯无功损耗增大，导致产生变压器元件过热和异响现象甚至损坏绝缘，降低变压器及其他元件使用寿命，甚至影响电网安全稳定运行。直流偏磁也会影响电容器组、电流互感器(CT)等设备正常运行[18]。

除此之外，变压器铁芯饱和导致的大量谐波注入电网当中，对继电保护装置及其他电力系统安全自动控制装置造成了不同程度的影响，严重时甚至会导致继电保护装置误动拒动，给电网安全稳定运行带来了巨大威胁。

为了解决直流偏磁对系统造成的不良影响，可以采取一些偏磁抑制措施来针对偏磁电流进行抑制，一般常用的措施是对变电站中性点进行改造，安装一些偏磁治理装置，但也因此改变了系统的零序阻抗，造成某些情况下零序保护误动，因此需要根据实际产生的问题具体分析。

随着电网技术的发展，应用节能导线和大截面导线是目前大电网建设中的一个趋势[8]。但由于输电线路的导线直流电阻不断变小，地磁暴的地磁感应电流(GIC)

造成的变压器直流偏磁的危害也逐渐增大和增多，甚至于一些中小等级的地磁暴的GIC也侵害到了500kV和1000kV电网，造成站内多台变压器产生次生无功扰动[10]，

影响正常运行。而由于地磁暴产生导致的GIC侵害加拿大魁北克电网次生的谐波、

无功波动诱发过魁北克电网和瑞典马尔默电网大停电事件也是国内外热烈讨论的典型事件[13-17]。

目前实际电网中已经安装了众多偏磁治理装置，但目前有关偏磁治理装置对系统的研究比较匮乏。本课题根据偏磁下采取的不同抑制措施，详细对比各类偏磁治理装置的优缺点，重点分析电阻型偏磁治理装置对各类零序保护产生的影响，所得 3 结论可以为相关工程偏磁治理装置的合理设置以及零序保护整定值的重新计算提供借鉴。

1.2 偏磁以及其抑制方法研究现状

1.2.1 直流偏磁现象与建模

(1) 直流偏磁现象随着直流工程的不断建立，交直流混联系统内的直流偏磁现象越来越多，偏磁问题[20-2323]逐渐引起的人们重视。其最早研究起源于 20 世纪 80 年代[24-25]。

HVDC 型偏磁产生问题较为常见。如 2002 年 12 月三峡至常州±500kV 直流输电工程开始调试、运行以来，武南站两组 500kV 主变压器运行多次出现噪声变大等异常现象[20]。2007 年葛洲坝—上海直流工程投产运行后当采用单极-大地方式运行时，宜昌电网郭家岗变电站和长阳变电站变压器均监测到噪声增大、振动加剧等比较严重的直流偏磁现象[21]。此外，广东电网自天广、兴安、新东等多个直流输电工程投产后多个站点也出现过由于直流输电单极大地回路方式运行时引起的变压器中性点直流电流异常，影响正常运行的情况[22]。

磁暴引起的 GIC 型偏磁一般发生在某些特定的年份，最为著名的是 1989 加拿大魁北克电网大停电事故，在巴西和瑞典电网中也监测到过较大 GIC[26-27]。自 2001

年以来，广东岭澳核电站、浙江双龙变电站等国内多个变电站都发生过磁暴 GIC 引发生变压器偏磁电流饱和情况，阳淮 500kV 输电线路的武南、上河等变电站持续出现的站内变压器噪声异常现象也在后续的国内外专家研究中证实为地磁感应电流所致[20]。我国广东、浙江等省份在 2012 年后的全球范围磁暴时也发生了由 GIC 引起的异常事件。一般太阳活动高峰期都伴随着剧烈磁暴，据有关数据统计，极端情况下每相直流电流可达 80-100A[23]，造成变压器大幅温升、震动和噪声。

虽然两种偏磁产生方式不同，但均导致了变压器中出现直流，中位点电压抬升，

目前许多文献对两者并不作以区分。由于 HVDC 偏磁发生次数高于 GIC 偏磁，大多数研究都是基于前者的。但是深入研究 GIC 偏磁的影响，预防磁暴对系统的不良影响，有必要对两者加以区分。

两种偏磁电流的形成机理和表面特征有着明显的差异特点。HVDC 偏磁电流产生的主要原因是由变电站附近土壤中恒定直流电流场的电位差所导致，仅会对直流接地极附近的电力系统产生一定的影响，不会有扩大影响的趋势。即使是单极大地方式运行，但是其运行方式保持不变时，其偏磁电流的幅值范围也保持在几安培到十几安培的水平之间，对系统的影响程度较轻、影响范围也有限。

但是磁暴对于系统电网的影响，却是具有全局性特点的。在国内外长期对 GIC 的实际监测数据分析中，可以得知 GIC 具有高幅值、长周期、时变性、波动性、随机性、含有大量谐波等特点。GIC 属于低频交流，其频率在 0.001-0.1Hz 之间波动，

但幅值通常可以达到几十安培。由于 GIC 的波动性，可能使继电保护的测量阻抗发生周期性波动，继而使灵敏度最低的距离保护 III 段发生误动[28]。

(2) 直流偏磁建模衡量偏磁对系统影响的关键是对含直流的交流系统进行建模，计算产生偏磁后直流电流的分布。其计算方法主要为两种：“分步法”和“统一法”。

分步法是指首先进行地表电位分布的相关计算，根据计算所得的接地变压器中性点电位，考虑计及系统的电网拓扑结构，再计算网络中各站的变压器中性点的直流电流幅值。

统一法则是指采取场路耦合方法，建立地上地下整体的计算模型[29]，然后依据模型进行后续的直流偏磁分析。文献[30]采取场路耦合方法，考虑哈密地区系统电网拓扑结构，建立可用适当的直流电流分布模型，通过仿真计算和现场实际测量对模型的准确性进行反复相互验证，并分析了当前运行方式下，直流偏磁对系统中部分变压器的影响风险。

对于分步法，文献[31]、[32]采用了负镜像法推导了复合分层土壤中的电位分布。

对于统一法，文献[33]将土壤的地下部分视为一个有内阻的直流电压源，然后同时对地上地下的部分求解。综合来讲由于各地的土壤电阻率不同，无法分析大区域间的土壤电阻，所以一旦所考察的系统范围较大，不同变电站间的地下影响难以分析，

更精确的模型还有待研究。

目前 GIC 的计算方法的计算流程主要分为两个步骤：对地磁的三维物理建模和对网络方程的构建。文献[34]研究了在不同运行条件下，GIC 在 Yg-Y 接线与 Yg-

△接线变压器中 GIC 流通路径的方式和特点。结果表明，在变压器三相绕组运行情况不对称饱和时，GIC 在变压器三相绕组中的分布并非均匀。同时由于 GIC 的低频交流变化特征，在变压器的 Y(△)侧也可能因为 GIC 低频交流量的传变，导致引起更复杂的影响。文献[35]提出了基于全节点模型的 GIC 计算方法，详细阐述 GIC 的计算模型，并通过了 GIC 标准算例模型的检验。文献[36]提出基于三维磁流体力学

(magnetohydrodynamics, MHD) 和行星际太阳风信息的模型评估电离层电流体系的算法，电离层电流计算地磁扰动(geomagnetic disturbance, GMD)以及 GMD 计算电网 GIC 的算法，以对电网 GIC 提供风险预测。

1.2.2 直流偏磁抑制的措施由于变压器的温升、饱和、噪声等运行异常现象均由直流电流引起，那么直流偏磁抑制的主要对象即是变压器中的直流电流。《高压直流接地极技术导则》中明 5

明确规定了不同变压器每相允许的直流电流的幅值大小，单相变压器为额定电流的

0.3%，三相五柱变压器为额定电流的 0.5%，三相三柱变压器为额定电流的 0.7%[37]。

在抑制变压器中性点直流电流方面，常规思路是限制直流线路的单极或不对称运行方式，从根源上减小小接地极附近站点变压器直流偏磁异常现象的可能。但是实际运行中，某些时候采用这两种方式运行不可避免，更为有效、经济、适用的方法是在变压器中性点安装偏磁治理装置。目前国内外讨论的方法主要有以下几种思路。

(1) 反向电流法此方法是利用反向的直流电流来抵消或削弱变压器中直流偏磁电流的不利影响。江苏电科院在早些年根据此种理论方法，研制开发了反向直流装置并投入运行，

进行实际监测和治理偏磁电流。

具体做法是，在变电站中性线上串入或并入反向直流电流源，对中性点的直流进行检测和补偿，这种方法需要检测设备有较高的灵敏度，能够快速跟踪直流电流的变化，还需要电流源有足够的灵活性，能够实现较大范围的直流电流输出调节。

但总体实现较为困难，成本较高。

(2) 反向电动势法直流线路单极大地或不平衡运行时，对各个变电站产生的直流电位进行补偿，

即在中性点与地之间串入反向电动势。这种方法需要可靠的直流电源，其电源控制的目标是降低中性点直流电流，实现难度低于反向电流法。

(3) 串联电容法此种方法为将一个合适容抗值的电容，串接在变压器的中性点中，隔离系统与大地之间的直流电流，达到监测和治理的目的。同时，配置火花间隙、并联开关等各类装置起到辅助作用，来确保此串联电容的偏磁治理系统可靠性。

文献[38]建立了两个电压等级电网 GIC 的模型，并利用基于节点导纳矩阵法的算法，计算了新疆 750kV 和哈密 220kV 电网的线路和变压器在采用电容型治理偏磁装置治理前后的 GIC 水平。最终得出结论，大规模采用电容型偏磁治理装置会改变电网的 GIC 分布，使某些未治理或者无需治理的变压器 GIC 水平增大。

文献[39]研究中提出在考虑保证系统内所有变压器的有效偏磁电流小于允许限值的条件下，以电网中所需要安装隔直装置的数量最少作为优化目标，提出利用基于改进轮盘赌选择法的遗传算法，优化计算串联在中性点中的电容型偏磁治理装置的容抗值。并以实际算例证明了所提方法的有效性。

文献[40]以保证电网电压水平、发电机组无功功率水平等指标不越限为约束条

件，从另一角度考虑，提出了一种在变压器中性点串接电容型偏磁治理装置来抑制 GIC 对变压器影响的优化方法，并且对电容型偏磁治理装置的元件参数以及装设地 6

点的选取都进行优化配置。

但是，在其他研究中，也发现串联电容的方法进行偏磁治理后，会造成电网偏磁电流增大和大范围转移的问题。例如：2014 年溪浙直流工程投运后，大量使用电容型偏磁治理装置在 500kV 和 220kV 变压站点装设进行偏磁电流治理后，附近未装设和无需治理的站点变压器的偏磁电流水平却升高，其影响甚至扩大到 110kV 电网中去，实际上扩大了偏磁电流影响的范围[28]。

(4) 串联电阻法串联电阻法就是把电阻串接在中性线与大地之间，相当于增大了地上的总支路电阻，抑制了直流电流的增长[28]。文献[46]证明了这种措施的有效性。文献[47]以变压器中性点的 GIC 量值、串接电阻阻值、治理投资的经济性适用性等目标函数为约束条件和优化目标，提出了基于非支配排序遗传算法的串接电阻的电阻型偏磁治理电网 GIC 的优化算法。

指 标	
疑似剽窃文字表述	
1.	偏磁电流，造成变压器激磁电流畸变，影响变压器甚至电网系统安全稳定运行。为抑制直流偏磁，常用的手段是在变压器
2.	方式中，发电是可再生能源的最主要也是最有效率的利用途径之一，而光伏和风电是常见的两种新能源发电形式。根据国家能源局的有关数据统计，
3.	磁通受影响接近或达到饱和，励磁电流由此畸变，导致产生大量谐波，致使铁芯无功损耗增大，导致产生变压器元件过热和异响现象甚至损坏绝缘，降低变压器
4.	偏磁电流的形成机理和表面特征有着明显的差异特点。HVDC 偏磁电流产生的主要原因是由变电站附近土壤中恒定直流电流场的电位差所导致，仅会对直流接地极附近的电力系统产生一定的影响，
5.	具有高幅值、长周期、时变性、波动性、随机性、含有大量谐波等特点。GIC 属于低频交流，其频率在 0.001-0.1Hz 之间波动，但幅值通常可以达到几十安培。

2. 013_第2部分

总字数：10320

相似文献列表		
去除本人文献复制比：8.8%(911) 文字复制比：8.8%(911) 疑似剽窃观点：(0)		
1	变压器直流偏磁抑制装置及其对继电保护影响的分析 胡志广;王峰;蔡泽祥; - 《广东电力》- 2007-10-25	5.7% (589) 是否引证：否
2	电气学院_电气工程_王倩 王倩 - 《学术论文联合比对库》- 2014-11-17	4.6% (470) 是否引证：否
3	直流偏磁抑制装置接入对线路距离保护的影响及研究 朱先启(导师：郑涛) - 《华北电力大学硕士论文》- 2013-03-01	3.4% (347) 是否引证：是
4	电阻性直流偏磁抑制装置对交流系统继电保护的影响分析 王峰; - 《黑龙江科技信息》- 2009-12-05	2.8% (286) 是否引证：否
5	王倩_抑制变压器直流偏磁的研究与应用 王倩 - 《学术论文联合比对库》- 2015-06-15	2.7% (274) 是否引证：否
6	292 - 《学术论文联合比对库》- 2013-01-04	2.3% (237) 是否引证：否
7	抑制变压器直流偏磁的方法及研究 陈宁 - 《学术论文联合比对库》- 2013-01-08	1.9% (199) 是否引证：否
8	适应直流偏磁抑制装置接入的零序电抗继电器动作特性分析 郑涛;朱先启;徐振栋;刘连光; - 《电网技术》- 2013-10-05	1.3% (139) 是否引证：否
9	036 - 《学术论文联合比对库》- 2019-12-02	0.6% (65) 是否引证：否
10	继电保护 - 《学术论文联合比对库》- 2018-07-09	0.3% (33) 是否引证：否
11	变压器中性点串接电阻抑制偏磁及其引起的工频过电压分析 徐志;李胜男;于辉; - 《2012年云南电力技术论坛论文集》- 2012-09-25	0.3% (32) 是否引证：否
12	浅析发电厂的变压器保护 燕翔琿; - 《科技创新与应用》- 2016-01-28	0.3% (31) 是否引证：否

原文内容

并针对甘肃省狭长的输电网络进行了 GIC 治理计算，效果较好，提高全系统抵御被强地磁暴侵害的能力。而对比串联电容法，对电网的偏置电流增大和大范围转移的情况相对少和影响小。

(5) 其他方法文献[48]针对宜昌地区 RelayCAC 模型采用变电站双直接接地的方法，即通过同一变电站内采用两台变压器同时接地运行的方式，实现了站内任一变压器中性点直流电流水平均能降低至限值以下。但是这种方法不但改变了系统的零序阻抗参数，并且在一般正常运行规程中不允许同一站内同时两台变压器中性点接地长期运行。但是文章并没有继续分析对继电保护的影响，因此所提方法通用性值得商榷，

本文不再讨论。

在国外研究文献中，R.Pirjola 教授对芬兰 400kV 电网变压器中性点安装电容治理装置的方法的可行性进行了研究。其指出，GIC 在不同的电网系统甚至变电站中差异甚远，GIC 存在从接入装置的站点向未接入装置站点转移的情况[18]。而

教授的相关文献研究表明,变压器中性点串电容器在减少部分 GIC 的同时,会导致电网边缘处 GIC 增加,促使电网中更多的变压器接近饱和状态[19]。国外文献也就此提出了不在变压器中性点就行偏磁治理,而在线路上进行治理的方式并且做了相关的大量研究。

1.2.3 偏磁治理装置对零序保护的影响串联电容和串联电阻法由于实现难度低,无须复杂的控制系统,投资小,效果好,因此已经得到实际应用。但是随着这两种方法的使用,系统的零序阻抗发生变

化,继而对继电保护产生了影响。文献[52]指出,采用装设偏磁治理装置治理偏磁电流水平后, 变压器高压侧后备保护中的中性点零序方向过流保护、线路的接地距离保护以及零序电流方向保护可能受到影响。

文献[49]通过对哈密地区某条线路的零序阻抗进行仿真分析,发现了直流偏磁下,CT 测得的电流值幅值及初相角均会产生一些变化,零序阻抗明显增大。

因此在采用这些抑制措施时,应该仔细分析各个措施带来的影响,以免为系统的安全运行带来隐患。但 目前国内外研究均侧重于直流偏磁治理装置接入后对保护造成的不利影响,却并未根据结论提出合理有效的处理方案[50]。

(1) 中性点串电容中性点加入电容对直流抑制是明显的,目前广东电网已有几十台运行主变加装了电容型偏磁治理装置。由于主变中性点接入了隔直电容,改变了系统的零序参数,

那么在发生不对称接地故障时,相关的主变保护以及线路保护就可能存在误动或者拒动的风险,需要有针对性的研究。

文献[51]以单个变电站为对象,研究了加装电容型偏磁治理装置以后,系统内各元件的电量所受影响。文献[52]提出了加装电容型偏磁治理装置 可能导致一处偏磁电流被有效隔断,但是其周边变电站的变压器偏磁电流却显著升高现象,站内或者系统内出现明显偏磁电流转移的现象。文献[53]分析了加装电容以后各站点间的零序电量之间的相关性和各保护装置的自适应性。得到的结论是,安装电容对本站的影响高于其他站点,本站零序电流增大;对于线路保护安装处零序电流及电压保护影响很小,对加装站点变压器中性点处电流影响相对较大;多个站点间电容引起的效应近似为叠加关系;当大规模安装零序电容时,介于该叠加效应,可以不考虑零序保护的重新整定。

以上结论说明在中性点安装电容型偏磁治理装置,只要保证其不超过一定限

值,就基本不会对零序保护产生影响。

(2) 中性点串电阻中性点串电阻直接改变网络的零序阻抗。文献[52]、[54]以两端系统一侧变压器中性点通过电阻接地为例,计算了零序阻抗和分支系数等参数,指出串联电阻后如果发生不对称故障(单相接地或两相相间)主要产生的影响是:

① 对零序过流保护的影响:主变中性点的接入导致接地短路故障时接入侧保护零序电流减小,零序过流保护灵敏系数减小;非接入侧保护零序电流增大,零序过流保护灵敏系数增大;接地侧主变中性点电流减小,中性点零序过流保护灵敏系数减小。

② 对零序方向保护和零序电压元件的影响:零序方向保护要求零序电压达到一定阈值(一般取一次侧 2~3V)时才开放。在长距离输电线的末端发生接地短路故障时,线路首端保护的零序功率方向元件可能会出现灵敏度不足不开放的情况。在线路上发生单相接地故障时可能造成接地侧、两相接地短路故障时造成非接入侧零序方向过流保护电压元件灵敏度不足而不开放。

③ 对零序方向元件判别的影响:改变保护反方向零序阻抗测量相角,如果该相角在 $\pm 90^\circ$ 度以内,则方向判定不受影响。

④ 对距离保护测量阻抗的影响:由于过渡电阻的存在,接地侧测量阻抗幅值和相角均增大,因此出现因加装偏磁治理装置导致的附加测量阻抗。在一定情况下会使距离保护的保护区缩短,造成保护拒动。

因此当中性点串电阻时,对涉及到零序的保护基本都有影响,应该重新对各个保护的整定值进行调整或对保护方案重新设计。

文献[55]仔细 分析了电阻型偏磁治理装置接入偏磁治理电阻后对线路距离保护产生的影响,针对由此 引发的保护拒动或误动问题,提出一种可行的保护方案。将相间阻抗继电器与零序电抗继电器相结合,相间故障采用相间阻抗继电器,接地故障采用零序电抗继电器。在其仿真分析中表明,此方案能够实现对变压器和线路在接入电阻型偏磁治理装置后,遇到不对称故障时具有有效的保护。

1.2.4 研究现状总结针对以上几个方面的调研,提出以下几点不足之处:

(1) 针对 GIC 与 HVDC 偏磁的区分目前研究尚不充分,大多数针对 HVDC 偏磁展开。为了预防未来磁暴带来的影响,需要仔细研究 GIC 的作用机理,以及受 GIC 影响后系统各个部分电量的关联性。

(2) 目前针对中性点串联电容的抑制偏磁手段,仅有仿真结果证明对零序保护影响很小,缺乏更细致的理论推导。

(3) 对于中性点串联电阻时对保护的影响,目前全部的研究都基于交流两端系统,未考虑更复杂拓扑下交流线路或者是变电站间的关联,更未考虑直流线路,模型分析有待拓展。

(4) 未来可能有其他更好的、对保护影响更小的偏磁抑制措施待开发。

1.3 本文的主要研究内容本文主要研究输电系统中变电站采取电阻型偏磁抑制措施后在中性点加装不同阻值的电阻对零序保护产生的影响,并根据理论与仿真结果对实际工程提供一定的指导,主要的研究内容有:

(1) 研究采用电阻型偏磁治理装置后网络零序电量的计算方法。通过拓扑化简,分析系统发生不对称接地故障时,分支系数、零序电流、零序电压、测量零序阻抗 9 角等与各种零序保护相关电量的相对于不加电阻时的变化趋势。利用仿真结果说明理论推导结论的正确性。

