

研 究 生 教 材

现代电力系统 直流偏磁仿真理论 及应用技术

于永军 张龙钦 等著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

研 究 生 教 材

现代电力系统 直流偏磁仿真理论 及应用技术

于永军 张龙钦 等著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书介绍了我国直流输电工程的运行和建设发展现状以及直流输电工程投运带来的负面影响,阐述了直流偏磁问题,分析了直流偏磁对交流电网(包括对变压器、电流互感器)的影响,并通过两个算例分析了直流偏磁下变压器及互感器的工作特性。同时对入地电流引起的地电位畸变进行分析,建立了直流接地极仿真模型,介绍了水平层状大地的地表电位分布理论,并对直流接地极地表电位分布的影响因素及规律进行了研究,计算出两种典型大地模型下的地表电位分布,研究了大地模型参数的准确性对地表电位分布计算准确性的影响。构建了交流电网直流网络模型,通过直流网络信息的实时采集,分析交流电网参数对直流电流分布的影响。最终以哈密电网直流电流分布计算为例,详细介绍了交流电网参数的获取方法及计算结果。设计了一款交流电网直流偏磁评估软件,介绍了软件的架构设计、功能界面以及在哈密电网直流偏磁风险评估方面的应用。

本书可作为高电压技术方向的研究生和高年级本科生的教材,也可以供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力系统直流偏磁仿真理论及应用技术/于永军等著.
—北京:中国电力出版社,2016.4

研究生教材

ISBN 978-7-5123-8725-6

I. ①现… II. ①于… III. ①直流输电-研究生-教材
IV. ①TM721.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 040693 号

中国电力出版社出版、发行

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

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 4 月第一版 2016 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11 印张 246 千字

定价 38.00 元

敬告读者

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

版权专有 翻印必究

主要作者

于永军	张龙钦	施学谦	张 伟	孙谊嫔
潘卓洪	雷 鸣	袁铁江	常喜强	祁晓笑
张 龙	刘 勇	孙 冰	张泽强	

参与编写人员

马勤勇	文习山	王 建	王晓飞	王 亮
刘大贵	庄文兵	何长根	陈立志	李 明
李 山	吴 标	张 勇	张 娟	张 媛
张 陵	罗忠敏	郑 义	郑少鹏	南东亮
赵 帅	晏 青	秦艳辉	梁乃峰	董力通
焦春雷	鲁海亮	靖 峰	(按姓氏笔画排序)	

前言

超/特高压交直流输电等能源互联网支撑技术,是清洁能源大规模接入和远距离输送的重要技术保障,在国家级能源基地新疆等地被广泛应用,±800kV 哈密—郑州特高压直流(又称天中直流)、±1100kV 准东—皖南特高压直流外送通道以及拟建的中国—巴基斯坦跨国直流输电工程,基本满足了新疆能源基地高效开发和大规模外送的需要。随着超/特高压交直流混联骨干网架的形成,新疆电网中的变压器直流偏磁等问题也越发严峻,一方面威胁着电力系统中主变压器的安全运行,另一方面也约束了直流系统的送出能力。为满足广大电力工作者的需要,国网新疆电力公司电力科学研究院组织撰写了本书。本书基于多年来国网新疆电力公司在超/特高压交直流混联电网直流偏磁仿真技术领域的理论研究成果和工程实践经验,系统地介绍了现代电力系统直流偏磁仿真理论和应用技术问题。

本书第1章对直流偏磁的形成机理、目前研究进展和应用概况做了简要的介绍,初步探讨直流偏磁仿真理论和应用技术的关键点。第2章详细介绍变压器直流偏磁的成因和直流偏磁状态下的变压器工作特性,读者可以更深刻地了解变压器直流偏磁的相关背景。第3章从地质学的角度,探讨了深层大范围内大地电阻率的测量方法和如何利用测量数据演算大地电阻率的仿真模型。这部分内容是作者直流偏磁研究工作的最近进展,也是直流偏磁理论和实践的基本环节,有助于读者建立对大地电阻率与直流偏磁问题相关性的正确认识。第4章承接第3章,讨论了地表电位的理论推导和数值计算问题,这部分内容也是作者在电力系统接地技术方面研究的最新成果。第4章的理论研究和数值计算方法可直接应用于直流偏磁评估软件的开发。第5章具体介绍了交流电网的直流电流分布网络建模方法,为直流偏磁评估软件的核心算法提供理论支撑。在第4章和第5章的理论方法基础上,第6章详尽介绍了作者在交流电网直流偏磁评估软件开发方面的工作,并在第7章介绍了该软件在新疆电网中的具体应用。最后,第8章总结了全书并展望了直流偏磁的未来研究方向。