(2) 研究零序保护整定值在电阻型偏磁治理装置接入后的重新调整的方法。

研究电阻参数改变对相关电量的影响,验证接入电阻后各种零序保护的整定值灵敏度是否满足要求。推测复杂系统各点受影响程度的关联性,对零序保护受影响的整定值进行重新计算。并参考 工程实际,选择合适的电阻阻值,进行算例分析验证理论分析结果。

围绕以上两个研究点,本文各章节内容安排如下:

第1章从HVDC输送新能源渗透率不断提升的背景引出直流偏磁问题亟待关注

的现状，然后调研了偏磁现象、偏磁抑制措施以及偏磁治理装置对零序保护影响的国内外研究现状，指出了本文研究的重要意义。

第 2 章主要进行零序保护的总结以及偏磁抑制措施的机理性分析。详细总结目

前采用的零序保护类型和工作原理，分析了三种偏磁抑制的措施：中性点反注入电流法、中性点串电阻法和中性点串电容法的实施原理以及优缺点，定性分析电阻型偏磁治理装置接入后对零序保护的影响。

第 3 章对接地交流系统内的线路、变压器在零序电路中的等效电路进行分析建

模，推导了自耦变压器串入电阻后的等效电路。然后以两端系统为例，详细分析对比了接入前后的零序电量变化情况，并分析了线路零序电流保护、零序方向元件、

变压器中性点零序电压保护的受影响的情况，最后推广到拥有多端辐射线路和环网复杂系统，对一些能够明显判别变化趋势的电量进行了简单分析。

第 4 章首先结合国标对电阻型偏磁治理装置各组成部分的工程参数进行分析，

提出了电阻的阻抗范围。然后在 MATLAB/Simulink 中建立了两端系统，通过故障仿真验证了第 3 章分析的正确性，对一些需要重新整定的零序保护整定值进行了重新计算。

第 5 章对全文内容、结论进行总结，分析总结研究的不足之处，并对未来下一步的研究方向进行思考和展望。 10

第 2 章零序保护和直流偏磁治理方法

为了进行严密的理论分析，必须对系统中常用零序保护类型和偏磁治理装置进行详细总结，明确研究对象包含的范围。在已经投入的各种偏磁治理装置中，判定是否对零序保护产生影响，取决于两点。一是看接入后系统的零序网络拓扑是否发生改变。如果拓扑发生变化，将直接改变系统的零序阻抗，从而改变零序网络中零序电流和零序电压的分布；二是看相应零序保护所采用的基本原理，即它的判定方程跟何种零序电量有关，是零序电压、零序电流还是零序阻抗，如果两者相匹配，

那么偏磁治理装置接入后就会对采用特定零序电量作为判据的零序保护产生影响。

2.1 零序保护的类型和基本原理目前所采用的零序保护主要以电流保护为主，针对零序电压和零序阻抗的零序保护并不多见，按照被保护的物体，主要分为线路零序保护和变压器零序保护。

2.1.1 线路零序保护电压等级在 110kV 及以上的交流系统常采用中性点直接接地的运行方式，这是因为由于电压等级较高，短路电流很大，采用中性点直接接地后，故障电流可以快速向大地释放。中性点接地的运行方式为零序电流的流通创造了通路，对于不对称短路，零序电压、零序电流等零序电量相对于三相对称短路或者是正常运行，变化特征是明显的。此外，在大电流接地系统中，发生单相接地短路的概率是最高的，

约为 85%，这也是采用零序电流保护具有的显著优势。因此零序电流保护已经被广泛应用于 110kV 及以上的中性点直接接地系统中。

(1) 保护中零序电量的正方向图 2-1 给出了 MN 两端系统及其零序等效网络的示意图，系统中包含两电源、两 Y0/d-11 变压器和两条线路 MO 和 ON，O 为 MN 中点，MN、MO 长度分别为 1

和 1/2。设故障位置用 $\lambda \in [0, 1]$ 表征，故障发生在 MO 段等效于 λ 在 $[0, 0.5]$ 内取值，

发生在 ON 段等效于 λ 在 $[0.5, 1]$ 内取值。线路零序保护安装处即为 1~4 所在断路器处(后文简称“1~4 处”)，零序电流正方向为母线指向线路，零序电压正方向为母线指向大地(电位 0)，均已在图中标出。

根据分流关系，此系统中短路一侧的所有线路零序保护安装的零序电流的幅值是相等的，如不对称故障发生在 ON 上时满足

$$I_k(0) = I_{3k}(0) = I_{Mk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$$I_k(0) = I_{Nk}(0)$$

$1k(0)$
 U
 $@\beta/$
 $2k(0)$
 U
 \dot{U}
 $3k(0)$
 U
 \dot{U}
 $1k(0)$
 I
 $2k(0)$
 I
 $3k(0)$
 I
 Mn
 $U \in . *$
 Mn
 I
 $P \hat{O} N TN6$
 $4k(0)$
 I
 $4k(0)$
 U
 \dot{U}
 ZT
 $N(0)$
 Nn
 U
 $pr\dot{A}$
 Nn
 I
 $P \hat{O} 6M TM O NM$
 $Mk(0)$
 I
 $@\beta/$
 $Nk(0)$
 $I 8 4$

图 2-1 两端系统及其零序等效电路规定了零序电压和零序电流的正方向后，注意到保护处通过 PT/CT 测量得到的测量值为零序电流的 3 倍，即 $k(0)$

$3I$ 和 $k(0)$
 $3U$
 $\dot{a}\sim e$

。后续的分析计算以该实际测量值为准。

(2) 四段式线路零序保护

线路零序电流保护属于增量式保护，其 I~III 段保护的配置方法与常规电流保护 I~III 段相似。图 2-1 中线路 MO 和 ON 为相邻线路，保护 1 是保护 3 的上一级保护。

保护 4 是保护 2 的上一级保护，以 1~4 处保护为例分别给出整定值和灵敏度校验的原则和公式，如表 2-1 所示。由于零序 I、II 段常常不满足灵敏度要求，目前四段式线路零序电流保护是工程上的常用配置。

(3) 零序方向元件在具有两个及以上电源的系统中，零序电流的流动不是单向的，因此必须考虑保护的方向性问题。零序方向元件是区分区外和区内不对称故障的必要元件，实现正方向接地时开放零序电流保护，反方向接地则闭锁零序电流保护。

其基本原理是：根据保护处测得的零序电压 $k(0)$

$3U$ 和零序电流 $k(0)$

$3I$ 计算阻抗角，

通过对阻抗角的判定，实现区内区外故障的判定。以 1~4 处的零序方向元件的工作原理进行说明。根据图 2-1，故障发生于 ON 上时，1、3、4 处于正方向而 2 处于反方向，列写 1~4 处方向元件满足的电压方程，并计算阻抗角：

$1k(0)$
 $TM(0)$
 $1k(0)$
 $1k(0) 1k(0) TM(0)$

$2k(0)$
 $TN(0)$
 $2k(0) \quad 2k(0) \quad TN(0) \quad MN(0)$
 $2k(0)$
 $3k(0) \quad 3k(0) \quad TM(0) \quad MN(0)$
 $4k(0) \quad 4k(0) \quad TN(0) \quad 3$
 $\arg(\quad) \quad 180 \quad \arg(\quad) \quad 3 \quad 3 \quad 3$
 $3 \quad 11a$
 $rg(\quad) \quad \arg(3 \quad 3 \quad (\quad) \quad 32 \quad 1 \quad 3 \quad 3 \quad (\quad) \quad 2 \quad 3 \quad 3$
 U
 Z
 I
 $U \quad I \quad Z$
 U
 $ZU \quad I \quad Z \quad ZI$
 $U \quad I \quad Z \quad Z$
 $U \quad I \quad Z = - + = - = + = + = - + = -$

$U \quad I \quad Z = - + = - = + = + = - + = -$
 庌할庌庌타탁MN(0)

$3k(0)$
 $TM(0) \quad MN(0)$
 $3k(0)$
 $4k(0)$
 $TN(0)$
 $4k(0) \quad) \quad 2 \quad 3 \quad 1$
 $\arg(\quad) \quad 180 \quad \arg(\quad) \quad 3 \quad 2 \quad 3$
 $\arg(\quad) \quad 180 \quad \arg(\quad) \quad 3$

Z
 U
 $Z \quad Z$
 I
 U
 Z
 $I \quad = - + + = - + \quad (2-1) \quad 12$

表 2-1 四段式线路零序电流保护原理统计表校验原则整定原则整定值校验原则灵敏度公式零序 I 段躲本线路末端短路的最大零序电流。(1) (1, 1) (1) (1, 1) (1) (1, 1) (1) (1, 1)

$I \quad I$
 $set.1(0) \quad rel \quad Mk(0)1$
 $K, K= 2$
 $I \quad I$
 $set.2(0) \quad rel \quad Nk(0)$
 $K, K=0$
 $I \quad I$
 $set.3(0) \quad rel \quad Mk(0)$
 $K, K=1$
 $I \quad I$
 $set.4(0) \quad rel \quad Nk(0)1$

$K, K= 2$

$3 \quad max$

$3 \quad max$

$3 \quad max$

$3 \quad max$

$I \quad K \quad I$

$I \quad K \quad I$

$I \quad K \quad I$

$I \quad K \quad I \quad = = = =$

最小零序电流对应的保护范围不小于线路长度 15~20%。

I
 $sen.1(0) \quad 1$

$K = 2 \quad 0.15 \sim 0.2$

$\lambda 1$ 由 (1) (1, 1) 1

I
 set.1(0) Mk(0)
 $K, K =$
 $I_3 \min I$
 = 确定。
 I
 sen.2(0) 2
 $K = 2(0.5 -) 0.15 \sim 0.2$
 λ_2 由 (1) (1,1) 2

I
 set.2(0) Nk(0)
 $K, K =$
 $I_3 \min I$
 = 确定。

I
 sen.3(0) 3
 $K = 2(-0.5) 0.15 \sim 0.2$
 λ_3 由 (1) (1,1) 3

I
 set.3(0) Mk(0)
 $K, K =$
 $I_3 \min I$
 = 确定。

I
 sen.4(0) 4
 $K = 2(1 -) 0.15 \sim 0.2$
 λ_4 由 (1) (1,1) 4

I
 set.4(0) Nk(0)
 $K, K =$
 $I_3 \min I$
 = 确定。

零序 II 段与下一级线路零序 I 段相配合，不超过相邻线路 I 段保护末端。

II II I
 set.1(0) rel set.3(0)
 II II I
 set.4(0) rel set.2(0)

I K I
 $I K I = =$

本线路末端接地短路时最小零序电流大于整定值，以保护全长。 (1) (1,1) (1) (1,1)

Mk(0) 1
 $K, K =$
 II 2
 sen.1(0) II
 set.1(0)
 Nk(0) 1
 $K, K =$
 II 2

sen.4(0) II
 set.4(0)
 $3 \min 1.25$
 $3 \min 1.25$

I
 K
 I
 I
 K
 $I = =$

零序 III 段躲下一级线路出口三相短路时出现的最大不平衡电流。

III III (3)

set.1(0) rel M(1) k1 2

III III (3)

set.4(0) rel N(1) k1 2 5% 5%

I K C I

I K C I = = = =

i. 作为近后备，本线路末端接地短路时最小零序电流大于整定值，以保护全长。

ii. 作为远后备，下一

级末端接地短路时本线路流过的最小零序电流大于整定值，以保护下一级全长。

i. (1) (1, 1) (1) (1, 1)

Mk(0)1

K ,K=

III 2

sen.1(0) III

set.1(0)

Nk(0)1

K ,K=

III 2

sen.4(0) III

set.4(0)

3 min 1.5

3 min 1.5

I

K

I

I

K

I = =

ii. (1) (1, 1) (1) (1, 1)

Mk(0)

IIIK ,K=1

sen.1(0) III

set.1(0)

Nk(0)

IIIK ,K=0

sen.4(0) III

set.4(0)

3 min 1.5

3 min 1.5

I

K

I

I

K

I = =

零序 IV 段

i. 取固定值，躲高阻

抗接地；

ii. 躲最大负荷不平衡电流。

i. I

V IV

set.1(0) set.4(0)

I =I =300A

ii.

IV

set.1(0) MLmax

IV

set.4(0) NLmax 5% 5%

I I

I I =

无如果视线路和变压器零序阻抗为纯感性，可以看到，1、3、4 处零序方向元件判定结果都位于 -90° 左右，而 2 处零序方向元件判定结果为 90° 。此时应该对 2 处的零序电流保护进行闭锁。

以此，提出以正方向故障时判定的角度为灵敏角 ϕ_s

en. (0)，以灵敏角为中心的 $\pm 90^\circ$ 为动作方程以防止误动。例如对于 2 处方向元件，其灵敏角和动作方程可以表示为：（）（）（）

TN(0) MN(0)

2k(0)

2k(

sen. 2 0

sen. 2 0 sen) 2 0 . 0 1

180 arg() 2 3

90 arg() 90 3

Z Z

U

I = - + + - +

남 (2-2) 13

注意到式(2-2)成立还有2

k(0)

3U 0 的必要条件。所以零序方向元件还有零序电

压必须过最低阈值的开启条件，这是因为某些极端情况下，例如线路远端高阻抗接地时候，零序方向元件可能会出现因为感受不到零序电压而无法进行阻抗角的判定。因此附加开启条件为：

2k(0) min. (0)

3U U =0.5 ~ 1V (2-3)

(4) 零序电流差动保护利用通讯设备构造的反映线路双端电气量的纵联保护属于现在电网中非常普遍的一种微机保护，其中也有采用利用双侧零序电流构造的反映单相接地的零序电流差动保护。以 ON 线路为例，判定式为：

3k(0) 4k(0) 3k(0) 4k(0)

I +I K I -I (2-4)

式中 K 为制动系数取 0.5~0.8，当不对称故障发生在区内 ON 之间时判定方程变成：

Mk(0) Nk(0) Mk(0) Nk(0) Nk(0) Mk(0)

I +I Kmax{ I -I, I -I}

显然是恒成立的，当故障发生在区外 M0 之间时判定方程变成：

Mk(0) Nk(0)

0 K(I +I)

显然恒不成立，因此这种方法对故障位置的判定灵敏度很高。

2.1.2 变压器零序保护图 2-1 中变压器零序保护安装处即为 5、6 所在变压器处(后文简称“5、6 处”)，

对于所测零序电量，中性点电流正方向为大地指向变压器，中性点电压正方向为大地(电位 0)指向变压器。

(1) 涉及零序的变压器主保护变压器的主保护是针对变压器内部故障的保护，内部故障按照发生位置可以分成油箱内、外两类故障，油箱内故障主要包括绕组间相间短路、接地短路、匝间短路以及铁芯的烧损，油箱外的故障主要是套管和引出线的接地和相间故障。针对各种故障，一般配置为对于过电流电气量的比率制动式差动保护以及对于非电气量的瓦斯保护、油温保护、压力释放保护等保护。

利用零序差动量构建的变压器零序电流差动保护，是一种应对油箱内故障的保

护，变压器正常运行或者外部故障时，对于接地的变压器，满足：

n 0 a b c

I =3I = -(I +I +I) (2-5)

因此利用差动原理可以构成变压器零序电流差动保护的判据方程：

a b c n a b c n

I +I +I +3I K I +I +I -3I (2-6)

(2) 中性点零序电压保护 14

当线路不对称故障发生时变压器中性点出现零序电流和零序电压，因此需要在变电站中性点安装高压侧的后备保护，主要有反映相间短路故障的相间阻抗保护、

复合电压启动的过电流保护、负序电流保护等；反映接地故障的变压器中性点直接接地时的零序电流保护和中性点不接地时的零序电压保护、中性点间隙零序电流保护；反映容量在 0.4MVA 及以上变压器的对称过负荷保护。

中性点零序电压保护，一般用于不接地系统(一般为低压侧)的接地保护，设定

电压阈值 U_m

ax. (0)=1.8U

N，对于 y 或 d 形接法的绕组，其中性点电压动作方程分别为：（）（）

0 max. ON

0 max. ON 1.8

3 , 8d1

， y .
U U U
U U U = = (2-7)

满足条件即延时跳母联断路器、跳变高断路器和变低断路器，分离本变压器。

(3) 中性点零序电流保护变压器接地中性点零序电流保护作为下级线路的后备保护一般配置为两段式的，配置方法同零序电流保护，只不过不需要灵敏度校验。例如在图 2-1 中保护 5、

6 的零序电流 I、II 段的整定原则和公式分别为：

① 中性点零序 I 段与相邻线路的零序 I 段配合，如保护 5 与保护 1 的零序 I 段配合，如保护 6 与保护 4 的零序 I 段配合，表示为： (1) (1, 1) (1) (1, 1)

I I I I I
set.TM(0) rel .T set.1(0) rel.T rel.l Mk(0)
K ,K=0.5
I I I I I
set.TN(0) rel.T set.1(0) rel.T rel.l Nk(0)
K ,K=0.5
3 max
3 max
I K I K K I
I K I K K I = = = = (2-8)

式中 KI r
el.T
、 KI r
el.l
为变压器和它下一级线路对应的 I 段可靠系数。

② 中性点零序 II 段与相邻线路的后备保护如零序 III 段配合，表示为：

II II III II III (3)
set.TM(0) rel.T set.1(0) rel.T rel.l M(1) k0.5
II II III II III (3)
set.TN(0) rel.T set.1(0) rel.T rel.l N(1) k0.5 5% 5%
I K I K K C I
I K I K K C I = = = = = (2-9)

式中 KII r
el.T
、 KIII r
el.l
为变压器和线路对应的 II 段和 III 段可靠系数。

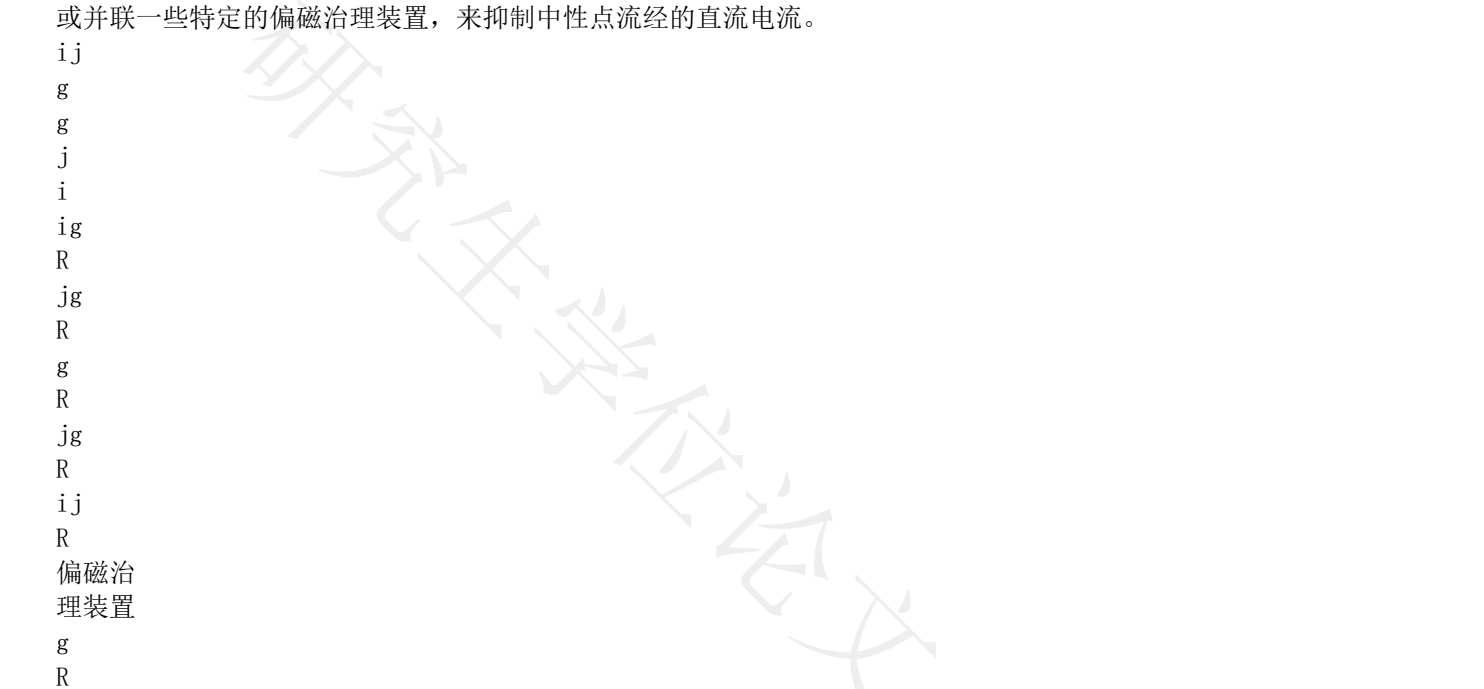
指 标	
疑似剽窃文字表述	
1.	在长距离输电线的末端发生接地短路故障时，线路首端保护的零序功率方向元件可能会出现灵敏度不足不开放的情况。在线路上发生单相接地故障时可能造成接地侧、两相接地短路故障时造成非接入侧零序方向过流保护电压元件灵敏度不足而不开放。 ③ 对零序方向元件判别的影响：改变保护反方向
2.	第 5 章对全文内容、结论进行总结，分析总结研究的不足之处，并对未来下一步的研究方向进行思考和展望。 10 第 2 章

3. 013_第3部分		总字数：8874
相似文献列表		
去除本人文献复制比：4.3%(380) 文字复制比：4.3%(380) 疑似剽窃观点：(0)		
1	085 085 - 《学术论文联合比对库》- 2014-12-10	2.1% (190) 是否引证：否
2	输电线路正序阻抗测量方法_电力检测设备仪器 - 《网络(http://blog.sina.com)》- 2019	1.1% (95) 是否引证：否
3	变压器中性点增加电容隔直装置对其继电保护的影响研究 王敏；- 《电力设备管理》- 2020-05-25	1.0% (85) 是否引证：否
4	输电线路零序阻抗的测量方法_电力检测设备仪器	0.9% (76)

- 《网络 (http://blog.sina.com) 》 - 2019		是否引证：否
5	UHVDC输电引起变压器直流偏磁及其抑制措施的研究 - 豆丁网	0.7% (60)
- 《互联网文档资源 (http://www.docin.com) 》 - 2016		是否引证：否
6	PG-ZJB-252kV变压器中性点间隙接地保护装置设计	0.4% (33)
赵子龙;李森然;张任;赵妍;汪盛; - 《科学技术创新》 - 2019-04-25		是否引证：否
原文内容		

2.2 偏磁抑制的原理和偏磁治理装置

2.2.1 偏磁抑制基本原理从中性点处入地的直流偏磁电流数值最大，为单侧绕组内零序电流的 3 倍。特别对于 Y0/y0 绕组连接方式的变压器，如果高低压侧绕组中性点是共地的，此时的变压器中性点流过的偏磁电流，即为高低压双侧绕组零序电流和的三倍，图 2-2 展示了这种接法下双绕组普通变压器和双绕组自耦变压器的偏磁治理装置的安装位置。Y0/d 或者 Y0/y 绕组连接方式下，变压器中性点流过的偏磁电流为高压侧绕组零序电流的三倍。因此直流偏磁抑制的基本原理就是：通过在变压器中性点处串联



偏磁治理装置图 2-2 偏磁治理装置安装位置示意图选择对变压器中性点进行偏磁抑制处理，而不对线路进行处理，是为了不改变系统的正负序阻抗，对正常运行产生干扰，而且针对变压器中性点的改造，可以通过抑制三相零序电流和直接抑制各相的零序电流，是最有效的手段。

2.2.2 几种偏磁治理装置总结国内外目前采取的抑制直流偏磁的措施。具体有主动和被动两种方式。主动方式顾名思义就是通过合理规划变电站的选址、变压器的接地极位置、变压器的耐受直流偏磁相关参数，来主动的削弱偏磁电流造成的影响。在选择合适的变压器方面，需要两方面的数据支持：变压器的表征偏磁电流耐受能力的性能参数以及偏磁电流在电网中的预测分布。

在探索如何抑制直流偏磁对系统的影响方面，国外早在上世纪八十年代初期就开始了相关研究，我国近年来也有大量的研究成果，各种原理的偏磁治理装置的应用都有了大量的工程实例。从理论原理上说主要有三类方式：一是利用反向电源来产生反向磁通以抵消直流偏磁，二是加装中性点阻隔装置(Neutral Blocking Device, NBD)来抑制直流偏磁，三是采取分流抑制措施削弱影响。目前针对前两种方式主要形成三种方案：中性点反注入电流、中性点经电阻接地和中性点经电容接地。这三种方法在我国广东、山东等地均有大量的实践经验，它们各存在不同的优缺点。

选择偏磁抑制措施时的基本原则是，在满足实现基本功能即偏磁抑制的基础上具有充分的可靠性，减少对电力系统正常运行的影响。因此需要详细分析这三种方法的工作机理，并根据我国电网偏磁电流的实际特点和偏磁抑制的具体要求选择合理的偏磁抑制方案。

(1) 中性点反注入电流图 2-3 展示了中性点反注入电流装置的基本原理图，除了原有的中性点直接接地部分，此附加装置包含偏磁电流测量元件和直流发生器。偏磁电流测量元件能够实时监测中性点的入地电流，并将信息通过通讯设备传递至数字控制面板，控制面板通过一定的算法，计算出用于控制直流发生装置的输出抑制电流大小和方向的控制信号，再传送给直流发生器进行设置和调节。直流发生器是一个可变直流电压源，可以根据接受得到的信息改变自身的输出直流电压，因此其输出电流也随之变化，可以实现变参数的“动态补偿”。电压源要在确保绝缘要求符合标准的前提下输出几百伏电压。直流发生器灵活性取决于其控制系统的精准，体现为动态选取注入的反向电流的大小和方向。



R_{g2}
限流电抗
直流发生器 $I_n - I_n$
 $I_n/3$

数字控制图 2-3 中性点反注入电流原理图需要注意到直流发生器和原有的接地线是不共地的，这是因为如果采用一个地，原有接地线将会被旁路，造成直流发生器产生的直流注入地网，偏磁治理效果不佳，因此直流发生器存在额外的独立外部接地极。同时为了限制直流发生器的输出补偿直流的变化率，在直流发生器出口接有限流电抗器。

现在简单计算需要设置的直流发生器电压值，对于 GIC 型偏磁电流，欲实现完全补偿，附加直流电压应该满足：

$$U_{ex} = -I_n R_{g2} \quad (2-10)$$

对于 HVDC 型偏磁电流，此时可以视为两个直流电压和内阻分别为 (R_{g1}, U_{0n}) 和 (R_{g2}, U_{ex})

并联，附加直流电压满足：

$$R = -\frac{U_{0n}}{U_{ex}} \quad (2-11)$$

值得说明的是，如果只针对接地交流系统内的单个变压器进行补偿，则其他未安装此设备的变压器中性点电位都将减去 U_{exn} ，因此对于系统内其他变压器，不能实现完全补偿。

从上面的论述还可以看出利用电流补偿的方法，实质上是补偿中性点偏磁电流产生的电位，因此可以将直流发生器所使用的可变直流电压源用可变直流电流源与 17

电阻并联的形式替代，具体结构不再赘述。

考虑到偏磁电流的波动性和测量设备的延时性，想要实现真正的实时补偿功能，对测量装置和算法的精度要求很高，此外由于需要设置额外接地极，建造和维护费用同样不容小觑。整体来说想要实现这一具有复杂原理的装置的功能，需要付出极高的成本。虽然此装置具有一定的灵活性，但是整体装置可靠性差、控制复杂、

投资巨大，现在已经基本不再采用。

(2) 中性点经电阻接地图 2-4 展示了中性点经电阻接地装置基本原理图，装置由两部分组成，为限流部分和偏磁电流测量元件，限流部分主要由旁路开关、限流电阻和石墨间隙组成。

中性点直流监测装置

A B C
 R_{g1}
 R_{g2}
 I_n
 $I_n/3$

旁路开关限流电阻石墨间隙图 2-4 中性点经电阻接地原理图偏磁电流测量元件能够实时监测中性点的入地电流，还能简单地直接控制旁路开关的通断。具体方式为：

① 系统正常运行无偏磁电流时，旁路开关闭合，此时变压器中性点直接接地；

② 设定门槛为 $I_{n,max}$ ，当测量到的中性点偏磁电流满足 $I_n > I_{n,max}$ 时，打开旁路开关，将限流电阻串入中性点；

③ 当检测到电流被抑制至门槛以下时，闭合旁路开关。

限流电阻一般采用不易损坏的合金材料制作，比较稳定可靠。采用这种偏磁抑制方式，对于 HVDC 引起的偏磁一般设置一个 20Ω 左右的电阻就能达到很好的偏磁抑制效果。有文献[56]为研究了串电阻对偏磁电流抑制效果、在计及工频过电压和雷

击过电压的影响下，认为 $8 \sim 12\Omega$ 的电阻就能够有效抑制直流偏磁现象。众多的运行数据表明，限流电阻并不需要很大的数值，几十欧姆就已经能够实现很好的抑制效果。限流电阻阻值的选择应该结合变压器的直流偏磁耐受能力、偏磁电流的实际分布、对其他站点的影响以及经济型来综合确定，如果接地交流系统内存在大量的 18

非线性负荷，也需要考虑限流电阻承受交流电流的情况。此外还有将限流电阻与接地电阻合并来直接提高变压器接地电阻的方法，虽然能够节省投资，但发生故障时有可能危及处于变电站内的设备安全。

限流电阻的旁路系统结构简单，为旁路开关和石墨间隙，旁路开关的作用与偏磁电流测量元件相关，而石墨间隙的作用是为了防止出现冲击性的偏磁电流，通过火花放电，减缓偏磁电流的上升坡度。

总体来说，采用中性点串电阻的偏磁抑制方式，有以下优点：

① 实现简单装置整体结构简单，需要元件数目少，原理和不复杂，旁路开关的控制系统也很简单。制造加工技术成熟，安

装简便，维护工作量也少，能够广泛应用。

② 安全可靠整体装置是无源的，不需要额外复杂控制保护回路，可靠性高。

③ 对系统影响小由于结构简单，对于接地交流电网影响小，潜在威胁小。同时经过实际应用可以发现，安装后周边其他变电站，直流偏磁的水平基本不受影响。也就是说不同于电流补偿，这个方法可以每个站点分别进行应用。

同时存在以下缺点：

① 偏磁抑制不彻底此装置仅能实现减小中性点偏磁电流，并不能完全阻隔直流。

② 电阻阻值随着电网发展逐渐不合适限流电阻阻值一旦确定就不能改变，因此需要考虑众多因素慎重决定，一般在规划前期，需要较大的计算工作。但是当阻值一旦固定下来，有可能随着电网的改造当前阻值逐渐不能满足限流的需求。同时由于负荷和增直流输电容量的同时增大，电阻需要有更大的耐受大电流能力，因此考虑到未来电网的发展来提高限流电阻的阻值和电流耐受能力直接关系到整体装置的未来运行的安全可靠。

③ 对继电保护产生影响限流电阻的串入增大了网络的零序阻抗，对继电保护装置可能产生一定影响，需要重新计算整定值，这一点我们将在第三章进行详细分析。

在确定直流电阻值到时候要以整个目标电网中的变压器中性点直流量都不超过限度标准要求为目的，通过优化计算方法全系统考虑，选择合适的电阻型偏磁治理装置的串入电阻，达到既能够消除了直流量超标的变压器的直流偏磁问题，又不会将直流接地极偏磁电流转移到电网中其它变电站的变压器中，导致影响范围扩大。同时，还要研究中性点串电阻后过电压如：雷电过电压、内部过电压等问题。

(3) 中性点经电容接地 19

图 2-5 展示了中性点经电容接地装置基本原理图。

中性点直流监

测装置

A B C

g

R

I_n

$I_n/3$

旁路开关隔直电容限流电抗晶闸管电压监测装置图 2-5 中性点经电容接地原理图装置同样由两部分组成，为断流部分和偏磁电流测量元件，断流部分主要由隔直电容及其电压测量元件、旁路开关和双向晶闸管保护旁路组成，其中后两项为隔直电容的旁路。旁路的存在是必须的，因为如果没有旁路，发生故障时，容易产生中性点过电压而烧毁电容，如果选择使用高耐压值的电容，需要投入巨大投资，而采用旁路就可以在确保不过电压的同时降低对电容器的参数要求，经济性和可靠性都能得到保证。

该装置的主要运行和控制原理是：

① 系统正常运行无偏磁电流时，旁路开关闭合，此变压器中性点直接接地；

② 设定一个较低的门槛电流为 I_n
， $_{max1}$ ，当测量到的中性点偏磁电流满足
 $I_n > I$

$n,_{max1}$ 时，打开旁路开关，将隔直电容串入中性点，直流电完全被阻断。

③ 设定电容电压门槛 U_n

， $_{max}$ ，当电容的电压测量元件测量到的电容两端电压被抑制至门槛 U_n
， $_{max}$ 以下时，认为直流偏磁消失，闭合旁路开关，切除旁路电容。

④ 设定门槛 I_n

， $_{max2} > I$

$n,_{max1}$ ，当测量到的中性点偏磁电流满足 I
 $n > I$

$n,_{max2}$ 时，认为系统发生极其严重的不对称接地故障。为了迅速释放大电流，同时对晶闸管保护旁路和旁路开关施加触发信号，令晶闸管导通以及旁路开关闭合，由于旁路开关是机械式的，闭合时间长于晶闸管，因此晶闸管可以先一步导通从而使中性点接地，并且使电容释放电荷防止过压，由于存在限流电抗，电容的卸荷速度被限制以防止出

现冲击电流。随后等待旁路开关闭合成功后，电容被进一步短接而不存在过压风险。

一般来说晶闸管导通时间的数量级为数十微秒，在旁路开关成功合闸之前电容会通过晶闸管旁路卸掉部分电荷，因而在旁路开关导通后，电容器在放电过程中对其造成的冲击较小，从而使旁路开关使用寿命更长久。隔直电容除了采用双向晶闸管保护旁路及机械旁路开关作为旁路系统以外，也可以采用 ZnO 避雷器作为第三级接力式后备旁路，这样提高了整体隔直装置的可靠性。

晶闸管是半控型器件，其导通是通过检测出不对称接地故障电流并且承受正压，两者，后者一般情况均可以实现，因为只要电容有电压，双向晶闸管之一必承受正压。晶闸管的关断是不可控的，只有当旁路开关投入一段时间，使其正压降至零才能关断，此时故障电流也基本消失，因此这种控制方式原理并不复杂。

总体来说，采用中性点串电容的偏磁抑制方式，主要优点是：

① 虽然相比串电阻的方法控制系统复杂但实现并不困难；

② 安全可靠，可以完全的阻隔直流；

③ 对交流系统影响小，跟串电阻对交流系统影响差不多。

采用这种方法的缺点是：

① 控制和保护系统较复杂，需要一定的基础投资；

② 虽然能够消除本站的直流电流，但由于没有抑制偏磁的电源来源，会增大线路上的偏磁直流流动，因此可能增大同一接

地交流系统内其他未安装隔直设备的变压器的中性点偏磁电流；

在实际工程应用中也发现，采用串联电容的方法进行偏磁治理后，会造成电网偏磁电流增大和大范围转移的问题。例如：2014 年溪浙直流工程投运后，大量使用电容型偏磁治理装置对 500kV 和 220kV 变电站进行偏磁电流治理，致使附近其他站变压器的中性点偏磁电流升高，影响甚至扩大到 110kV 电网中，造成影响范围和程度的扩大[28]。

③ 同样有可能对继电保护产生影响，但是由于容抗一般很小(几欧)即可达到较好的隔直效果，对保护的影响常常忽略不计。

2.2.3 偏磁治理装置对比将现有的反注入电流、经电阻接地、经电容接地三种方法进行对比，结果如表

2-2 所示。总得来说，反注入电流法拥有最佳的偏磁抑制效果，可以抑制处于任何

值的直流电流，但是需要准备额外的接地点，实现难度和成本极高，装置可靠性也不高。串电容将会增大其他站点的入地直流，同时由于电容耐压性等问题，目前无法在高电压等级实现电容隔直，并且在前文已经讲到，串联电容的方法进行偏磁治理后，会造成电网偏磁电流增大和大范围转移的问题，这是比较严重的问题难以处理。而对于串电阻方式是最容易实现的，控制和保护回路结构都非常简单，而且我国电网直流偏磁并不严重，采用中性点串电阻的形式即可达到很好的偏磁抑制效果。因此在目前的直流偏磁抑制方案中，主要采用串电阻的形式，如果对偏磁电流有严格要求且电阻抑制效果不佳，才再考虑用串电容的方案。21

表 2-2 几种偏磁抑制措施对比系统原理施工难度经济性可靠性偏磁抑制效果反注入电流复杂高低量测、控制系统复杂，可靠性低彻底串电阻简单低高可靠性高不彻底，只能削弱串电容中等低高控制系统较复杂，可靠性中等彻底

2.3 偏磁治理装置对零序保护影响定性分析当电阻型偏磁治理装置接入变压器中性点以后，接地交流系统的零序网络拓扑和相应的零序参数发生了变化，因此当不对称接地故障出现并且电阻也有效接入时，与零序电量(零序电压、零序电流、零序阻抗)相关的保护装置可能会受到影响。

2.3.1 对线路零序保护的影响根据 2.1.1 小节分析，受影响的主要为线路零序保护以及用于判断故障发生位置的零序方向元件，具体影响分析为：

(1) 对于线路零序 I~IV 段，可以看出 I~II 段的整定值，I~III 段的校验灵敏度直接取决于不对称故障的计算结果，因此它们均受影响；

(2) 线路零序 III 段整定值根据三相短路最大不平衡电流计算得出，当网络内存在不对负荷或者电源时才考虑，一般在简化分析中假设仅在短路点处存在不对称，故可以忽略；

(3) 线路零序 IV 段整定值根据最大负荷不平衡电流且不进行校验，故也不考虑；

(4) 线路零序方向元件用于判断故障发生位置，根据其阻抗角判定方程式(2-2)

和开启电压式(2-3)，处于接入侧正方向的方向元件会受到影响，非接入侧不受影响。

2.3.2 对变压器中性点零序保护的影响根据 2.1.2 小节分析，受影响的主要为变压器中性点零序保护，具体影响分析为：

(1) 涉及零序电量的变压器主保护主要针对变压器内部接地或者匝间故障，在分析线路故障时，它们均不受影响；

(2) 变压器中性点零序电压保护适用于变压器中性点不接地情况时的变压器保护，由于在接地交流系统中的零序电路中是不考虑绕组 Yn 连接的变压器的，因此变压器中性点零序电压保护不受影响；

(3) 绕组 Y0 连接的变压器一般配置了两段式中性点零序电流保护，其中中性点零序 I 段整定值与其下一级线路零序 I 段整定值配合，中性点零序 II 段整定值与其下一级线路零序 III 段整定值配合。根据对线路零序保护的影响分析，线路零序 I 段整定值会受到影响而线路零序 III 段整定值不受影响，因此接地变压器中性点零序 I 段会受影响。

2.4 本章小结本章主要介绍了线路和变压器零序保护的基本原理，结合三种偏磁抑制措施的基本控制方式，分析了主流偏磁抑制措施对零序保护的影响。主要内容为：

(1) 阐述线路和变压器中零序保护的主要类型和基本原理，总结偏磁抑制措施对零序保护产生影响的可能途径；

(2) 介绍直流偏磁抑制的基本原理，通过对比主要三种偏磁抑制措施采用的设备组成、结构、控制原理，在考虑可靠性、复杂性及实际使用情况的基础上，论证了串电阻方式优越性，即串电阻方式比反注入电流方式可靠性和成本更低，比串电容方式原理简单且对电网的偏置电流造成的增大和范围转移的影响相对小，更符合实际现场使用；

(3) 在确定串电阻方式进行偏磁治理的研究对象后，简单定性分析了电阻型偏磁治理装置的接入对线路和变压器零序保护的影响，为后文深入论证影响缩小研究范围。23

第 3 章输电线路和变压器零序保护模型

在中性点串联电阻型偏磁治理装置虽然不会影响交流网络的正常运行，即对系统的正序和负序阻抗不产生影响，但是会影响系统的零序阻抗，因此在设置串入电阻的参数时，必须要考虑对零序保护的影响。接地交流系统主要由线路和变压器组成，需要明确它们在零序保护计算中的等效模型，本章首先研究输电线路和变压器零序保护模型，再分析中性点串入电阻后零序电量变化规律和对线路和变压器零序保护的影响程度。

3.1 输电线路的零序保护模型三相输电线路可以看作是由三个“导线-大地”回路组成，这样就可以把它的阻抗看作是由一个“导线-大地”回路单独存在时的自身阻抗和此回路中另两个“导线

-大地”回路的之间的互感阻抗组成。对于三相平面排布的导线，中间一相与两边的两相互阻抗不同，而对于三相呈等边三角形排布，互阻抗三相相等，为了简化分析忽略线路导线位置差异的影响，可以认为各回路之间的互阻抗相等。

当线路一端接地，另一端分别加上正、负、零序电压，分析单相各序阻抗时可以得出，线路的正序阻抗和负序阻抗是相等的，并且正、负阻抗值是自身阻抗和互阻抗的差，而零序阻抗则是自身阻抗与互阻抗的和。

所以，三相线路在通过正、负序电流时，任意两相对第三相的互感，产生的是去磁作用，也就使正负、序阻抗减小；而通过零序电流时，任意两相对第三相的互感，产生的是助磁作用，也就使零序阻抗增大。因此，三相输电线路的零序阻抗要大于它的正、负序阻抗，表示为 z_L

(0) $> z_L$

$L(1)=z$
 $L(2)$ ，线路的各序阻抗角约为 $70^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 。
 如果线路电压等级较高，可以在简化计算中将线路视为纯感性，因此长为 l 的线路正序、负序和零序阻抗进一步表示为