通过阅读本书,读者能够系统地了解现代电力系统中直流偏磁仿真理论及其应用技术的最新进展和发展概貌,能够便捷地了解这些理论和技术成果在天中直流输电等工程中的应用经验。希望本书能够对广大电力系统工程师、电气工程设计人员和电气工程专业的师生在相关领域的理论学习和工程实践提供一定的参考。

在写作过程中,作者得到了包括安徽正广电电力技术有限公司、武汉大学、甘肃电力公司、宁夏电力公司和中国电建集团西北勘测设计研究院等单位的大力支持,也得到了业界众多专家、学者们的无私帮助,在此一并表示感谢。

最后,还要感谢书中引注和未曾引注的所有参考文献作者的辛勤工作,感谢中国电力出版社的王娟等编辑同志为本书出版所付出的辛勤劳动!

现代电力系统直流偏磁仿真理论和应用技术的研究有待于进一步探索和完善,囿于作者的知识水平和经验,书中观点和结论难免有瑕疵,望读者原谅和不吝指正!

作者

2016年1月

目 录

前言

第 1 章 概述..... 1

1.1 引言 1

1.2 交流电网直流偏磁的机理与危害 1

1.2.1 变压器直流偏磁问题的成因 1

1.2.2 我国面临的变压器直流偏磁危害 2

1.3 当前国内外研究进展与应用概况 3

1.3.1 直流接地极场位问题 4

1.3.2 变压器直流偏磁问题 5

1.3.3 交流电网直流电流分布 6

1.3.4 抑制直流电流的措施 8

1.3.5 直流输电电磁兼容 9

1.4 直流偏磁仿真理论与应用关键技术..... 10

第 2 章 变压器直流偏磁的成因和理论背景 11

2.1 引言..... 11

2.2 直流偏磁对变压器的影响..... 11

2.2.1 变压器铁心的磁滞特性..... 11

2.2.2 变压器正常运行时铁心工作状态..... 13

2.2.3 变压器直流偏磁时铁心工作状态..... 13

2.2.4 直流偏磁对变压器中性点电流、振动和噪声的影响..... 14

2.3 变压器直流偏磁风险的磁动势评价模型..... 15

2.4 直流偏磁对电流互感器的影响..... 17

2.4.1 等效模型的建立..... 17

2.4.2 直流偏磁对计量用电流互感器的影响..... 18

2.4.3 直流偏磁对保护用 TA 的影响..... 19

2.5 算例分析..... 20

2.5.1 变压器直流偏磁仿真..... 20

2.5.2 电流互感器直流偏磁仿真..... 26

2.6 本章小结..... 26

第 3 章 大地电阻率的深度勘探反演技术 27

3.1 引言..... 27

3.2 大地回流问题的背景介绍和国内外的研究概况..... 27

3.2.1 大地回流问题的背景介绍..... 27

3.2.2	国内外的研究概况	33
3.3	深层大地电阻率分布的测量原理	38
3.3.1	测量深层大地电阻率分布的目的	38
3.3.2	大地电磁测深法的原理	39
3.3.3	大地电磁勘测大地电阻率的等效性分析	42
3.4	四极法测量数据的反演技术	45
3.4.1	反演技术简介	45
3.4.2	极距布置原则	52
3.4.3	带约束的土壤反演	54
3.4.4	水平多层土壤反演的群智能方法	56
3.4.5	经典优化方法与群智能方法的联合应用	61
3.5	MT法测量数据的反演技术	64
3.5.1	MT法测量数据反演的目标函数	64
3.5.2	MT法测量数据反演的测试算例	65
3.6	本章小结	68
第4章	入地电流引起的地电位畸变理论分析和数值计算	70
4.1	引言	70
4.2	直流接地极的仿真模型建立	70
4.3	水平层状大地的地表电位分布理论	72
4.3.1	计算水平多层土壤格林函数的智能复镜像法	75
4.3.2	源层为首层时格林函数导数的推导和计算	78
4.3.3	算例	80
4.4	水平层状大地数值的奇异性问题	81
4.4.1	奇异格林函数	81
4.4.2	高阶复镜像法	82
4.5	非层状大地模型的数值方法	88
4.5.1	接地计算中边界元法的模型推导	89
4.5.2	边界元自适应剖分方法	90
4.5.3	尺度系数的取值	91
4.6	地中电流及地表电位分布的影响因素及规律	93
4.6.1	海洋—陆地地表电位分布	93
4.6.2	存在山地情况下的地表电位分布	94
4.6.3	存在江河情况下的地表电位分布	95
4.7	算例分析	96
4.8	本章小结	99
第5章	交流电网直流电流分布计算模型	101
5.1	引言	101
5.2	交流电网直流电流网络模型的构建	101
5.2.1	线路模型	101