Z_L

$(1)=Z$
 $L(2)=l z$
 $(1)=j l x$
 $(1), Z$
 $L(0)=l z$
 $(0)=j l x$
 (0) ，其中 x (

l) 为单位长度线路的正序电抗， x (

$(0)=x(1)$ (>1) 为单位长度线路的零序电抗。

3.2 变压器的零序保护模型

本节主要分析变压器的等效零序阻抗，虽然变压器绕组的各序阻抗角约为 90° ，即纯感性，但是变压器不同绕组连接方式和中性点接地方式下，整体阻抗值有较大的差异。

先不分析电阻型偏磁治理装置在等效电路中的表示方法，一律用电抗 x_n 替代，即中性点有不接地、直接接地或者串联 x_n 后接地三种接地方式。对于变压器而言在 24

分析等效电路时有如下约定：

(1) 每种序电流 (1、2、0) 都对应两种磁通，即互磁通和漏磁通组成了该序主磁通，且对于变压器任何一侧的绕组来说都有正负序主磁通相等，满足 x (

l)= x

(2)，所有序漏磁通相等，满足 $x \sigma (1$

$)=x \sigma ($

$2)=x \sigma (0)$ ；

(2) 仅有零序电流对应的互磁通路径取决于变压器结构和绕组的连接形式，因此 x_m

(0) 不尽相同。前面已经叙述，对于三相三柱式变压器，互磁通走漏磁路，因此磁阻较大，对应电抗较小，满足 x_m

$(0)=0.3^{1/2} x$

$m(1)=x$

$m(2)$ ，说明在零序等效电路中对

应的励磁支路不能忽略；对于三相五柱式变压器和自耦变压器，互磁通走铁芯磁路，与正序负序相同，满足 x_m

$(0)=x$

$m(1)=x$

$m(2)$ ，此时认为各序电路中的励磁支路是断开的。

目前三相五柱式普通变压器和自耦变压器等有额外零序通路的变压器较为常用。

零序等效电路是否与外电路连结，取决于系统中是否有零序通路，即与变压器三相绕组的连接形式以及中性点接地方式相关。而存在零序通路时，只有发生不对称接地故障时，产生零序电压作用于相线与大地之间，此时才会产生零序电流。发生不对称接地故障时能够产生零序电流的两种情况是：Y0 接线的变压器连接有接地的外电路；D 接线的变压器内产生绕组环流。

3.2.1 普通变压器

(1) 双绕组变压器

零序等效电路与外电路的连接方式如图 3-1 所示。

$x_m(0)$

$3x_n(0)$

外电路其他绕组图 3-1 变压器某侧绕组零序等效电路与外电路的连接方式绕组连接方式与对应等效电路关系如表 3-1 所示。

表 3-1 绕组连接方式与对应等效电路关系表

绕组连接方式开关位置与外电路关系

Y0 经 x_n 接地 2 连接，并且绕组零序电抗有附加电抗 $3x_n$

Y0 直接接地 2 连接

Y 1 断开 D(Δ) 3 断开，与励磁支路并联常用的绕组连接方式有 Y/d-11、Y/y0-12 和 Y0/d-11，一般 d 接法均对应低压绕组，其中最后一种使用最广泛。 25

对于高电压等级的偏磁抑制，有时候采用 Y0/y0-12 的接法，中性点同时并联 x_n ，此时两侧绕组附加电抗不同。下面进行推导。

根据图 3-2 左图，列高低压侧绕组的电压方程、电流方程和磁动势平衡方程。

1. 方面，国外早在上世纪八十年代初期就开始了相关研究，我国近年来也有大量的研究成果，

2. 当线路一端接地，另一端分别加上正、负、零序电压，分析单相各序阻抗时可以得出，线路的正序阻抗和负序阻抗是相等的，并且正、负阻抗值是自身阻抗和互阻抗的差，而零序阻抗则是自身阻抗与互阻抗的和。

4. 013_第4部分		总字数：13503
相似文献列表		
去除本人文献复制比：0.9%(118)文字复制比：0.9%(118)疑似剽窃观点：(0)		
1	变压器安装与运行(8) 柳泽荣；- 《变压器》- 2007-10-08	0.4% (52) 是否引证：否
2	浅析微机型主变差动保护误动原因分析及对策 何晔；- 《中国战略新兴产业》- 2018-06-08	0.3% (35) 是否引证：否
3	公伯峡电站主变发生过激磁的分析 刘赤庆；- 《青海科技》- 2010-10-25	0.2% (30) 是否引证：否
原文内容		

$xI(0)$
 xI
 $I(0)$
 $xn * *$
 $I(0)U$
 $0()I$
 I
 $0()I$
 E
 $0()II$
 U
 $0()II$
 I
 $0()II$
 E
 n
 I
 $3(1-k)xnx0$
 $()II(0)I$
 $I(0)U$
 $x'I$
 $I(0)3(k-1)kxn$
 $0()II$
 U
 $)0(II$
 I'
 $0)0(II()I$
 $E=E'$
 $xm(0)$
 $)0m($
 I
 $3kxn$
图 3-2 Y0/y0-12 双绕组变压器等效电路
 $I(0) I 0 I 0 I 0$
 $II 0 II 0 II 0 II 0$
 $I 0 II 0$
 $I 0 II 0 0$
 $I 0 0 0$
 $() () () n n$
 $() () () () n n$
 $n () ()$
 $() I () II m () I$
 $() 2 () m () m(0) = + 3 ()$

$$\begin{aligned}
& U E I I \\
& U \\
& I \\
& jx \ jx \\
& jx \ jx \\
& N N N \\
& k \ jx \\
& I \\
& E I I \\
& I I \\
& I I \\
& E E I \quad - + \quad = - - \quad = + \quad + = - - = - =
\end{aligned}$$

壺衾 (3-1)

对第四式进行变形, 取变比 $k=NI/N$

II, 且I

$$I(0)II(0)$$

' =I/k I , 得:

$$0)II(0)I(0)m(0)$$

$$I + I' = I \quad (3-2)$$

同时第三式可以转化为:

$$In(0)(I I 0)$$

$$=3(I k I + I)' \quad (3-3)$$

令(

$$0) II(0)II(0)$$

$$' E_k E = , ($$

$$0) II(0)II(0)$$

' U_k U = , 对第二式两边同乘 k, 并带入I

$$I(0)II(0)$$

$$' =I/k I ,$$

整理为:

$$I(0)II(0)II(0)n I(0)II(0)n0$$

$$U' =E -I' \quad I_{jx} -jkx \quad (3-4)$$

其中I2

$$(0))II I 0($$

$x' =k x$, 将式(3-2)、式(3-3)带入式(3-1)第一式和式(3-4)并进一步整理为:

$$I(0) I 0 I 0 I 0 0$$

$$II 0 II 0 II)$$

$$() () () n m() n$$

$$() () II 0()n0 n m()) 0$$

$$I(2(0) m(0) m(0)0 = + [3(1) ' ' 1' '] 3 [' 3()] 3$$

$$j x k x$$

$$U$$

$$j kx$$

$$j x k kx j kx$$

$$j$$

$$U E I I$$

$$E$$

$$I x$$

$$I I$$

$$E E \quad - + - + \quad = - + - - \quad = = -$$

煇 (3-5)

根据式(3-5)即可做出等效电路为图 3-2 右图所示。忽略励磁支路简化为“一”

字形等效电路, 得从高压侧看入的零序阻抗为 $x I$

$$(0)+x'$$

$$II(0)+3(1-k)2x$$

$$n=x$$

$$T(0)+3(1-k)2x$$

$$n。$$

(2) 三绕组变压器 26

常用的绕组连接方式有 Y0/y/d-11 和 Y0/y0/d-11。图 3-3 即为 Y0/y/d-11 对应的

等效电路, 可以看到忽略励磁支路后从高压侧看入该变压器零序阻抗为

$x \ I$
 $(0)+x'$
 $III(0)//x$
 $m(0)$
 xI
 $(0)+x'$
 $III(0)$ 。
 $xI \ (0)$
 $x' \ I$
 $II(0)$
 $x' \ I$
 $I(0)$
 $xm \ (0)$

图 3-3 Y0/y/d-11 三绕组变压器的等效电路

3.2.2 自耦变压器自耦变压器必须接地，因为其的一、二次绕组间不仅存在磁场联系，还有电气联系，若中性点不接地，当高压侧发生单相接地故障时，中性点的电压可达高压侧的相电压，会直接传到低压侧，造成低压侧严重过电压，从而损坏低压侧的电气设备。常用的绕组连接方式仅存在两种，为 Y0/y0 和 Y0/y0/d-11，分别对应双绕组和三绕组。

以下直接推导 Y0/y0/d-11 三绕组自耦变压器的等效电路，由于本来就已经接地，

如果在中性点继续安装电阻型偏磁治理装置可以视为，对参数 $x' \ I$

$I(0)$ 进行更改。同样根据图 3-4 左图列写方程。 $() \ () \ () \ () \ () \ (0) \ () \ () \ () \ (0) \ () \ () \ () \ () \ ()$
 $(0) \ () \ () \ n$

$() \ I \ () \ II \ () \ III \ m() \ I \ II$

$I \ 0I \ 0 \ II \ 0 \ I \ 0 \ I \ 0 \ II \ 0$

$II \ 0 \ II \ 0 \ II \ 0$

$III \ 0 \ III \ 0 \ III \ 0 \ III \ 0$

$I \ 0 \ II \ 0$

$I \ 0 \ II \ 0 \ II$

I

$I \ 0 \ (\ 0$

$0) \ II \ 0() = + \ 0 \ / \ 3 \ () \ ()$

$jx \ jx$

jx

j

$U \ E \ E \ I \ I$

$U \ E \ I$

$U \ E \ I$

$I \ I \ I \ I$

$I \ INI \ I$

E

x

$N \ N$

E

$N \ N \ - \ - \ + \ = \ - \ = \ - \ = \ + \ = \ + \ + \ = \ +$
 $- \ +a)$

$IO \ I-III \ 0II(\ II() \ m() \ m(00) \)$

$E \ k \ E \ Ik \ jx \ \ \ \ = \ - \ = \ - \ =$

$\Omega \ (3-6)$

同样有以下定义 $() \ () \ () \ () \ () \ () \ () \ () \ () \ () \ () \ () \ () \ () \ ()$

$I \ II \ I \ II$

$I-II \ I-III$

$II \ III$

$II \ 0 \ II \ 0 \ I-II \ II \ 0 \ I-II \ II \ 0 \ II \ 0 \ I-II \ II \ 0$

$III \ 0 \ III \ 0 \ I-III \ III \ 0 \ I-III \ III \ 0 \ III \ 0 \ I-III \ III \ 0 \ 1, \ ' \ ' \ / \ , \ / \ , \ ' \ ' \ ' \ , \ , \ '$

a

$N \ N \ N \ N$

$k \ k \ k \ k$

$N \ N$

$I \ I \ k \ U \ k \ U \ k \ E$

$I \ I \ k \ U$

E

$k \ U \ k \ EE \ + \ + \ = \ = \ = \ = \ = \ + \ = \ = \ = \ = \ (3-7)$

式(3-6)第四五六式可以整理为 27 (0) () ()

() () () m()

I() II() II() III() m()

I 0 II 0

I 0 II

m

0 III (0) 0 0 0 0 0 0 0 ' , , , ,

a

x

I I I

I I I I

E E j E

k

E I = + + + = + = = -

袂 (3-8)

xI (0)

xI

I(0) * *

0() I

I (1-ka) x

II(0)

x0

() II(0)

I

I(0)U

0() II

U

)0(II

I'

xm (0)

)0m(

I

kax

II(0)

xI

II(0)

0() III

I

0() III

U0

() III

E

0() I

E

0() II

E

I(0)U

II(0)U

0() II

I (0)

I

(ka-1)k

ax

II(0)

0) III 0m(()

I -I' () () () ()

I 0 II 0

II 0 III 0 ' , = =

E E

E E +

() III 0

$$U = 0$$

$$(I) II \ 0$$

$$I' \ 2$$

$$I-III \ III \ 0()$$

$$k \ x$$

图 3-4 Y0/y0/d-11 三绕组自耦变压器的等效电路

式(3-6)第一式以及式(3-6)第二三式分别两边乘 k_a 、 k

$I-III$ ，三式一起化简有 $() () () (0$

$) () () m() () () () ($

$$I \ 0 I \ 0 \ II \ 0 \ I \ 0 \ I \ 0 \ II \ 0 \ 0 \ III \ 0 \ II \ 0$$

$$II \ 0) () m() () () 2$$

$$() () () I-$$

$$II \ 0 \ III \ 0 \ 0 \ 0 \ III \ 0 \ I \ 0$$

$$III \ 0 \ 0 \ III \ 0) III \ III \ 0(III = + [(1) '] () (1) () 0 ' ' ' ' ' ' ,$$

$$a \ a$$

$$a \ a \ a$$

$$j \ x \ k \ x \ jk \ x$$

$$jk$$

$$x$$

$$U \ E \ E \ I \ I \ I$$

$$U \ Ix \ E \ I \ I$$

$$U \ E \ I$$

$$k \ x \ jk$$

$$jk \ - \ - \ + \ - \ + \ - \ = \ - \ - \ - \ - \ = \ - \ - \ =$$

臧 (3-9)

即可做出等效电路如图 3-4 右图所示。由于低压侧与励磁绕组并联，可以进行化简，励磁支路可以表示为 x_m

$$(0)/k2$$

$$I-III$$

$$x \ I$$

$$II(0)+k$$

$$ax$$

$$II(0)$$

$$k2 \ I$$

$$-III$$

$$x \ I$$

$$II(0)+k$$

$$ax$$

$II(0)$ 。如果中性点并入

x_n ，可以视为增大了 $3x$

n ，因此由等效电路高压中压绕组和励磁支路等效电抗分别为

$$0 \ II) \ 0(n \ I \ ()$$

$$(1) + 3(1) a$$

$$a$$

$$x + -k \ x \ -k \ x \ 、 \ I$$

$$(0) \ n \ I$$

$$(1) + 3(1) a$$

$$a \ a \ a$$

$$k \ k \ -x \ k \ k \ -x \ \text{和} \ I$$

$$I(0) \ II(0) \ n \ I$$

$$' \ 3a$$

$$a$$

$x + kxk$ 。可以推断对于 Y0/y0/d-11 三绕组变压器，将 k_a 全部换成 k 即可。

对于 Y0/y0 接法的双绕组自耦变压器，去掉图 3-4 中的低压绕组，则励磁支路表示为 x_m

$$(0)+k$$

$$ax$$

$II(0)$ 可以视为断路，等效电路转化为仅包含高中压绕组的一字型，高压侧看入的零序阻抗为 xI

$$(0)+(1-k_a)2x$$

$II(0)$ ，如果中性点并入 x

n ，视为增大了 $3x$

n ，因此

由等效电路高压中压绕组分别为0

$$II) 0(n I ()$$

$$(1) + 3(1) a$$

$$a$$

$$x + -k x -k x 、$$

$$I(0) n I$$

$$(1) + 3 (1) a$$

$$a a a$$

$$k k -x k k -x , \text{ 零序阻抗为 } xI$$

$$(0) + (1 - ka) 2x$$

$$II(0) + 3(1 - ka) 2x$$

$$n = x$$

$$T(0) + 3(1 - ka) 2x$$

$$n,$$

可以看到跟图 3-2 的推论是基本一致的, 唯一不同的是用 ka 替代 k 。 28

3.3 电阻型偏磁治理装置对零序保护的影响分析

3.3.1 零序电量分析根据 2.3 小节分析, 电阻接入后主要影响作为线路主保护的零序电流保护、零序方向元件判别和作为变压器后备保护的中性点零序电流保护。据此后续不对称故障计算的主要任务为: 线路零序电流测量值 $|3I_0|$ 、线路零序电压测量值 $|3U_0|$ 、变压

器中性点电流 $|I_n|$ 、变压器中性点电压 $|U_n|$ 。对于两端简化系统来说对于同一侧的变压器中性点和任意线路保护安装处 $|I_n| = |3I_0|$ 。

(1) 模型假设由于线路的拓扑和变电站的运行方式、中性点接地形式各异, 接地交流系统的正序和零序实际拓扑是很复杂的, 为了简化分析得出定性结论, 做出如下假设:

① 所有计算不特殊说明均为标么值运算, 网络内线路、变压器的各序参数均已折算到短路点所在线路电压等级;

② 对于任意节点间的线路, 设其型号统一且均为单回线运行, 其单位长度的正序、负序和零序阻抗表示为 $z(1) = z$

(2), z

(0) = $z(1)$, 其中 >1 。因此长为 1 的线路 MN,

其正序、负序和零序阻抗表示为 Z_L

(1) = Z

$L(2) = 1z$

(1) = $j1x$

(1), Z

$L(0) = 1z(1) = j1x(1)$ 。由于 220kV

及以上电压等级线路的电阻较小, 为了简化分析还假设线路为纯感性的。

③ 考虑到高电压等级的变电站, 一般至少有两台主变并列运行, 且接地方式不同, 这样会大大加大计算复杂性, 在分析中设各变电站仅有一台变压器, 且其绕组连接方式仅存在 Y0 经电阻型偏磁治理装置接地、Y0、Y、D 四种。变压器正序负序阻抗相等, 表示为 Z_T

(1) = Z

$T(2) \neq Z$

$T(0)$ 。为了继续使用我们在 3.2 小节推导的模型,

继续对连接组别进行假设:

i. 双绕组变压器仅存在普通 Y0/d-11、Y0/y0 连接。其中 Y0/d-11 为接地交流系统零序边界变压器, Y0/y0 为连通两条线路的零序扩展变压器。三绕组仅存在自耦 Y0/y0/d-11 连接, 为零序扩展变压器。

ii. 对于某个原来有两侧绕组均为 y0 连接的变压器, 如果安装电阻型偏磁治理装置, 可以采取将中性点引出后, 然后串同一电阻的方法, 如图 3-2 和图 3-4 所示,

也可以采取单边串接的方法。

④ 在计算分析时认为串电阻情况下中性点的附加阻抗为 $z_n = jx$

$n = R$, 此时 x

$n = -jR$ 。

(2) 不对称故障下接入治理装置前后的零序电量分析图 3-5 展示了图 2-1 对应的 MN 两端系统的阻抗分布示意图, 为了简便分析不考虑线路分段, 其中升降压变压器仍采取 Y0/d-11 连接的双绕组普通变压器, 所有参数均已在图上标出, 在线路 $\lambda 1$ 处发生了单相接地或两相接地故障, 在 M 侧主变

接入了阻抗为 $z_n = jx$

$n = R$ 的电阻型偏磁治理装置。 29

$K(1)$

, $K(1, 1)$

$\lambda 1z(1)$

$\gamma \lambda 1z(1)$

$(1-\lambda)l_z(1)$
 $\gamma(1-\lambda)l_z(1)$
 $M \quad MN \quad N$
 M
 E
 $\dot{E},$
 N
 E^*
 $Z_M(0)$
 $Z_M(1)$
 $Z_N(0)$
 $Z_N(1)$
 z_n

图 3-5 MN 两端系统阻抗分布

图 3-5 中ME

$H,$
 和NE
 $h^1 v$
 分别代表 M、N 侧的等效电源： Z_M
 $(1)、Z$
 $M(0)、Z$
 $N(1)、Z$
 $N(0)$ 分别为 M、N 侧的正序、零序等值阻抗，正序阻抗包括电源和变压器 (Z_M
 $(1)>Z$
 $T_M(1)、$
 Z_N
 $(1)>Z$
 $T_N(1)$), 零序阻抗仅包含变压器 (Z
 $M(0)=Z$
 $T_M(0)、Z$
 $N(0)=Z$
 $T_N(0)$), 需要说明的是, 接
 入 z_n 后, M 侧零序阻抗变成 Z
 $M(0)+3z_n$
 n : 短路点至 M 侧距离为 λl , 对应线路的正序、
 零序阻抗为 $\lambda l_z($
 $1)$ 和 $\lambda l_z(1)$, 短路点至 N 侧距离为 $(1-\lambda)l$, 对应线路正序、零序阻抗为
 $(1-\lambda)l_z($
 $1)$ 和 $(1-\lambda)l_z(1)$ 。做出该系统的正序和零序网络如图 3-6 所示。
 $Z_M(1)$
 $\lambda l_z($
 $1)(1-\lambda)l_z$
 $(1)Z$
 $N(1)$
 Z_N
 $(0)\gamma(1-\lambda)l_z($
 $1)\gamma\lambda l_z(1)$
 $3z_nZ$
 $M(0)$
 $k(0)$
 U
 $p_{\infty} k(1)U$
 p_{∞}
 $Mk(0)$
 I
 \tilde{Z}
 $Nk(0)$
 I
 $\circ \quad \dot{U} \% NE^*$
 M
 E

图 3-6 两端系统正序和零序网络在 K 处发生单相接地或者两相接地故障，短路电流可以计算为：

$$\begin{array}{l} \text{E E} \\ \text{I I} \\ \text{E E} \\ \text{I I} \end{array} = = + + = = + +$$

式中

Z' 为加入电阻型偏磁治理装置后的零序阻抗，它们的表达式为：

$$\begin{array}{l} Z \ 1z \ Z \ 1z \\ Z \ Z \ 1z \\ Z \ 1z \ Z \ 1z \\ Z \ 1z \ Z \ 1 \end{array}$$
$$\begin{array}{l} () M (0) n N (0) n 0 () \\ M (0) n N (0) \\ 1 N 1 (3) 3) // (1) 3 \\ l_Z Z 1 \\ X \times X \\ z \ j \\ X \\ z \end{array}$$

$$X_x + + + + = + + - \quad (3-11)$$

式中 $X \Sigma (1$

)代表接入系统的正序感抗， $X M \Sigma$

(0)和 $X N \Sigma (0$

)表示短路点左侧和右侧的等效零序感抗。它们均是描述短路点位置 λ 的函数，先将 λ 视为定值，即短路点位置固定。

为了求得 M、N 侧的零序电流分布，需要计算加装电阻前后的 M、N 侧的零序电流分配系数： () () () () () ()

() () () () () () () () () ()

$O() N (0)$

$M(0)$

$O O() M (0) N (0)$

$O M (0)$

$N(0)$

$O O() M (0) N (0)$

$O() N (0)$

$M(0)$

$O O() M (0) N (0) O$

$N(0) ($

$N1$

$M N1$

$M 1$

$M N1$

$N1$

$M N1$

$M 1$

$O N O M ' 3 3 3 ' 1 1 3$

$n n$

n

n

X

C

z

$X X$

X

C

$X X$

z

X

$Z 1z$

$Z Z 1z$

$Z 1$

$Z Z 1z$

$Z 1z$

$Z Z 1$

$Z 1z$

x

$Z Z 1$

C

$z X$

$z z$

X

z

C

$$+ = + + + + = + + + + = + + + + + + = + + + - - +$$

$M (0)$

) $M (0) N (1 0) 3 3$

n

n

$X x$

$$X x X + = + + (3-12)$$

因此可以计算出 M、N 母线与零序保护相关的零序电压电流测量以及两侧主变入地的中性点电流。 () () ()

$Mk(0) M(0) k M_n Mk(0) OMk(0) M_n$

$Nk(0) N(0) k N_n Nk(0) ONk(0) N_n$

$Mk(0) \quad M(0) \quad k \quad Mn \quad Mk(0) \quad OMk(0) \quad Mn \quad Mk(0)$

$Nk(0) \quad N(0) \quad k \quad Nn \quad Nk($

M

N

$M, , 0, , 0', , , , , ' (3)', , ' 3', , , , , , ,$

$n \quad n$

$I \quad C \quad I \quad I \quad U \quad I \quad U$

$I \quad C \quad I \quad I \quad U \quad I \quad U$

$I \quad C \quad I \quad I \quad U \quad z \quad I \quad U \quad z \quad I$

$I \quad C \quad I \quad I \quad U$

Z

Z

$Z = = = = = = = = + = = = 0$

$) (0N) \quad Nk(0) \quad NnZ \quad I', U' \quad 0 = = (3-13)$

式中 M

$k(0)$

$3I$

$\quad t$

$、N$

$k(0)$

$3I$

x

$、M$

$k(0)$

$3I'$

$\quad t$

$、N$

$k(0)$

$3I'$ 分别为 $M、N$ 母线接入电阻型偏磁治理装置前后的 TA 测量零序电流； M

$k(0)$

$3U$

$\quad t$

$、N$

$k(0)$

$3U、M$

$k(0)$

$3U'、N$

$k(0)$

$3U'$ 分别为 $M、N$ 母线接入

电阻型偏磁治理装置前后的 TV 测量零序电压； M

n

$3I、N$

n

$3I、M$

n

$3I'、N$

n

$3I'$ 分别为

$M、N$ 侧主变高压 $Y0$ 侧中性点接入电阻型偏磁治理装置前后的入地电流，根据零序电路拓扑，它们与 M

$k(0)$

$3I$

$\quad t$

$、N$

$k(0)$

$3I、M$

$k(0)$

$3I'、N$

$k(0)$

$3I'$ 分别对应相等； M

n
 U
 $\dot{a} \ \omega$
 $\cdot \ N$
 n
 U
 $\dot{a} \ \omega$
 $\cdot \ M$
 n
 U' 、 $3I$
 Nn
 U'

$\epsilon; \omega$ 分别为 M、N 侧主变高压 Y0 侧中性点接入电阻型偏磁治理装置前后的电压，
 根据假设，接入前中性点直接接地，因此除了接入的 M 侧，其余值均为零。

下面带入具体的值进行计算，计算结果如表 3-2 所示。我们主要关心，接入前后，各种零序电量的变化情况，根据表中计算结果可以进行下一步分析。表中 $x_n = -jR$ ，

下面分析中也取同样数值。

表 3-2 单相接地和两相接地零序电量计算结果

单相接地 K(1) 两相接地 K(1, 1)

M
 侧 M 点零序测量电流前 $N(0) M k(0) k 0$
 (1) $M(0) N(0) M(0) N(0) 3 3 2 ()$

X
 $I \ j \ E$
 $X \ X \ X \ X \ X \quad = - \ + \ +$
 $N(0) M$

$k(0) k 0$
 (1) $M(0) N(0) M(0) N(0) 3 3 () 2$

X
 $I \ j \ E$
 $X \ X \ X \ X \ X \quad = - \ + \ +$
 后 $N(0) M k(0) k 0$

(1) $M(0) N(0) M(0) n N(0) 3 ' 3$
 $2 (3) (3) n$

X
 $I \ j \ E$
 $X \ X \ x \ X \ X \ x \ X \quad = - \ + \ + \ + \ +$
 $N(0) M$

$k(0) k 0$
 (1) $M(0) N(0) M(0) n N(0) 3 ' 3$
 $(3) 2 (3) n$

X
 $I \ j \ E$
 $X \ X \ x \ X \ X \ x \ X \quad = - \ + \ + \ + \ +$
 M 点零序测量电压前 $M(0) N(0) M k(0) k 0$

(1) $M(0) N(0) M(0) N(0) 3 3 2 ()$
 $X \ X$

$U \ E$
 $X \ X \ X \ X \ X \quad = + \ +$
 $M(0) N(0) M$

$k(0) k 0$
 (1) $M(0) N(0) M(0) N(0) 3 3 () 2$

$X \ X$
 $U \ E$
 $X \ X \ X \ X \ X \quad = + \ +$

后)
 $M(0) N(0)$
 $M k(0) k 0$
 (1) $M(0) N(0) M(0) n N(0)) (3) 3 ' 3 2 (3) (3)$

n
 n

$x \ X$
 $U \ E$
 $X \ X \ x \ X \ X \ x \ X$
 $X \quad + = + + + +$
 M
 $M(0 \ N \ (0)$
 $Mk(0) \ k \ 0$
 $(1) \ (0) \ N \ (0) \ M \ (0) \ n \ N \ (0) \) \ (\ 3 \) \ 3 \ ' \ 3 \ (\ 3 \) \ 2 \ (\ 3 \)$
 n
 n
 X
 $X \ x \ X$
 $U \ E$
 $X \ x \ X \ X \ x \ X \quad + = + + + +$
 M 点零序方向元件
 前 $(\) Mk(0)0$
 $Mk \ 0)$
 $M \ (\ 3$
 $\arg \arg(\) \ 90 \ 3$
 U
 j
 I
 $= -X = -$
 后 $(\) (\) Mk(0)0 \ 0$
 $Mk(0)$
 $M \ M \ 3 \ ' \$
 $\arg \arg[\ (\ 3 \)] \ 90 \ \arg(\ 3 \)$
 $3 \ ' \ n$
 n
 U
 $j \ x \ x$
 I
 $= -X + = - \ +X +$
 接入后 M
 主变高压侧中性点
 电位
 $N \ (0)$
 $Mn \ k \ 0$
 $(1) \ M \ (0) \ N \ (0) \ M \ (0) \ n \ N \ (0) \ 3 \ ' \ 2 \ (\ 3 \) \ (\ 3 \)$
 n
 n
 $x \ X$
 $U \ E$
 $X \ X \ x \ X \ X \ x \ X \quad = + + + +$
 $N \ (0)M$
 $n \ k \ 0$
 $(1) \ M \ (0) \ N \ (0) \ M \ (0) \ n \ N \ (0) \ 3 \ ' \ (\ 3 \) \ 2 \ (\ 3 \)$
 n
 n
 $x \ X$
 $U \ E$
 $X \ X \ x \ X \ X \ x \ X \quad = + + + +$
 N
 侧 N 点零序测量电流前 $M \ (0)Nk(0) \ k \ 0$
 $(1) \ M \ (0) \ N \ (0) \ M \ (0) \ N \ (0) \ 3 \ 3 \ 2 \ (\)$
 X
 $I \ j \ E$
 $X \ X \ X \ X \ X \quad = - + +$
 $M \ (0)N$
 $k(0) \ k \ 0$
 $(1) \ M \ (0) \ N \ (0) \ M \ (0) \ N \ (0) \ 3 \ 3 \ (\) \ 2$

$$\begin{aligned}
& X \\
& I_j E \\
& X X X X X = - + + \\
& \text{后 } M(0) N_k(0) k 0 \\
& (1) M(0) N(0) M(0) n N(0) 3 3' 3 2 (3) (3) \\
& n \\
& n \\
& X x \\
& I_j E \\
& X X x X X x X + = - + + + + \\
& M(0) N \\
& k(0) k 0 \\
& (1) M(0) N(0) M(0) n N(0) 3 3' 3 (3) 2(3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& n \\
& n \\
& X x \\
& I_j E \\
& X X x X X x X + = - + + + + \\
& N \text{ 点零序测量电压前 } N(0) M(0) N_k(0) k 0 \\
& (1) M(0) N(0) M(0) N(0) 3 3 2 () \\
& X X \\
& U E \\
& X X X X X = + + \\
& N(0) M(0) N \\
& k(0) k 0 \\
& (1) M(0) N(0) M(0) N(0) 3 3 () 2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X X \\
& U E \\
& X X X X X = + + \\
& \text{后 } N(0) M(0) N_k(0) k 0 \\
& (1) M(0) N(0) M(0) n N(0) (3) 3' 3 2 (3) (3) \\
& n \\
& n \\
& X X x \\
& U E \\
& X X x X X x X + = + + + + + \\
& N(0) M(0) N \\
& k(0) k 0 \\
& (1) M(0) N(0) M(0) n N(0) (3) 3' 3 (3) 2(3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& n \\
& n \\
& X X x \\
& U E \\
& X X x X X x X + = + + + + + \\
& N \text{ 点零序方向元件 } () \\
& N_k(0) N_k(0) 0 \\
& N_k(0) N_k(\\
& N 0) 3' 3 \\
& \arg \arg \arg () 90 3' 3 \\
& X \\
& U U \\
& j \\
& I I = - = -
\end{aligned}$$

逐条分析各零序电量的变化情况，为了指代方便设每次比较中未加电阻型偏磁治理装置前得的计算结果的分式中分子分母分别为正实数 A、B。加入后得的计算结果的分式中分子分母中 $3x_n$ 的系数(如果存在)分别为正实数 C、D。

提出如下判定准则便于后续分析，证明略。 $2 2 2 2$, , 0, 0, , 0/ 0 / , 0 ,

A D
AA B
B
C
D

C BC A

B

D

BA + + = - (3-14)

① M 点零序测量电流幅值M

k(0)

3I

i. 对于 K(1)，可以看到，仅有分式的分母发生变化，即比较 A/B 与 |A/(B+3xnD)| 的大小关系： 32

N (0) (1) M (0) N (0) M (0) N (0)

(1) N (0) 2 2 , 2 () , 0, 2 , 0

3 9nB

A X B X X X X X

C D X X

A

x

D

A A A

B D B R D = + = = + + = + - + =

ii. 对于 K(1,1)，同理。可以看到仅有 B、D 取值发生变化，判断结果不变。

N (0) (1) M (0) N (0) M (0) N (0)

(1) N (0) , () 2 , 0, 2 , 0

A X B X X X X X

C D X X

AD = + + = = + = -

② M 点零序测量电压幅值M

k(0)

3U

i. 对于 K(1) ，可以看到，分式的分子分母均发生变化，即比较 A/B 与

| (A+3xn

C)/(B+3x

n D)| 的大小关系： ()

M(0) N (0) (1) M (0) N (0) M (0) N (0)

N (0) (1) N (0) 2 2

(1) M (0) M(0) N 1N 2 2 2 2 (0) (1) (2 0) 2 , 2 () , , 2 , (9 2) (2) 3 3 9 0

n

n

1x

A x C A R C A

B x D B R D B

A X X B X X X X X

C X D X X

BC AD X X X X X X + + = = + + = + = - = + + - + + =

ii. 对于 K(1,1)，同理。此时有 B、D 取值发生变化，重新计算Δ。()

M(0) N (0) (1) M (0) N (0) M (0) N (0)

N (0) (1) N (0) 2 2

(1) M (0) M(0) N (0) (1) 1N (0) , () 2 , , 2 , (2) (2) 0

A X X B X X X X X

C X D X X

BC AD X X X X X 1x X = + + = + = - = + - = +

因此判定结果不变。

③ M 点零序方向元件的阻抗角M

k(0)

Mk(0) 3

arg 3

U

I

由于 M 点零序方向元件的判定结果仅取决于 M 的背后系统，因此与短路点位置和短路形式无关，原来背后系统的近似为纯感性，因此其阻抗角为-90°。在加入电阻型偏磁治理装置后，判定结果为： () ()

M

M

$Mk(0) \quad 1 \quad 0$
 $Mk(0) \quad 0 \quad 3 \quad ' \quad 3$
 $\arg 90 \arg(3) 90 \tan [180, 90]$
 $3 \quad ' \quad n$
 X
 $U \quad R$
 x
 $I \quad X \quad - = - + + = - - - - (3-15)$

可以看到相角发生了滞后。

④ 接入后 M 主变中性点电位

n
 U'
 $@\S i$

由于接入之前电位为 0，接入后幅值不为零，主要分析电位的相角变化。如果 33 认为短路时刻对应两电源初始相位分别为 ϕ_M 、 ϕ_N ，即

$M \quad M$
 $E = E \quad , \quad N$
 $N \quad N$
 $E = E \quad ,$

则根据式(3-11)第一式， $k \neq 0$

E
 $(\dot{A} \quad ' \quad$
 初始相位处于 ϕ_M 、 ϕ_N 之间，设为 ϕ_{MN} 。因此

n
 U'
 $e^{j\frac{\pi}{4}} \quad ' \quad$
 相位

主要取决于后面的分式。

i. 对于 $K(1)$ ：

$(1) \quad M \quad (0) \quad N \quad (0) \quad M \quad (0) \quad N \quad (0)$
 $N \quad (0) \quad (1) \quad N \quad ($
 $MN \quad MN \quad MN \quad 0) \quad 1$
 $k \neq 0 \quad k \neq 0 \quad 3 \quad 3$
 $\arg \arg \arg 3 \quad 0, \quad 2 \quad (\quad) \quad , \quad , \quad 2 \quad , \quad 3$
 $90 \tan [90, \quad] \quad 3$

n
 n
 A
 D
 $B \quad X \quad X \quad X$
 B
 $X \quad X$
 $C \quad X \quad D$
 D
 $X \quad X$
 RD
 $E \quad E$
 $x \quad C \quad j \quad RC$
 $x \quad B \quad j \quad BR$

$- = + = + = + = + = - + - + -$

可以看见接入限流电阻后，M 侧中性点电压幅值增大，相位为比短路点故障前电压

$k \neq 0$
 E
 $(\dot{A} \quad ' \quad$
 滞后 139
 $0 \tan$
 RD
 $B \quad - - \quad .$

指 标		
疑似剽窃文字表述		
1. 变压 器中性点电流 In 、变压器中性点电压 Un 。对于两端简化系统来说对于同一侧的变压器中性点		
5. 013_第5部分		总字数：10990
相似文献列表		
去除本人文献复制比：5.4%(591) 文字复制比：5.4%(591) 疑似剽窃观点：(0)		
1	192 - 《学术论文联合比对库》- 2019-01-05	5.4% (591) 是否引证：否
2	变压器GIC直流偏磁治理装置及其优化设计 吴家俊(导师：宗伟;朱文兵) - 《华北电力大学(北京)硕士论文》- 2019-03-01	4.1% (453) 是否引证：否
3	吴家俊查重版 - 《学术论文联合比对库》- 2018-12-30	2.9% (314) 是否引证：否
原文内容		

ii. 对于 K(1,1)，同理。仅有 B、D 取值发生变化，相角计算结果不变。

(1) M (0) N (0) M (0) N (0)
N (0) (1) N (0) 0, () 2 , , 2
A B X X X X X
C X D X X = = + + = = +

⑤ N 点零序测量电流幅值N

k(0)

3I

i. 对于 K(1) ，可以看到，分式的分子分母均发生变化，即比较 A/B 与

| (A+3xn
C)/(B+3x
n D)|的大小关系：
M (0) (1) M (0) N (0) M (0) N (0)
(1) N 2 (0)
(1) N (0 2) 2 2 2 , 2 () , 1, 2 , 2 0 3 9 3 9

n
n
A
B
X B X
x
X X X X
C D X X
A x C A R A
B D B R
BC D X
D
A X

= = + + = = + = - = + + + = +
ii. 对于 K(1,1)，同理。此时有 B、D 取值发生变化，重新计算Δ。

M (0) (1) M (0) N (0) M (0) N (0)
(1) N (0)
(1) N (0) , () 2 , 1, 2 , 0
A X B X X X X X
C D X X
BC AD X X = = + + = = + = - =

因此判定结果不变。

⑥ N 点零序测量电压幅值N

k(0)

K 和 I_s

en. 4(0)

K 不变；同理 M 侧接入限流电阻后

(1) (1, 1) $N_k(0)$

K , $K=0$

max I

增大，

(1) (1, 1) $M_k(0)$

K , $K=1$

max I

减小，因此相应 M、N 两侧的整定值 I_s

et. 2(0)

I 和 I_s

et. 3(0)

I 应该分别增大和减小，才能保证

灵敏度 I_s

en. 2(0)

K 和 I_s

en. 3(0)

K 不变。

如果整定值无变化，根据灵敏度计算公式， (1) (1, 1) 1

$M_k(0)$

K , $K=$

min I

减小，因此根据 (1) (1, 1) 1

I

set. 1(0) $M_k(0)$

K , $K=$

I_3 min I

= 计算出的 λ_1 减小，灵敏度 I_s

en. 1(0)

K 降低， (1) (1, 1) 4

$N_k(0)$

K , $K=$

min I

增大，因此根据 (1) (1, 1) 4

I

set. 4(0) $N_k(0)$

K , $K=$

I_3 min I

= , 计算出的 λ_4 减小，灵敏度 I_s

en. 4(0)

K 升高；同理 (1) (1, 1) 2

$N_k(0)$

K , $K=$

min I

增大，因此根据 (1) (1, 1) 2

I

set. 2(0) $N_k(0)$

K , $K=$

I_3 min I

= 计算出的 λ_2 减小，灵敏

度 I_s

en. 2(0)

K 升高， (1) (1, 1) 3

$M_k(0)$

K , $K=$

min I

减小，因此根据 (1) (1, 1) 3

I

set. 3(0) $M_k(0)$

$K, K =$
 $I_3 \min I$
 $=$, 计算出
 的 λ_3 减小, 灵敏度 I_s
 $\text{en. } 3(0)$
 K 降低。

因此得出结论, 对于线路零序电流 I 段, 中性点串入电阻后, 整定值应该随着该处实际测量零序电流的变化趋势进行调整, 处于接入侧正方向的零序电流 I 段减小整定值, 处于非接入侧正方向的零序电流 I 段增大整定值; 如果不改变整定值, 其电流 I 段灵敏度会发生与实际测量零序电流的变化趋势相同的变化, 即处于接入侧正方向的零序电流 I 段灵敏度降低, 处于非接入侧灵敏度升高。

(2) 对线路零序 II 段的影响根据公式 (1) (1, 1)

$II \ II \ I$
 $\text{set. } 1(0) \ \text{rel} \ \text{rel} \ M_k(0)$

$K, K=1$
 $I \ K \ K_3 \ \max \ I$
 $=$ 和 (1) (1, 1)