5.2.2	变电站模型	102
5.2.3	其他电网部分的模型	103
5.2.4	场路耦合模型的推导	104
5.3	自耦变压器中直流偏磁的判断方法	106
5.4	交流电网直流网络信息的实时采集	108
5.4.1	获取交流电网接线信息的构思	109
5.4.2	潮流计算简介	109
5.4.3	潮流计算接口程序的开发	110
5.4.4	在线信息管理系统的构思	111
5.5	交流电网参数对直流电流分布的影响	111
5.5.1	电网规模	112
5.5.2	电网覆盖面积	113
5.5.3	变压器参数	113
5.5.4	110kV 系统接地运行方式	114
5.5.5	杆塔—避雷线系统对直流电流分布的影响	114
5.5.6	变电站间互阻对直流电流分布的影响	117
5.6	本章小结	118
第 6 章	交流电网直流偏磁评估软件开发	119
6.1	引言	119
6.2	软件的架构设计	119
6.3	软件的功能及界面	120
6.3.1	输电线路模块	120
6.3.2	变压器模块	120
6.3.3	变电站模块	124
6.3.4	杆塔—避雷线系统模块	125
6.3.5	变压器风险评估模块	125
6.4	数据库系统的开发	129
6.5	用户快速查看数据接口程序简介	131
6.6	与其他软件的对比验证	135
6.6.1	与 MATLAB SIMULINK 的对比	137
6.6.2	与 PSCAD 的对比	138
6.6.3	与 ATP 的对比	138
6.7	本章小结	139
第 7 章	交流电网直流偏磁评估软件应用	140
7.1	引言	140
7.2	直流电流在交流电网中的分布	140
7.2.1	天中直流工程背景资料	140
7.2.2	哈密地区电网模型的建立	141
7.2.3	土壤参数的选取	143

7.2.4	各变电站与接地极的距离	144
7.2.5	现场实测与理论计算分析	144
7.3	接地极的影响分析	147
7.3.1	接地极的位置影响	147
7.3.2	接地极接地电阻的影响	148
7.3.3	接地极选址的影响	149
7.4	多源入地电流的影响	151
7.4.1	天中直流工程入地电流单独作用	151
7.4.2	酒泉—湖南直流工程入地电流单独作用	152
7.4.3	两个直流工程入地电流共同作用	152
7.5	本章小结	153
第8章	结束语	154
参考文献	参考文献	156

概 述

1.1 引 言

伴随我国大规模交直流混联电网的迅速发展,直流输电工程在调试或故障情况下单极大地回线运行时有发生。特别是最近十年以来,直流输电的人地电流已经对交流电网造成了严重的直流偏磁危害。由于目前缺乏深入的理论支撑和计算分析的有效手段,直流偏磁危害在理论解析、计算评估和抑制治理方面均遇到了较大困难。本章先介绍直流偏磁的机理和我国一些交流电网受到的直流偏磁危害,并回顾国内外相关研究的最新进展,然后由目前的研究不足引出直流偏磁仿真理论和应用技术的核心内容。

1.2 交流电网直流偏磁的机理与危害

1.2.1 变压器直流偏磁问题的成因

直流偏磁是指在变压器励磁电流中出现了直流分量,导致变压器铁心半周磁饱和以及由此引起的一系列电磁效应^[1-5]。变压器正常工作在交流过励磁情况下,铁心磁通密度增加,励磁电流产生畸变,变压器工作在磁化曲线的非线性区域,励磁电流波形为尖顶波,且正负半波对称。变压器在直流偏磁下,直流与交流磁通相叠加,铁心饱和程度在与直流偏磁方向一致的半个周波增加,在另外半个周波减小,对应的励磁电流波形呈现正负半波不对称的形状。

直流偏磁是变压器的一种非正常工作状态,由于变压器的一次侧等效阻抗对直流分量只呈现电阻特性,且电阻很小,因此,很小的直流分量也会在绕组中形成很大的直流励磁磁势,该直流磁势与交流磁势一起作用于变压器一次绕组,造成变压器铁心工作磁化曲线偏移,出现关于坐标原点不对称即变压器偏磁现象。引起变压器直流偏磁的原因各异,主要包括直流单极大地回线运行和地磁场扰动。