$II \ II \ I$
 $\text{set. } 4(0) \ \text{rel} \ \text{rel} \ N_k(0)$

$K, K=0$
 $I \ K \ K_3 \ \max \ I$
 $=$, M 侧接入限流电阻后
 (1) (1, 1) $M_k(0)$

$K, K=1$
 $\max \ I$
 减小,
 (1) (1, 1) $N_k(0)$

$K, K=0$
 $\max \ I$
 增大, 因此相应 M、N 两侧的
 整定值 II_s

$\text{et. } 1(0)$
 I 和 II_s
 $\text{et. } 4(0)$

I 应该分别减小和增大。
 如果整定值无变化, 根据灵敏度计算公式,
 (1) (1, 1) $M_k(0) \ 1$

$K, K=2$
 $\min \ I$
 减小, 因此灵敏度
 II

$\text{sen. } 1(0)$
 K 降低,
 (1) (1, 1) $N_k(0) \ 1$

$K, K=2$
 $\min \ I$
 增大, 因此灵敏度 I_s
 $\text{en. } 4(0)$
 K 升高。

因此对于零序 II 段也有类似零序 I 段的结论。

(3) 对线路零序 III 段的影响根据零序 III 段的整定值计算公式, 正序电流分配系数 CM (1) 和 C

$N(1)$ 以及三相短路电流 $I(3) \ k$ 均不受零序拓扑变化的影响, 因此整定值不会受到影响。

但是由于灵敏度校验所用公式的分子与零序 II 段相同, 因此灵敏度变化规律与零序 II 段不改变整定值的情况相同。

(4) 对线路零序 IV 段的影响 36

根据零序 IV 段的整定值计算公式, 最大负荷电流 IM
 L_{\max} 和 I

NL_{\max} 均不受零序拓扑变化的影响, 因此整定值也不会受到影响。

(5) 对线路零序方向元件阻抗角判定的影响零序方向元件是以阻抗角为灵敏度, 阻抗角 $\pm 90^\circ$ 作为正方向动作区。因此可以根据式 (3-15), 直接写出 M 侧接入限流电阻后 1 处的灵敏角和正方向动作区。

灵敏角表示为 () 1
 $\text{sen. } 1(0)$

M 0 3

90 tan

R

X

== - - , 正方向动作方程为 () ()

1Mk(0) 1

0Mk(0) 0M M 33 3

180 tan arg tan 3

RU

IX X

- -R- - -。但是注意到一般 R 很小, 所以采用

原动作方程M

k(0)

Mk(0) 3

180 arg 0 3

U

I -

날

, 也是基本不会判别失误的。

由于此时线路又变成两段, 对于 3 处, 其灵敏角表示为 () 1

sen. 3(0)

M 0 () 1 3

90 tan 1 2

R

X lx - = - - +

, 可以看到也发生了滞后, 但是其滞后角度相比

1 处更小; 对于 2 处, 灵敏角无变化仍为-90°。

对于 N 侧灵敏角和动作方程不变。

(6) 对线路零序方向元件开启电压的影响

此外还需注意零序方向元件的开启条件, 即测量电压M

k(0)

3U 和N

k(0)

3U 不能低

于最低门槛(0.5~1V)的要求, 否则零序电压元件不开放。根据表 3-3 可知时, M、N

侧电压均会升高, 不存在死区问题。

总结: ① 中性点接入电阻型偏磁治理装置后, 对接入侧和非接入侧正方向上的零序 I~II 段的整定值和零序 I~III 段的灵敏度有影响, 具体影响是: 如果不改变整定值, 接入侧灵敏度降低, 非接入侧升高。因此接入侧的保护整定值应该减小,

非接入侧增大; ② 中性点接入电阻型偏磁治理装置后, 主要影响处于接入侧正方向上的零序方向元件的灵敏角和动作区, 使它们均滞后, 且距离接入位置电气距离越大滞后的角度越小, 而对零序方向元件的开启电压条件无影响。

3.3.3 变压器中性点零序保护的影响分析与变压器中性点零序保护相关的零序电量变化情况如表 3-4 所示。

(1) 对变压器中性点零序 I 段的影响由表 3-4 可知 M 侧接入限流电阻后

(1) (1, 1)Mk(0)

K, K=0.5

max I

减小,

(1) (1, 1)Nk(0)

K, K=0.5

max I

增大,

根据式(2-8), 相应 M、N 两侧的变压器中性点零序保护的整定值Is

et. TM(0)

I 和Is

et. TN(0)

I 应 37

该分别减小和增大。因此由于中性点零序 I 段需与相邻线路的零序 I 段配合, 其整定值也需要按照线路零序 I 段的调整趋势进行相同的调整。

表 3-4 电阻型偏磁治理装置接入前后变压器零序电量变化情况名称变化情况

接入侧

M 主变中性点电流同 M 点零序测量电流, 幅值减小M 主变中性点电位从 0 开始幅值增大, 相角滞后于短路点故障前相位

非接入侧

N 主变中性点电流同 N 点零序测量电流，幅值增大N 主变中性点电位保持 0 不变

(2) 对变压器中性点零序 II 段的影响

根据式(2-9)，中性点零序 II 段整定值 I_{Is}

et. $T_M(0)$

I 和 I_{Is}

et. $T_N(0)$

I 需与相邻线路的后备保护

(如零序 III 段)配合，根据 3.3.3 的分析由于线路零序 III 段整定值是不受影响的，因此中性点零序 II 段整定值也不受影响。

(3) 对变压器中性点零序电压保护的影响变压器中性点零序电压保护一般安装于不接地低电压等级系统的中性点上，不再进行讨论。

总结：中性点接入电阻型偏磁治理装置后，变压器中性点零序 I 段按照它下一级零序 I 段的调整进行相同调整，变压器中性点零序 II 段无影响。

3.3.4 复杂系统零序保护的影响分析

(1) 辐射型线路前一小节主要讨论的是，两端系统中一端接入电阻型偏磁治理装置的情形，现在扩展到多段线路组成的辐射型线路。根据对变压器的零序等效电路的分析可知，

某线路想要计入零序网络的必要条件是其两端连接的变压器绕组均为 Y0 接法，此时才能为零序电流在这条线路上流通提供路径。而 Y0 中性点串入电阻型偏磁治理装置，即相当于在线路上串联电阻，具体形式有：

① 双绕组普通变压器，一端为 Y0 连接，在其中性点串入电阻型偏磁治理装置

$x_n = -jR$ 后，在零序等效电路(折合至高压侧，后同)中体现为变压器零序阻抗(高压侧)

串联 $3x_n$ 。

② 双绕组普通变压器，两端为 Y0 连接，在两中性点各自串入电阻型偏磁治理

装置 x_n

H和 x

n_L 后，在零序等效电路中体现为变压器零序阻抗(高压侧+低压侧)串联

$3(x_n$

$H+k2x$

$n_L)$ 。

③ 双绕组普通变压器，两端为 Y0 连接，将两中性点汇聚后共同串入电阻型偏磁治理装置 x_n ，在零序等效电路中体现为变压器零序阻抗(高压侧+低压侧)串联

$3(1-k)2x_n$ 。

④ 双绕组自耦变压器，在低压绕组串入电阻型偏磁治理装置 x_n ，在零序等效

电路中体现为变压器零序阻抗(高压侧+低压侧)串联 $3(1-k_a)2x_n$ 。

n。

⑤ 三绕组自耦变压器，在低压绕组串入电阻型偏磁治理装置 x_n ，在零序等效

电路中体现为变压器高压绕组零序阻抗串联 $3(1-k_a)x_n$ ，

变压器中压绕组零序阻抗串

联 $3k_a(k$

$a-1)x_n$ ，

变压器励磁(低压)绕组零序阻抗串联 $3k$

$a x_n$ 。

根据图 3-4 此三绕组自耦

变压器零序等效阻抗可以计算为：

$T(0) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} M(0) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

$T(0) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} n \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} n M(0) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} n$

$T(0)$

$I \ 0 \ II \ 0 \ II \ 0 \ III \ 0 \ II \ 0$

$I \ 0 \ I \ 0$

$T(0)$

$I \ 0 \ II \ 0 \ III \ II \ 0$

$n \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + [\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}] // (\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix})' \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + 3 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + [\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + 3 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}] // (\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}) , ' , ' ,$

$a \ a \ a$

$a \ a \ a \ a \ a \ a \ a$

a

a

$x \ x \ k \ x \ k \ k \ x \ x$

$x \ x \ k \ x \ k \ k \ x \ k \ k \ x \ x \ k \ x$

$x \ x \ x \ jR$

$x \ k \ x$

$x \ k \ x = + \ - \ - \ + = + \ - \ - \ - \ - \ + \ + = - \ + \ + (3-16)$

式中 x_M

(0)为中压绕组外接的等效零序阻抗。

总之，除了三绕组自耦变以外的所有变压器中性点串电阻型偏磁治理装置，都可以在零序电路中用变压器零序阻抗串电抗 $x_n = -jR$ 表示，如果仅有单侧绕组接入，

则体现为 $3x_n$ ，如果有两侧绕组接入，则表示为 $3x_n$ 乘以一个跟变比相关的系数。

在多段的辐射型拓扑中不包含环，也就是说任何短路点都能将系统分解为短路点左侧和右侧两部分。可以用混联树形支路对半边系统进行等效，图 3-7 为半边零

序等效电路，每个端点都存在变压器，连线代表线路。

A
I
DCB
E
F
G
H
K(1)
, KJ(1, 1)
L

图 3-7 多段辐射型的半边等效支路图 3-7 中 A 为⑤型，为扩展变压器，AJ 为其励磁支路，B、C、D、F、H 为②~④型，也为扩展变压器，E、G、I 为①型，为边界变压器。对于①~④型，中性点串入电阻 x_n ，所在支路零序阻抗增大；对于⑤型，中性点串入 x_n ，所连接的三个支路 AJ、AC、AB 零序阻抗都有所变化，根据串并联规则和式(3-16)，K 点左侧系统的总阻抗增大。因此无论左边任意变压器中性点串入电阻，都会使左边的总零序等效阻抗 $Z_L \Sigma$

(0)进一步增大。

类似两端系统，左右两侧的电流计算结果如式(3-17)所示，继而结论可以推广到全网：

无论在左右两侧哪一边的任意一台接地变压器中性点串电阻，都会使接入侧总等效零序阻抗增大。根据分流效应，在零序网络中，从短路点流向接入侧的总接地短路电流降低，流向非接入侧的总接地短路电流升高，所有跟这台变压器所在支路串联的接入侧支路电流降低，跟这台变压器所在支路并联的接入侧支路电流升高。

各保护安装处的电压变化情况可以根据电流变化情况推出。 39

(1) $R_{(0)k} = R_{(0)} + jX_{(0)k}$

L_k

$L_{(0)} R_{(0)} (1) L_{(0)} R_{(0)} (1) L_{(0)} R_{(0)} L_{(0)} R_{(0)}$

(1) $L_{(0)k} = L_{(0)} + jX_{(0)k}$

R_k

$L_{(0)} R_{(0)} (1) L_{(0)} R_{(0)} (1) L_{(0)} R_{(0)} L_{(0)} R_{(0)} (1)$

L_k

Z_Z

$Z_Z Z_Z Z // Z Z (Z Z) Z Z$

Z_Z

$Z_Z Z_Z Z // Z Z (Z Z) Z Z$

E E

I

E E

I

I

$= + + + + = + + + +$

$k_{OR(0),1}$

(1) $L_{(0)} R_{(0)} L_{(0)} R_{(0)}$

$k_{OR(0),1,1}$

R_k

(1) $L_{(0)} R_{(0)} L_{(0)} R_{(0)}$

Z

$Z (Z Z) Z Z$

Z

$Z (Z Z) Z Z$

E

E

I

$= + + = + +$

$\exists \exists (3-17)$

例如在图 3-7 中 F 变压器中性点接入电阻 $x_n = -jR$ ，则发生不对称故障时，所在支路 GF 零序电流相比不串电阻之前降低，两条与其并联的支路 ED、IH 零序电流

升高，左侧总零序电流 I_L

k降低，右侧总零序电流 I

Rk升高。

如果多个节点接入多个中性点偏磁治理装置，则需要对零序网络进行节点电压计算，然后比较接入前后支路零序电流和节点零序电压变化情况，再对相应保护的整定值进行修改。

(2) 环网为简化问题难度，设计网络为三端环网，示意图如图 3-8 所示，此时不能以短路点为分割将各系统分成两部分，但可以简单分析某些线路上零序电量变化情况。

K(1)

, K(1, 1)

A B

C

图 3-8 三端环网示意图图 3-9 左图为图 3-8 对应的零序等效电路。利用极端情况分析，令 λ 取 0 即把短路点固定在某一端，然后进行 YD 变换，如图 3-9 右图所示，图中 $1\Sigma=1A$

B+1

AC+1

BC。

此时可以以短路点为界将系统分为两部分并应用前一小节对多段线路的辐射型线路的结论。由于变压器 ABC 所在的支路是并联关系，在分流效应下，当某一

变压器中性点串电阻时，该支路零序阻抗增大，零序电流减小，对应端点零序电压增大，其他两站点零序电流增大，对应各自端点零序电压增大。可以预见，当多个站点加装偏磁治理装置时，对于变压器支路的作用效果是满足叠加定理的。 40

k(0)

U

$h\tilde{n}\tilde{N}ZA$

(0)Z

B(0)

ZC(0)

$\gamma(1-\lambda)1A$

Bz(1)

$\gamma\lambda 1A$

Bz(1)

$\gamma 1A$

Cz(1)

$\gamma 1B$

Cz(1)

k(0)

U

$h\tilde{n}\tilde{N}ZA$

(0)Z

B(0)

ZC(0)

$\gamma 1A$

C1

BCz

(1)/1Σ

$\gamma 1A$

B1

BCz

(1)/1Σ

$\gamma 1A$

B1

ACz

(1)/1Σ图 3-9 三端环网零序等效电路但是具体环网内部的线路零序电流如何变化，取决于偏磁治理装置的安装位置和短路点的位置，需要通过计算获得。

3.4 本章小结为详细分析偏磁治理装置对零序保护的影响，本章建立了系统元件的数学模型，并该模型基础上得出不同网络下零序电流的数学表示。主要内容是：

(1)对系统中线路、变压器和电阻型偏磁治理装置的零序等效电路进行建模，着重分析了变压器在不同绕组连接方式和中性点接地方式下的零序等效电路，总结了数学表示之间的差异性和相似性；

(2)根据工程实际，提出简化数学模型的思路，建立两端电网计算模型，计算了

一端接入电阻型偏磁治理装置后，不对称故障下零序电量表达式，分析了零序保护相关量的变化规律，定性分析了线路零序保护、零序方向元件和变压器中性点零序电流保护中整定值和灵敏度受影响的程度；

(3)补充考虑辐射型网络和环网的不同网络结构中，某台变压器串接偏磁治理装置后，网络中部分节点或者支路零序电流和电压的变化情况。 41

第 4 章电阻型偏磁治理装置对零序保护的影响计算

4.1 治理装置参数选取原则本节分析电阻型偏磁治理装置的工程参数确定原则，并为下一节实际仿真提供数据参考。

4.1.1 电阻的选取原则电阻型偏磁治理装置的核心是其内部限流电阻，它对于整体装置的安全性能、结构尺寸、内盒的布线形式具有很重要的决定作用。在 2.2.2 小节中我们已经说过，

采用电阻接地，阻值根据限流的具体要求来选取，不需要太大，但为了保证其可靠性，需要采用韧性高、强度大的合金材料来制作。

确定电阻结构的准则是使其能够在任何时候(不对称运行、故障、过电压等)承受变压器中性点带来的电流冲击，因为大电流冲击下，不仅有热能产生，电阻也会受到机械应力的作用而发生形变，因此要求限流电阻的结构形式具有一定的动稳定性和热稳定性裕度，以保护其在电流冲击下不发生熔断、形变等物理损坏。由于电阻一般由若干电阻片通过一定串并联组成，因此问题就转化为，每个电阻片是否能够承受发生故障时或者过电压时的最大电流冲击。

《GBT 1094.23-2019 电力变压器第 23 部分:直流偏磁治理装置》规定，变压器直流偏磁需要耐受的热稳定电流不高于 10kA(rms)/s，与之对应的动稳定电流为

15kA(pp)/s。因此可以采用此参数对选取的单个电阻片进行冲击校验，判断是否满足

足动热稳定性要求，再根据整体的阻值要求，确定串并联形式。

在经过热稳定校验后，限流电阻的最大流经电流为 10kA，如果其电阻为 R，则偏磁治理装置的绝缘电压等级(即为变压器中性点绝缘电压等级)Un

max满足
Un
max≥10R，由于此电压等级也按照电力行业标准来制定，与电力系统电压等级基本相同。按照 DL/T 559-94 和 DL/T 584-95 分级绝缘的原则，，一般 220kV 交流系统，

采用的绝缘电压等级一般选为 Un
max=110kV，此时 R≤11Ω。对于 110kV 和 500kV 的交流系统，绝缘电压等级一般均选为 Un
max=66kV，此时 R≤6Ω。

4.1.2 旁路系统设计根据图 2-4，限流电阻需要配置旁路系统，旁路系统由旁路开关和石墨间隙组成，还需要一同配置限流电阻和石墨间隙的进出线套管以及支撑绝缘子。

绝缘子为防污型的且电压等级 Un
max，能够对装置内的所有一次设备即电阻以 42 及其旁路系统进行支撑；旁路开关采用额定电压为 Un

max的真空接触器；由于矩形截面的石墨电极具有优良的导电和流通能力和较大的放电面积，能有效通过大电流，提高石墨间隙的使用寿命同时保护电阻不被熔断，石墨间隙应该采用这种形式，

为了能起到保护作用，其工频击穿电压应小于电阻两端能承受的最大电压，且其通流能力应和电阻相匹配，设置其间隙击穿电压小于 Un

max；由于电阻的散热效应，
整体装置应该采用上进下出的进出线方式，进线端采用电压等级 Un
max的穿墙套管，

由于电阻出线端直接接地，可采用比 Un
max低一级的低压套管，例如 U

nmax=35kV，
此时选择 10kV。

4.1.3 总体标准在合理选择装置各部分参数并拼装完成整套装置后，需要对其按照出厂标准设计最后校验方案，标准参考国网公司颁布的《Q/GDW 11518.2-2016 电力变压器中性点电容隔离/电阻限流装置试验规程第二部分:电阻型限流装置》行业标准，如表

4-1 所示[57]，其中重点测试项目有：

- ① 对装置内的限流电阻阻值进行测量，看是否满足为预设阻值 R 的要求，考虑到裕度，偏差不应该超过±5%R；
- ② 确认装置内各种绝缘体的耐压是否为 Un
max；
- ③ 确认石墨间隙的击穿电压是否小于 Un
max，是否具有良好的导流能力。

表 4-1 电阻型偏磁治理装置出厂技术标准序号名称单位标准

1	限流电阻误差	%	±5
2	绝缘电阻	MΩ	≥2.5×10 ³
3	电阻对外壳工频耐压	kV	由绝缘等级决定
4	雷击耐压	kV	由绝缘等级决定
5	CT 传变误差	%	≤±5
6	电阻长期温升	K	<385
7	石墨间隙通流能力	kA	10(rms)
8	电阻	6kA(rms)/1s	热稳定温升 K <800
9	电阻	20kA(pp)/0.2s	动稳定能力 / 不损坏电阻
10	装置防水防尘等级		/ IP23

在进行完整套装置的出厂校验后，其应该满足的特性为：

- ① 功能完善，具有优良防尘防水能力；
- ② 装置内部阻值可以固定为 R，也可以设置多个抽头，实现换挡，能够有效抑制直流偏磁的功能；
- ③ 进出线方式为上进下出，内部设有散射和温控设备，能适应低温、高温和潮湿等不良气候；
- ④ 装置投入系统后有限流状态和直接接地状态两种工作状态，处于限流状态 43 时旁路开关断开，变压器中性点经过电阻接地；处于直接接地状态时旁路开关闭合，变压器中性点直接接地。

指 标	
疑似剽窃文字表述	
<div>1. 限流电阻需要配置旁路系统，旁路系统由旁路开关和石墨间隙组成，还需要一同配置限流电阻和石墨间隙的进出线套管</div> <div>2. 电阻不被熔断，石墨间隙应该采用这种形式，为了能起到保护作用，其工频击穿电压应小于电阻两端能承受的最大电压，且其通流能力应和电阻相匹配，</div> <div>3. 装置应该采用上进下出的进出线方式，进线端采用电压等级 U_{nmax} 的穿墙套管，由于电阻出线端直接接地，可采用比 U_{nmax} 低一级的低压套管，</div>	
6. 013_第6部分	总字数：12611
相似文献列表	
去除本人文献复制比：0%(0)	文字复制比：0%(0) 疑似剽窃观点：(0)
原文内容	

4.2 治理装置对零序保护的影响计算

4.2.1 两端系统零序电量仿真计算

(1) 算例参数设置利用 MATLAB/Simulink 搭建了两端网模型，如图 4-1 所示，系统由两个无限大电源，两台变压器和一侧的电阻型偏磁治理装置、两个负荷、四条线路和四个高压母线构成。它们的参数分别如下：

① 两个理想三相电源采用 Y 型不接地绕组的电压源串联三相 RL 阻抗的形式，电源额定电压 10.5kV，频率 50Hz，电压源单相内电阻 0.00529Ω，内电感 0.000140H，左边电源容量为 60MVA，右边的为 40MVA。

② 四条线路统一采用相同 “π” 型集总参数，正序阻抗 $z(1)=r(1)+jx(1)=(0.01273+j0.31218)\Omega/km$ ，零序阻抗 $z(0)=(0.03864+j1.29635)\Omega/km$ 正序电容 $c(1)=12.74\times10^{-9}F/km$ ，零序电容 $c(0)=7.751\times10^{-9}F/km$ 。长度从左到右依次为 5km、80λ km、80(1-λ)km 和 10km，λ 即记录故障发生的位置，可以设置为[0,1]内的任何数。