直流输电系统在双极不对称或单极运行时,将有一定的直流电流通过直流系统接地极流入大地,同时在大地上形成不等电位。这时,直流电流可能通过变压器中性点进入变压器绕组,在变压器绕组中形成直流电流,使变压器磁通密度工作点发生偏移,产生直流偏磁,严重危害电力系统的运行安全。目前广东电网、江苏电网、贵州电网和宁夏电网的实际运行经验均表明,直流输电工程的人地电流对区域电网安全运行会造成不利影响。直流偏磁危害主要有以下几个方面:

1. 变压器噪声和振动加剧

由于磁滞伸缩,当变压器发生直流偏磁时,铁心的伸缩、振动幅度将增大,导致噪

声增大;同时,由于磁滞伸缩产生的振动是非正弦的,包含多种谐波分量,当某一分量与变压器构件发生共振时,噪声将更大,有可能导致变压器内部零件松动、绝缘性能受损。2004年3月3日,天广直流和三广直流同时同极性单极大地回线运行时,岭澳主变压器中性点最大直流电流达到43A,岭澳核电站主变压器先后发现不同程度的铁心绑带松脱、铁心柱弯曲、铁心叠片、串片等问题。两台变压器还由于铁心柱严重弯曲和铁心叠片、串片,造成绕组内部短路,不得不返厂维修。2002年12月,龙泉—江苏政平500kV直流输电工程调试,常州武南两组500kV主变压器中性点直流电流达到了12.8A,噪声最高达91.4dB。朝阳变电站2009年2月4日因主变压器噪声过大,引起周围社区群众抱怨并围困变电站。

2. 电压波形畸变

由于变压器铁心发生直流偏磁,严重时铁心可能工作在饱和区,从而使变压器漏磁通增加,使电压波形发生畸变。2004年5月贵州高坡—广东肇庆直流输电线路在单极大地回线方式下运行,广东电网220kV春城站主变压器中性点直流电流达34.5A,噪声达93.9dB,谐波电压总畸变率达2.1%。

3. 产生谐波

正、负半波对称的周期性励磁电流中只含奇次谐波。由于直流偏磁的作用,使半波深度饱和的变压器励磁电流中出现了偶次谐波。此时,变压器成了交流系统中的谐波源,可能会造成补偿电容器组谐波放大甚至谐振,危害电容器组的安全运行。在三广直流输电系统发生单极大地回线运行时,广东电网500kV惠州变电站监测到主变压器低压侧第2、3组电容器的4次谐波电流有效值达到200A。由于谐波电流严重超标,第2、3组电容器曾先后发生过5次爆炸事故。

4. 变压器无功损耗增加

由于直流偏磁引起变压器饱和,励磁电流大大增加,使变压器无功损耗增加,导致系统电压下降,严重时可使整个电网崩溃。

5. 继电保护系统故障

由变压器直流偏磁引起的电压波形严重畸变,会导致部分继电保护装置不能正确动作,其产生的零序次谐波(如3、6、9次谐波)可能导致零序电压或电流启动的继电保护装置误动。

1.2.2 我国面临的变压器直流偏磁危害

随着我国电力发展战略的逐步实施,长距离、大容量且经济高效的输电技术日益成为我国电网建设的首要选择^[6],而超/特高压直流输电技术恰好满足了这一需求。自从1987年国内第一条直流输电工程——浙江大陆—舟山岛直流输电工程投运,直流输电技术开始在我国得到快速发展。由于输送容量大、损耗低、输送距离远、控制方式灵活、线路无须无功补偿及联网方便等优点,超/特高压直流输电在我国的电力建设工程中效益日益显现。我国作为世界上直流输电工程最多的国家,装机总容量和单机容量为世界之最,目前已有超过40个建成、在建或规划中的直流输电工程。其中天中直流输电工程额定输送功率达到了8000MW。国家电网公司已投运的向上、锦苏、天中、溪浙四大特高压直流输电工程初步构建了连接我国西北煤电、风电基地、西南水电基地和东

中部负荷中心的能源配置平台。随着我国电力发展战略的逐步实施,长距离、大容量的超/特高压直流输电工程,在我国电网建设中所占比例也越来越高,地位也越来越重要。截止2014年,我国直流输电系统已投用容量约占世界容量的79%。

本书以天中直流输电工程为成书背景。哈密—郑州±800kV^[7]特高压直流工程(下简称“天中直流”),是我国自主设计、制造和建设,目前世界输送容量最大直流工程,起点在新疆哈密南部能源基地,落点河南郑州,途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南六省(区)。输电能力将达800万kW,成为连接西部边疆与中原地区的“电力丝绸之路”。作为国家“十二五”期间实现疆电外送途经宁夏的重要通道,承担着新疆火电、风电打捆外送的重要任务,具有远距离、大容量、低损耗、环保、节约土地资源等优点,有利于促进我国能源基地的开发利用,实现大煤电的集约化开发,提高能源资源的开发和利用效益,缓解中东部地区的缺电局面。