③ 变压器采用 Y0/d-11 绕组连接方式，其高压侧正序和零序阻抗相等，均为 ZT

$H(1)=Z$

$TH(0)=(1.1713+j46.851)\Omega$ ，励磁阻抗 $R_m=1653.8\Omega$ ，励磁感抗 $L_m=5.264\Omega$ ，变比 10.5/242kV，容量为 100MVA。220kV 交流系统变压器中性点接入电阻阻值一般不超过 5Ω，本文取 10Ω 以下的数值进行故障仿真，即 $R\in[0\Omega, 10\Omega]$ ，在分析对零序保护影响的时候，将 R 固定为 5Ω。

④ 为了使电源供给完接入侧负荷后将容量送到非接入侧，根据左侧电源为 60MVA，右侧为 40MVA，设置左侧负荷有功 20MW，无功 0MW；右侧负荷 60MW，无功 0MW，实现功率在中间线路上的流动。两负荷位于变压器低压母线的出口，额定电压为 10kV。

⑤ 四个 220kV 高压母线，分别编号为 1-4，可以输出其三相电压和电流。

其他重要设置如下：

① 系统整体设置：设置系统采用 ode45 离散型仿真，仿真步长 0.1μs。仿真总时间为 1s，在 0.25s 时，在据左端为 80λ km 处发生 A 相接地或者 A、B 相接地故障。 44

图 4-1 两端系统 Simulink 仿真图

② 接地系统设置：统一在变压器高压侧接地，其中右侧直接接地，左侧通过偏磁治理装置接地，如图中“G”所示结构，能够实现流经中性点电流 3I0和电压U0

的测量。其内部结构如图 4-2 所示：

图 4-2 变压器中性点接地系统仿真图

在装置内存在唯一的使能变量 $E_n=[E$

$n(1), E$

$n(2)]$ ，可以控制 IGBT 的通断，实现

接地方式的切换。当 $E_n=[1, 0]$ 时变压器中性点直接接地， E

$n=[0, 1]$ 时变压器中性点经

阻值为 R 的电阻接地。为了体现出不同阻值的接地装置的效果，设计 R 为 $(0, R_m$

$ax]$

内的变量。

③ 量测系统设置：为了测得系统各节点的故障后，零序电流和零序电压，采用三相值相加的方法，如图 4-3 左图所示，在电流量测系统中，同时测得了三相电流的实际值，并将其相加得到了单相零序值的三倍，即零序电流保护测量值。为了求得故障后的零序有效值进行比较，设计了 4-3 右图所示的量测结构，图中 B_t 为故障气是时间，其功能是：① $0 < t < B_t = 0.25s$ 时，尚未发生故障，此时通过选择开关将输入旁路，输出恒为 0；② $B_t < t < 1s$ 时发生接地故障，此时将零序量输入，采用连续信号的有效值测量模块“CRMS”计算输入的零序量有效值。 45

图 4-3 量测系统仿真图

(2) 两端系统不对称故障仿真首考察系统搭建的是否合理，设置左侧变压器使能端为 $E_n=[1, 0]$ ，即直接接地，

然后取 $\lambda=0.5$ ，观察 80km 线路中点在 0.25s 发生 A 相接地和 A、B 相同时接地时，

系统在 1s 内电流和电压的变化情况。

图 4-4 和图 4-5 分别为发生 A 相接地时的短路点、母线 1 和母线 2 处的三相电流、电压曲线。

两图中 I_k

abc 和 U

kabc 分别代表短路点的入地电流和对地电压， I

$1kabc$ 和 U

$1kabc$ 代表

母线 1 处(左侧)的测量三相电流和电压幅值， I_4

kabc 和 U

$4kabc$ 代表母线 4 处(右侧)的测

量三相电流和电压。从两图中可以看出，故障前短路点三相入地电流为 0，故障电

压为正常运行电压。发生故障后短路点、1 和 4 处 A 相电流迅速增大，同时短路点 A 相电压降为 0；B、C 两相短路点入地电流始终为 0，因此 1、4 处的 B、C 两相电流在故障后保持反相。上述结论均与单相接地系统的短路特征一致。

图 4-4 左侧中性点直接接地且 A 相接地时电流变化波形图 4-5 左侧中性点直接接地且 A 相接地时电压变化波形 46

图 4-6 和图 4-7 分别为发生 A、B 相同时接地时的短路点、1、4 处的三相电流、

电压曲线。

图 4-6 左侧中性点直接接地且 A、B 相接地时电流变化波形图 4-7 左侧中性点直接接地且 A、B 相接地时电压变化波形从两图中可以看出，故障前三相短路点入地电流为 0，故障电压为正常运行电压。发生故障后三处的 A、B 故障电流迅速增大，且各自满足 1 处与 4 处之和与短路点入地电流相等，A、B 两相电压下降为零，仅留有 C 相有残压，同时在这两边电源的共同作用下，1、4 两处的 A、B 相电流基本同相，B、C 电压反相。满足两相接地系统的故障特征。

上述分析充分表明所搭建系统及相应参数设置是合理的。

(3) 治理装置接入后的不同情况下的零序电量仿真

① 不同阻值进一步计算串入不同阻值的电阻后的零序电压和零序电流分布情况。

仍设置 AB 两相短路接地，并设置左侧变压器使能端为 $E_n=[0, 1]$ ，将电阻串入，

设 R 从 0Ω 变化至 10Ω 以 1Ω 为间隔，测量短路点电流、1、4 两处零序电流和零序 47

电压、左侧变压器的中性点电压，并统计它们的有效值，结果如表 4-2 所示。

表 4-2 不同阻值的电阻串入后零序电量变化情况

R/Ω	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$3I_k$											
(0)/A	444.10	443.97	443.77	443.67	443.34	443.16	442.98	442.81	442.66	442.51	442.38
$3U_k$											
(0)/kV	31.07	31.06	31.05	31.04	31.04	31.04	31.04	31.04	31.04	31.04	31.04
$3I_1$											
$k(0)=3I$											
$Mk(0)/A$	222.05	221.87	221.58	221.37	220.89	220.49	220.12	219.70	219.24	218.73	217.79
$3U_M$											
$k(0)/kV$	10.41	10.44	10.50	10.61	10.75	10.93	11.14	11.39	11.66	11.96	12.26
$3I_4$											
$k(0)=3I$											
$Nk(0)/A$	222.05	222.15	222.38	222.85	223.25	223.92	224.83	225.87	227.04	228.34	229.36
$3U_N$											
$k(0)/kV$	10.41	10.41	10.42	10.44	10.46	10.49	10.54	10.59	10.64	10.70	10.75
U_n/V	0	130.71	230.14	309.89	376.14	432.57	481.57	524.78	563.35	598.12	629.75

按照表 4-2 的内容做出了折线图，图 4-8 所示。图中清晰地反映了这些与零序保护相关的零序量的变化趋势。

图 4-8 AB 相同时接地时接入不同阻值电阻零序电量变化统计图图中上述零序电量的变化趋势，与表 3-3 和表 3-4 关于“接入侧零序电流”、“接入侧零序电压”、“非接入侧零序电流”、“非接入侧零序电压”以及“变压器中性点电压”的变化趋势是一致的。说明了 3.3.1 小节理论分析的正确性。

此外从图中还可以发现：

- i. 系统短路点短路电流和短路电压基本不变化，这是因为正序阻抗较大或者串联电阻对包括正序、零序在内的总阻抗影响较小的缘故。
- ii. 串入数值变化的电阻，虽然各零序量有增减的趋势，但是接入侧的零序电流、零序电压、变压器的中性点电压相对于自身的变化幅度是较大的，而非接入侧的零序电流和电压，随着电阻阻值的增大自身变化幅度不是很大。
- iii. 本算例参数设置下短路电流并不大，因此中性点电压均未越限，但考虑到 48 复杂的工况以及实际情况，后文将中性点串电阻阻值设为 5Ω 。

② 不同故障位置按照图 2-1，认为 M、O、N 点分别对应 $\lambda=0$ 、0.5 和 1，即将线路分成等长的两段，以下仍以“1~6 处”指代保护的安装位置(5、6 处为图 4-1 变压器中性点保护安装处)，此时将 R 取为固定值 5Ω ，再分别取 $\lambda=0$ 、0.5 和 1，在三种情况下，分别进行直接接地、串电阻两种情况下仿真，测量的参数为 1 和 4 处母线的 3 倍零序电压、3 倍零序电流以及它们的相位差，此时已经默认流过变压器中性点的电流就是其下一级线路母线零序电流的 3 倍。

λ 分别等于 0、0.5 和 1 时左侧变压器直接接地和经 5Ω 电阻接地的 K(1)和 K(1,1)

仿真结果如表 4-3 所示。

表 4-3 线路首段、中点和末端故障时各零序量的变化情况A 相接地 $\lambda=0$ $\lambda=0.5$ $\lambda=1$

直接接地串电阻 $R=5\Omega$ 直接接地串电阻 $R=5\Omega$ 直接接地串电阻 $R=5\Omega$

3Ik

(0)/A 399.26 399.20 396.08 396.02 397.07 397.01

3IM

k(0)/A 304.50 302.96 198.04 197.03 94.24 93.75

3UM

k(0)/k V 14.28 15.02 9.28 9.77 4.42 4.65

UM

k(0)

与 IM

k(0)

相位差/rad -1.596 -1.903 -1.596 -1.903 -1.596 -1.903

3IN

k(0)/A 94.76 99.69 198.04 200.11 302.83 303.63

3UN

k(0)/k V 4.44 4.67 9.28 9.38 14.19 14.23

A、B 相接地 $\lambda=0$ $\lambda=0.5$ $\lambda=1$

直接接地串电阻 $R=5\Omega$ 直接接地串电阻 $R=5\Omega$ 直接接地串电阻 $R=5\Omega$

3Ik

(0)/A 457.93 454.76 444.10 445.04 455.17 455.02

3IM

k(0)/A 349.26 345.13 222.05 220.49 108.02 107.45

3UM

k(0)/k V 16.37 17.11 10.41 10.93 5.06 5.33

UM

k(0)

与 IM

k(0)

相位差/rad -1.596 -1.903 -1.596 -1.903 -1.596 -1.903

3IN

k(0)/A 108.67 113.57 222.05 223.92 347.15 348.00

3UN

k(0)/k V 5.09 5.32 10.41 10.49 16.27 16.31

4.2.2 对线路零序保护影响计算根据 3.3.2 小节分析，判断以下零序保护在电阻型偏磁治理装置接入后是否需要重新整定：
① 1、4 处的线路零序 I、II 段以及 2、3 处的零序 I 段是否需要重新整定，灵敏度是否满足要求。零序 II 段与下一级线路的零序 I 段相配合，如果下一

级线路零序 I 段不需要整定，本线路零序 II 段也无变化；② 1 处的零序方向元件的动作方程是否需要变化，零序方向元件是否能在区内不对称故障发生时正常开放。

计算相位差可以用锁相环实现，锁相环的结构如图 4-9 所示，可以分别提取母线 1 处的零序电压和电流的相位再进一步求差得到相位差。 49

图 4-9 母线 1 处零序电压与电流相角差的锁相环结构示意图

(1) 直接接地情况下线路零序电流保护原始整定值计算为了分析继电保护是否需要重新整定，需要先计算原有整定值，此时左侧变压器是直接接地的。首先计算 1 和 4 处线路零序 I、II 段、2、3 处线路零序 I 段的整

定值，设线路零序I段的可靠系数为 $K_{I\ r}$

$e_{l.1}$

$=1.25$ ，线路零序 II 段的可靠系数为 $K_{II\ r}$

$e_{l.1} = 1.15$ 。

则根据表 4-3， $\lambda=0.5$ 时，流过 4 处的最大短路电流为两相接地时的 222.05A，流过

1 处的最大短路电流也为 222.05A，因此 1 处和 4 处的零序 I 段整定值均相同为：(1) (1, 1) (1) (1, 1)

I I

set.1(0) rel.1 Mk(0)

$K, K=0.5$

I I

set.4(0) rel.1 Nk(0)

$K, K=0.5$

A

$\max 1.25 \max\{128.04 \ 222.3, \} 277.56A$

$3 \max 277.56$

I K I05

I K I = = = = =

同理可以计算得到 2、3 处的零序 I 段整定值：(1) (1, 1) (1) (1, 1)

I I

set.2(0) rel.1 Nk(0)

$K, K=0$

I I

set.3(0) rel.1 Mk(0)

$K, K=1$

$3 \max 1.25 \max\{, \} 135.84A$

$3 \max 1.25 \max\{94.24, \} 135.03A \ 94.76 \ 108.67 \ 108.02$

I K I

I K I = = = = =

继而得到 1、4 处的零序 II 段整定值：

II II I

set.1(0) rel.1 set.3(0)

II II I

set.4(0) rel.1 set.2(0)

1.15 135.03 155.28A

1.15 135.84 156.22A

I K I

I K I = = = = =

(2) 直接接地情况下线路零序 I、II 段灵敏度分析首先计算 1~4 处接入电阻前后零序 I 段灵敏度，根据表 2-1，需要计算最小短路电流的保护范围，计算式重列如下：(1) (1, 1) 1 (1) (1, 1) 2 (1) (1, 1) 3 (1) (1, 1) 4

I

set.1(0) Mk(0) IK

, $K=$

sen.1(0) 1

I

I

set.2(0) Nk(0)

$K, K= \text{sen.2(0)} \ 2$

I

sen.3set.3(0) Mk(0)

$K, K=$

I

set.4(0) Nk(0)

$K, K=$

$3 \min 2$

$3 \min 2(0.5)$

$3 \min$

$3 \min$

I I

K

I IK

I IK

$K_{3344}, 0.5, 0.1, 0.5,$
 $k(0) \quad k(0)$
 $K, K = K_{K, K}$
 $TH(0) \quad () \quad 1 \quad 0.80 \quad 0.5 \quad . \quad 396.58 \quad 2() \quad 0.61 \quad 0.15$
 $3 \min () \quad 6$
 $3 \text{ mi } 851 \quad 80$
 $n \quad 3 \min \quad 277. \quad 2 \quad 6 \quad 1. \quad 96 \quad 2 \quad 4 \quad 5$
 K
 $I \quad I \quad C$
 X
 I
 $X \quad l_x$
 I
 $l_x \quad = \quad = \quad + \quad = \quad = \quad + \quad = \quad - \quad + \quad =$
 $4 \quad I$
 $\text{sen.}4(0) \quad 4 \quad 4 \quad . \quad 396.58 \quad 2(\quad 851 \quad 80 \quad 1.296 \quad 0.88 \quad 2 \quad 46.85 \quad 9 \quad 1 \quad) \quad 0.24 \quad 0. \quad 2 \quad 1 \quad 1 \quad 80 \quad 1. \quad 6$
 $K5 \quad = \quad + \quad = \quad = \quad + \quad -$
 对于 1、4 处的零序 II 段，灵敏度可以计算为： (1) (1,1) (1) (1,1)
 $Mk(0) \quad 1$
 $K, K =$
 $II \quad 2$
 $\text{sen.}1(0) \quad II$
 $\text{set.}1(0)$
 $Nk(0) \quad 1$
 $K, K =$
 $II \quad 2$
 $\text{sen.}4(0) \quad II$
 $\text{set.}4(0)$
 $3 \min$
 $\min\{ , \} \quad 1.28 \quad 1.25 \quad 155.28$
 $3 \min$
 $\min\{ , \} \quad 1.27 \quad 1.25 \quad 198.04 \quad 222.0 \quad . \quad 5 \quad 198.0 \quad 2 \quad 156 \quad 22 \quad 4 \quad 22.05$
 I
 K
 I
 I
 K
 $I \quad = \quad = \quad = \quad = \quad =$

上述计算可以看出，在不接入 5Ω 电阻时，线路零序 I、II 段灵敏度均可以满足要求。

(3) 保持整定值不变接入电阻型偏磁治理装置后线路零序 I、II 段灵敏度分析先保持上一步计算的 6 个整定值不变，重新计算最小短路零序电流： () () (1) (1,1) (1) (1,1)

$k(0)$
 K, K
 $k(0)$
 $K \quad 0, 0.5$
 $, K0.5, 1 \quad 399.20 \quad 396.02 \quad 454.76 \quad 445.04$
 $3 \min ' \quad \min\{ , \} \quad 397.61A \quad 2 \quad 2 \quad 396.02 \quad 397.01 \quad 445.04 \quad 455.02$
 $3 \min ' \quad \min\{ , \} \quad 396.52A \quad 2 \quad 2$
 I
 $I \quad + \quad + \quad = \quad = \quad + \quad + \quad = \quad 51$
 接下来仍要求解 $\lambda_1 \sim \lambda$
 4所满足的方程，并注意到此时零序分支系数需用 C'
 $M(0)$
 和 $C' \quad N$
 (0)替代 () () () () (1) (1,1) (1) (1,1) (1) (1,1) 1
 $ITH(0) \quad (0)$
 $\text{set.}1(0) \quad Mk(0) \quad M \quad (0) \quad k(0) \quad k(0)$
 $K, K = K_{K, K} \quad K_{K, K}$
 $TH(\quad 5 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0, 0. \quad 0, 0 \quad 1 \quad) \quad (0) \quad .5 \quad 1 \quad 1 \quad 2 \quad 46.851$
 $i \quad 80 \quad 1.29$
 $3 \min ' ' \quad () \quad m \quad 6 \quad 1 \quad 2 \quad 46.851 \quad 8 \quad 3 \quad 0 \quad 1.296$

3 in ' 3 m n ' 3 277.56 97.61 15

I
x
I C I I
j
j
X
R
l
X lx - + - = + = = + + - - = (1) (1,1) (1) (1,1) () (1) (1,1) () 2 1 2 2 0

I
sen.1(0)
ITH(0) (0)
set.2(0) Nk(0) N(0) k(0) k(0)
K ,K= K ,K K ,K
T ,0.5 0,0.5 2
H(0) (0) 0 1 1 2 0.24 0.15 3
3 min ' ' () 3 . 2 2 46.851 80 1 3
min ' 3 min ' 135.84 9.2 6

X
x
K
j R
I I C I I
j R
l
l
j
x
X + = = + - = = + - = - () () (1) (1,1) (1) (1,1) (1) (1,1) 3

I
sen.2(0)
ITH(0) (0)
set.3(0) Mk(0) M (0) k(0) k(
K ,K= K ,K K ,K
TH(0) 3 2 2 3 (0. 0) 5,1 5 397.61 2(0.5) 0.63 0.15 15
3 min ' ' (0
) 3 min ' 3 min ' 0.18 2 46.851 8 1.296 3 1 2

K
j
I I C I
l
I
j R
X lx
X x = - = - + = = + = + - - () () (1) (1,1) (1) (1,1) () 4 0

I
sen.3(0)
ITH(0) (0)
set.4(0) Nk(0) N(0) k(0)
K ,K= K ,0 0.5,1 3 3 3 4 4
K .5,1 46.851 80 1.296 1 0.80 0.5 2 46.851 80 1.296 2 135.03 396.52 2() 0.6 0.15 15 3
3 min ' ' () 3 min l'
X lx
K
j
j R
I I C + - + = = = = - - + - = (1) (1,1) () (1) (1,1)
k(0)
K ,K
TH(0 5) (0)

I
 sen.4(0)
 Mk(0
 s 0. ,1
 K ,K
 II
 en.1 4 () 4 0 4
 3 min ' 3 15 277.56 396.5 0 46.851 80 1.296 0.88 2 46.851 80 9 2 2(1) 0.25 .15 15
 3 min ' 1.2 6
 X
 I
 j R
 j
 K
 j
 I
 K
 lx + - - = = - = - = + = + (1) (1,1))1 = 2
 II
 set.1(0)
 Nk(0)1
 K ,K=
 II 2
 sen.4(0) II
 set.4(0)
 min{ , } 1.27 1.25 155.28
 3 min '
 min{ , } 1.28 1.25 197.43 220.49 200. 2 11 223.9 15 2 6.2
 I
 I
 K
 I = = = = =

将步骤(2)、(3)所得结果列写如表 4-4 所示：

表 4-4 灵敏度统计表灵敏度直接接地串电阻 R=5Ω 变化趋势

1 处(接入侧正方向)

零序 I 段 0.25 合格 0.24 合格减小零序 II 段 1.28 合格 1.27 合格减小

2 处(非接入侧正方向) 零序 I 段 0.60 合格 0.63 合格增大

3 处(接入侧正方向) 零序 I 段 0.61 合格 0.60 合格减小

4 处(非接入侧正方向)

零序 I 段 0.24 合格 0.25 合格增大零序 II 段 1.27 合格 1.28 合格增大从表 4-4 中可以看到，在不改变保护整定值的情况下：

① 某处的保护灵敏度会发生与该处实际测量零序电流变化趋势相同的变化；

② 同一零序保护安装处，零序 II 段灵敏度与零序 I 段灵敏度的变化趋势相同。

③ 本算例中，在接入阻值为 5Ω 时对线路零序保护的影响不大，仅限于灵敏度变化，因此可以推测当接入阻值大于 5Ω 时，需要对灵敏度不合格的线路零序保护进行重新整定，表中 1 处零序 I、II 段有灵敏度小于阈值(分别为 0.15、1.25)的风险， 52

2 处零序 I 段有过于灵敏(灵敏度大于 1)的风险。一般来说，总是接地侧的相邻线路

(本算例中即线路 M0)接入电阻型偏磁抑制装置后线路零序保护灵敏度不合格的风险最大，接地侧正方向的保护有灵敏度不足的风险，非接地侧正方向上的保护有过于灵敏的误动风险。

(4) 线路零序方向元件开启电压和动作方程分析

由表 4-3 可知，在任何情况 1 和 4 处的电压 3U₁

k(0)和 3U

4k(0)均为上千数量级，

远大于电压最低门槛 0.5~1V，因此在发生单相和两相接地故障时，零序方向元件一

定会开放，不存在开口死区问题。

直接接地时，由阻抗角可以写出正方向动作区： $180^\circ \pm 180^\circ [1.596, 90^\circ, 1.596, 90^\circ] [181.44^\circ, 1.44^\circ]$

$\pi \pm \pi - - - + = - -$

当串入电阻时，测量阻抗角变为 $-1.903 \times 180^\circ / \pi = -109.04^\circ \in [-181.44^\circ, -1.44^\circ]$ ，因此故障位置判定不变，不需要对方向元件的动作方程做出修改。由于 3 处比 1 处滞后的角度更小，3 处的动作方程也不需要修改。

4.2.3 对变压器中性点零序保护影响计算根据 3.3.3 小节分析，5、6 处变压器中性点零序 I 段在电阻型偏磁治理装置接入后是否需要重新整定取决于其下一级(分别对应 1、4 两处)的线路零序保护是否需要整定。结合表 4-4 中的结果，M 侧变压

器中性点经过 5Ω 接地后，线路 1-4 处零序保护灵敏度均满足阈值要求，不需要重新整定，因此 5、6 处变压器中性点零序 I

段也无需重新整定，但这里仍给出变压器中性点零序 I 段原始整定值。
对于 5、6 处后的两侧变压器，其中性点零序电流 I 段与下一级线路零序电流 I 段配合，即 5 处变压器中性点零序 I 段与 1 处线路零序 I 段配合，6 处右侧变压器中性点零序 I 段与 4 处线路零序 I 段配合，取变压器可靠系数 KI r
el.T
=1.2，则
I I I
set.TL(0) rel.T set.1(0)
I I I
set.TR(0) rel.T set.4(0)
1.2 277.56 333.07A
333.07A
I K I
I K I = = = =

4.3 仿真分析结论
4.3.1 对线路零序电量和零序保护的影响
4.2.2 小节的计算结果验证了 3.3.1 和 3.3.2 小节的理论分析，从中可以总结出，中性点串电阻型偏磁治理装置后相比直接接地，发生区内不对称故障时：
(1) 接入侧零序电流减小，零序电压增大，方向元件阻抗角滞后，非接入侧零序电流增大，零序电压增大，方向元件阻抗角不变； 53
(2) 如果不对线路零序 I、II 段进行重新整定，接入侧正方向上所有零序 I、II 段的灵敏度均会降低，保护范围缩短，非接入侧正方向上所有零序 I、II 段的灵敏度升高，区外不对称故障且无方向元件时有可能产生误动。

7. 013_第7部分			总字数：3003
相似文献列表			
去除本人文献复制比：0%(0) 文字复制比：0%(0) 疑似剽窃观点：(0)			
原文内容			

其中距离接入变压器相邻的线路上的两处保护(M 变压器串接电阻时 MO 线路的 1、2 处，N 变压器串接电阻时 ON 线路的 3、4 处)受此影响最严重。
(3) 如果接入后接入侧和非接入侧某处零序 I、II 段校验不合格，需采用接入后故障计算的结果进行重新整定。按照零序电量变化规律，接入侧正方向的零序 I、II 段整定值应该减小，非接入侧应该增大。
(4) 接入侧正方向上零序方向元件的灵敏角和动作区均滞后，距离接入变压器电气距离越近，滞后的角度越大。非接入侧灵敏角和动作区无影响。
4.3.2 对变压器中性点零序电量和零序保护的影响
4.2.3 小节的计算结果验证了 3.3.1 和 3.3.3 小节的理论分析，从中可以总结出，中性点串电阻型偏磁治理装置后相比直接接地，发生区内不对称故障时：
在接入阻值为 5Ω 时对变压器零序保护的影响不大，保护灵敏度均满足阈值要求，不需要重新整定。
按照变压器中性点零序 I 段需要与它下一级线路零序 I 段相配合的原则，如果下一级线路的零序 I 段是接入侧的正方向，且灵敏度不足 0.15 时，需要减小线路零序 I 段整定值，进而变压器中性点零序 I 段整定值也随之减小；如果下一级线路的零序 I 段是非接入侧正方向，且灵敏度大于 1 时，需要增大线路零序 I 段整定值，进而变压器中性点零序 I 段整定值也随之增大。
4.4 本章小结本章进行了电阻型偏磁治理装置的工程参数设计和仿真分析与计算，结论为：
(1) 第一小节根据相关出厂标准，分析了限流电阻及其旁路系统的工程参数的选取原则，即应根据实际电压等级选择合适的绝缘等级 Un max。在算例中，由于电压等级为 220kV，中性点绝缘电压等级为 110kV，电阻阻值不应该超过 11Ω。后文通过对 R 从 0Ω 变化至 10Ω 以 1Ω 为间隔进行计算测量短路点电流、线路零序保护安装处零序电流和零序电压、变压器的中性点电压，并统计它们的有效值，说明第三章理论分析的正确性。并在后文中重点选取适用的电阻值 R 为 5Ω 进行算例分析。
(2) 第二小节利用 MATLAB/Simulink 搭建了两端系统，并仿真分析了零序电量在接入偏磁治理装置后发生不对称接地故障时的变化规律，即：接入电阻型偏磁抑制装置后，接入侧零序电流减小，零序电压增大；非接入侧零序电流和零序电压均增大。在此规律的基础上研究了接入后，线路零序 I、II 段、变压器中性点零序 I 54 段整定值以及线路方向元件的影响，结论简单阐述为：
对于线路零序保护的影响为：在接入阻值为 5Ω 及以下时对线路零序保护的影响不大，仅限于灵敏度变化。推测当接入阻值大于 5Ω 时，如果不对线路零序 I、II

段进行重新整定,接入侧正方向上所有零序 I、II 段的灵敏度均会降低,保护范围缩短,非接入侧正方向上所有零序 I、II 段的灵敏度升高,区外不对称故障且无方向元件时有可能产生误动。

对于变压器零序保护的影响为:在接入阻值为 5Ω 及以下时对变压器零序保护的影响不大,保护灵敏度均满足阈值要求,不需要重新整定。但是变压器中性点零序 I 段要与它下级线路零序 I 段配合,需要按照它下一级零序 I 段的接入调整策略进行相应调整。 55

第 5 章总结及展望

5.1 总结本文研究了电阻型偏磁治理装置的接入对接地交流系统零序电压、零序电流等

零序电量变化的影响机理,并进一步分析相关零序保护的受影响程度,利用 MATLAB/Simulink 进行建模仿真,验证了理论分析的正确性。本文的主要工作成果和创新主要体现为以下方面:

(1) 对中性点偏磁抑制基本原理进行了叙述,指出在中性点加装偏磁装置的必要性。然后详细分析了三种偏磁治理装置的组成和工作原理,对它们的综合性能进行了对比。建立了电阻型偏磁治理装置在零序电路中的等效阻抗模型,并简单用电抗 $x_n = -jR$ 表示。对电阻型偏磁治理装置的工程参数进行了分析,根据相关出厂标准,分析了限流电阻及其旁路系统的工程参数的选取原则,即应根据实际电压等级

选择合适的绝缘等级 U_n

max。在算例中,由于电压等级为 220kV,中性点绝缘电压等级为 110kV,电阻阻值选为 5Ω 进行重点计算。

(2) 分析了各种绕组连接和中性点接地方式下变压器的零序等效电路,建立了两端接地交流电网的数学模型,通过详细的理论计算,分析了接入电阻型偏磁治理装置前后,接入侧和非接入侧零序电流、零序电压、变压器中性点电流、方向元件阻抗角等零序保护相关量的变化趋势。并进一步分析了这些电量变化对线路零序电流 I~IV 段、零序方向元件的开启与故障判定、变压器中性点零序电流保护 I、II 段的影响,得出结论是:

对线路零序保护的影响:中性点串电阻型偏磁治理装置后相比直接接地,对接入侧和非接入侧的零序 I、II 段的整定值,应该随着接入后保护安装处的测量零序电流的变化趋势做出同样趋势的重新调整,否则相应的灵敏度也会产生同趋势的变化。对于两端系统,单侧接入后,处于接入侧正方向的零序 I、II 段整定值应该减小,非接入侧应该增大,在接入阻值为 5Ω 及以下时对线路零序保护的影响不大,

仅限于灵敏度变化。推测当接入阻值大于 5Ω 时,如不调整整定值,处于接入侧正方向的零序 I、II 段灵敏度降低,保护范围缩短,非接入侧的零序 I、II 段灵敏度升高,区外不对称故障且无方向元件时有可能产生误动。对零序方向元件的影响主要是接入侧正方向上零序方向元件的灵敏角和动作区,使两者滞后,距离接入点电气距离越大,滞后的角度越小,对开启电压判定无影响。

对变压器中性点零序保护的影响:中性点串电阻型偏磁治理装置后相比直接接地,在接入阻值为 5Ω 及以下时对变压器零序保护的影响不大,保护灵敏度均满足 56

阈值要求,不需要重新整定。在发生区内不对称故障时,中性点零序 I 段需要按照它下一级零序 I 段的接入调整策略进行相应调整。

(3) 利用 MATLAB/Simulink 搭建了两端网模型,通过不对称短路实验验证了模型参数设置的合理性,之后改变串入电阻阻抗数值,测量各种零序电量的变化情况,

验证了理论分析的正确性。最后对接入前后线路零序 I、II 段,变压器中性点零序 I

段的整定值和灵敏度进行了计算,验证了该系统接入电阻型偏磁治理装置对零序方向元件的开启和判定基本没有影响。

5.2 展望本文通过大量的理论分析和仿真手段,对偏磁治理装置接入后对零序保护的影响进行了深入的研究。完成的工作较为粗糙,在本文的研究基础上对后续工作进行展望,以后研究工作将围绕以下领域展开:

(1) 仅建立了两端网模型,对多段辐射型网或者环网等复杂拓扑的模型的分析是浅显的,仿真也没有实现,后续将研究针对复杂拓扑的分析方法。

(2) 对偏磁治理装置的建模进行了简化,没有考虑到旁路系统的投切,将研究更精确的计算模型。在进行网络等效的时候忽略了网络中的部分参数,比如线路电阻、导纳支路等,也忽略了部分元件,应建立更全面的网络等值模型。

(3) 对于零序保护影响的分析,多数是定性的,仅提出了变化趋势,为了取得更多定量成果,进一步发掘零序电量的变化规律是必要的。 57

参考文献

- [1] 辛华.《中国风电发展路线图 2050》[J]. 精细与专用化学品, 2011, (12): 27.
- [2] 国家可再生能源中心. 中国可再生能源展望(2018) [J].
- [3] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 易荣, 何维国. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 39-44.
- [4] 钟文定. 技术磁学. 上册[M]. 2009.
- [5] 黄道春, 魏远航, 钟连宏, 阮江军, 皇甫成. 我国发展特高压直流输电中一些问题的探讨[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 6-12.
- [6] 刘连光, 刘春明, 张冰. 磁暴对我国特高压电网的影响研究[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 1-5.
- [7] 文俊, 刘连光, 项颂, et al. 地磁感应电流对电网安全稳定运行的影响[J]. 电网技术, 2010, v. 34;No. 324(11): 24-30.
- [8] 刘连光, 王开让, 郭世晓, 等. 双电压等级电网 GIC 的相互作用特征[J]. 中国科学. 技术科学, 2015, 45(12): 1311-1320.
- [9] 郑涛, 卢婷, 杨国生, 刘连光. GIC 引发直流偏磁对距离保护 III 段动作性能影响的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(02): 1-5.
- [10] 刘连光, 张天, 张述铭, 王泽忠. 1000kV 特高压变压器的 GIC 无功效应分析[J]. 电网技术, 2019, 43(05): 1593-1598.
- [11] 刘连光, 陈剑, 王茂海, 刘春明. 采用变压器量测无功分析 GIC-Q 扰动的方法[J]. 电网技术, 2018, 42(04): 1157-1163.
- [12] Kappaenman J G, Albertson V D. Bracing for the geomagnetic storms[J]. IEEE

Spectrum, 1990, 27(3): 27-33.

[13] Wik M., Pirjola R., Lundstedt H., et al. Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems[J]. Annales Geophysicae, 2009, 27: 1775-1787

[14] Bolduc L, Granger M, Pare G, et al. Development of a DC current-blocking device for transformer neutrals[J]. IEEE Trans on Power System, 2005, 20(1): 163-168.

[15] Pirjola R. Fundamentals about the flow of geomagnetically induced currents in a power system applicable to estimating space weather and designing remedies[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2002(64): 1967-1972.

[16] Kappenman J G, Norr S R, Sweezy G A, et al. GIC mitigation: a neutral blocking/bypass device to prevent the flow of GIC in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(3):1271-1281. 58

[17] Pirjola R. Averages of geomagnetically induced currents (GIC) in the Finnish 400 kV electric power transmission system and the effect of neutral point reactors on GIC[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2005, 67(7):701-708.

[18] Erinmez, I.A., Kappenman, J.G., Radasky, W.A., 2002. Management of the geomagnetically induced current risks on the national grid company's electric power transmission system[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 64 (5 - 6), 743 - 756.

[19] Park Y W , Lee E S . Geomagnetic disturbance effects on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3):1206-1216.

[20] 蒯狄正, 刘成民, 万达. 直流偏磁对变压器影响的研究[J]. 江苏电机工程, 2004, 23(3).

[21] 王振浩, 佟昕, 齐伟夫. 电容隔直可控开断桥法抑制变压器直流偏磁[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10):120-126.

[22] 刘连光, 刘春明, 张冰, et al. 中国广东电网的几次强磁暴影响事件[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4).

[23] BOTELER, D. H . Geomagnetic hazards to conducting networks[J]. Natural Hazards, 2003, 28(2-3):537-561.

[24] Meliopoulos A P S, Christoforidis G. Effects of DC ground electrode on converter transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 4(2):995-1002.

[25] Kappenman J G, Norr S R, Sweezy G A, et al. GIC mitigation: a neutral blocking/bypass device to prevent the flow of GIC in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(3):1271-1281.

[26] Kappenman J G . Geomagnetic Storms and Their Impact on Power Systems[J]. 1996.

[27] Wik M , Viljanen A , Pirjola R , et al. Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden[J]. Space Weather: The International Journal of Research and Applications, 2008, 6(7).

[28] 郑涛, 卢婷, 杨国生, et al. GIC 引发直流偏磁对距离保护Ⅲ段动作性能影响的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015(2):1-5.

[29] 文习山, 郭婷婷, 何智强, et al. 直流偏磁相关问题研究综述[J]. 高压电器, 2016(6):1-8.

[30] 于永军, 杨琪, 侯志远, 文习山, 祁晓笑, 王亮. 天中直流工程入地电流对新疆哈密地区交流电网的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(08):2298-2303.

[31] 潘卓洪, 张露, 谭波, et al. 水平层状土壤接地问题的理论推导与数值分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(4).

[32] 刘曲, 李立涅, 郑健超. 复合土壤模型下 HVDC 系统单极大地运行时的电流分布[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36):8-13. 59

[33] 潘卓洪, 张露, 谭波, et al. 高压直流输电入地电流在交流电网分布的仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21):110-115.

[34] 郑涛, 高小芊, 杨国生. 地磁感应电流在三相电力变压器绕组中的流电路径分析[J]. 电力自动化设备, 2017(2):104-112, 共 9 页.

[35] 徐碧川, 潘卓洪, 刘玉, 文豹, 鲁海亮, 文习山. 交流电网地磁感应电流分析的全模型及其应用[J]. 电网技术, 2015, 39(06):1562-1567.

[36] 王开让, 刘连光, 魏恺, 刘春明, 吴伟丽. 基于行星际太阳风信息和三维磁流体力学模型预测电网 GIC 的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24):6341-6350.

[37] DL/T 437-2012 高压直流接地极技术导则[S]. 2012.

[38] 刘连光, 赵夏瑶, 张述铭, et al. 接地极偏磁治理对电网 GIC 的影响[J]. 电网技术, 2018(11).

[39] 黄彩臣. 抑制变压器直流偏磁电容隔直装置的优化配置研究[D]. 2016.

[40] Etemadi A H , Rezaei-Zare A . Optimal Placement of GIC Blocking Devices for Geomagnetic Disturbance Mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6):2753-2762.

[41] 王华伟, 林少伯, 王祖力, 王明新, 黄勇, 雷霄, 王庆, 李新年, 王亮, 孙栩. 溪浙特高压直流隔直装置存在的问题分析及改进[J]. 电网技术, 2015, (06):1600-1604.

[42] 李洋, 刘连光, 杜如钧, 谢浩铠. 基于阻容混合的接地极直流偏磁电流治理研究[A].

中国电力科学研究院有限公司、国网电投(北京)科技中心、《电子技术应用》

杂志社. 2017 年“电子技术应用”智能电网会议论文集[C]. 中国电力科学研究院有限公司、国网电投(北京)科技中心、《电子技术应用》杂志社:国网电投(北京)科技中心, 2017:5.

- [43] Eitzmann M A , Walling R A , Sublich M , et al. Alternatives for blocking direct current in AC system neutrals at the Radisson/LG2 complex[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3):1328-1337.
- [44] J.G.Kappenman, S.R.NorrNeural, blocking device combatscurrents causes by geomagnetic storms-Design to reduce power systems vulnerability during high sunspot activity, IEEE Trans. Power Delivery, 1991, 6: 1271-1281.
- [45] Léonard Bolduc, Michel Granger. Development of a DC Current-Blocking Device for Transformer Neutrals. IEEE Tran. on Power Delivery, 2005, 20(1):163-168.
- [46] 赵杰, 黎小林, 吕金壮, et al. 抑制变压器直流偏磁的串接电阻措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12):88-91.
- [47] 刘连光, 杨培宏, 马成廉, et al. 中性点串接小电阻均摊电网 GICs 的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2017(11):54-63+312.
- [48] 刘鹏, 郭倩雯, 杨铭, et al. 抗直流偏磁的变压器中性点接地方式探讨[J]. 高电 60 压技术, 2015, 41(3):794-799.
- [49] 董新胜, 张小军, 黄耀德, et al. 线路零序阻抗测量在直流偏磁影响下的研究[J]. 电气应用, 2018(11).
- [50] Bolduc L , Granger M , Pare G , et al. Development of a DC Current-Blocking Device for Transformer Neutrals[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1):163-168.
- [51] 李占元, 赵伟, 丁健, et al. 国华台山发电厂主变直流偏磁问题分析与治理[J]. 电网技术, 2009, 33(6):33-38.
- [52] 胡志广, 王峰, 蔡泽祥. 变压器直流偏磁治理装置及其对继电保护影响的分析[J]. 广东电力, 2007, 20(10).
- [53] 李晓华, 傅龙辉, 罗龙波, et al. 220kV 主变压器中性点加装隔直电容对零序电量的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1):121-126.
- [54] 王峰. 电阻性直流偏磁治理装置对交流系统继电保护的影响分析[J]. 黑龙江科技信息, 2009(34):36-37.
- [55] 郑涛, 朱先启, 徐振栋, et al. 适应直流偏磁治理装置接入的零序电抗继电器动作特性分析[J]. 电网技术, 2013, 37(10):2926-2931.
- [56] 邱璆, 吴广宁, 任志超, et al. 变压器中性点串小电阻抑制直流偏磁的研究[J]. 华东电力, 040(5):812-816.
- [57] 吴家俊. 变压器 GIC 直流偏磁治理装置及其优化设计[D]. 华北电力大学(北京), 2019.
- [58] 朱先启. 直流偏磁抑制装置接入对线路距离保护的影响及研究[D]. 华北电力大学, 2013. 61

致谢

62

作者简介

说明: 1. 总文字复制比: 被检测论文总重合字数在总字数中所占的比例

2. 去除引用文献复制比: 去除系统识别为引用的文献后, 计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

3. 去除本人文献复制比: 去除作者本人文献后, 计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

4. 单篇最大文字复制比: 被检测文献与所有相似文献比对后, 重合字数占总字数的比例最大的那一篇文献的文字复制比

5. 指标是由系统根据《学术论文不端行为的界定标准》自动生成的

6. 红色文字表示文字复制部分; 绿色文字表示引用部分; 棕灰色文字表示作者本人文献部分

7. 本报告单仅对您所选择比对资源范围内检测结果负责



✉ amlc@cnki.net

🌐 <http://check.cnki.net/>

👤 <http://e.weibo.com/u/3194559873/>