为了评估天中直流工程对交流电网的影响,在天中直流工程投运后,通过试验,当在直流极注入-500A直流电流时,通过调整哈密电网相关220kV和110kV变电站接地网的运行方式时,哈密地区某750kV变电站220kV侧中性点的直流为12.61A。而在单极运行接地极注入电流最大达到-5000A时,该750kV变电站中性点的直流电流最大值可能达到126.1A,从而对电力系统造成极为严重的直流偏磁危害^[8-19]。因此,如何治理变压器直流偏磁问题显得极为迫切。

除了新疆地区,我国许多省份电网均出现过直流输电工程带来的直流偏磁危害。早在2001年,南方电网贵州高坡—广东肇庆直流输电工程调试运行时,贵州500kV安顺变电站就出现了直流偏磁现象^[17]。随后湖北龙泉—江苏政平^[20,21]、贵州高坡—广东肇庆^[22,23]、天生桥—广州直流和三峡—广东直流^[13,24,25]均导致交流系统内电力变压器发生直流偏磁危害。更严重的是,直流偏磁危害还影响核电站内主变压器的正常工作。自从2002年广东境内数个直流输电系统投运以来,岭澳核电站主变压器先后发现不同程度的铁心绑带松脱、铁心柱弯曲、铁心叠片串片等问题;两台变压器还由于铁心柱严重弯曲和铁心叠片、串片,造成绕组内部短路,不得不返厂维修。

并联电容器也会遭受变压器发生直流偏磁的不利影响。正常情况下,电力系统中的谐波主要为3次和5次谐波,故在并联补偿电容器的串联电抗率设计中,一般也是考虑3次和5次谐波。在变压器发生直流偏磁时,励磁电流谐波频谱变广、含量增加,可能造成补偿电容器组发生谐波放大甚至谐振,危害电容器组的安全运行。在三广直流输电系统发生单极大地回线运行时,广东电网500kV惠州变电站监测到主变压器低压侧第2、3组电容器的4次谐波电流有效值达到200A。由于谐波电流严重超标,第2、3组电容器曾先后发生过5次爆炸事故^[18]。

从本节介绍可以看出,变压器直流偏磁是由变压器铁心材料非线性引发的一系列对交流系统影响甚广的问题,已经对我国多个交流系统产生了诸多不良影响。目前,我国由直流输电入地电流引发的直流偏磁问题更加突出,交流系统的安全运行面临严峻考验。

1.3 当前国内外研究进展与应用概况

目前直流/拟直流电流在交流电网内分布的研究内容主要有以下五个部分。

1.3.1 直流接地极场位问题

随着接地理论研究的深入和计算机软硬件技术的飞速发展,接地电磁场数值计算已经成为求解直流接地极场位问题的最有效方法。

在接地理论中,求解恒流场问题的偏微分方程方法有两种:解析法和数值法。目前在层状、柱状、多层球状土壤接地问题中,由于分离变量法的使用,接地问题的格林函数解析式可以求出,因此解析法较数值法优胜。在其他结构的土壤问题(如复合结构土壤^[25-27])不存在解析解,只能使用数值方法进行处理。

接地理论将格林函数定义为单位点源在任意点处的电位函数^[28-30]。在接地问题的求解过程中,通常采取不同的坐标系并应用多种数学、物理方法来建立格林函数,在层状、柱状和球状等土壤情况下可以巧妙地使格林函数的封闭表达式更加简洁^[31,32],而且在给定的边界条件下求得格林函数后,可以方便、快捷地利用计算机来进行任意激励源场位分布的数值求解。

在非均匀土壤接地问题中,层状土壤一直是研究的重点内容。由于实际土壤的情况十分复杂,目前四极法反演得到的层状土壤以水平多层结构为主,层数一般不超过6层。层状结构土壤的格林函数封闭表达式极为复杂,不易手工推导获得,而且层状土壤格林函数的数值求解方法比较烦琐,给求解不均匀介质的接地问题带来很大困难。以往的格林函数封闭表达式是基于傅里叶积分变换方法得到的,最近文献^[28-30]利用分离变量法,结合边界条件的递推关系进行推导,极大地拓展了不均匀土壤接地问题的研究范围。目前的研究表明,水平4层土壤的格林函数封闭表达式已经十分复杂;如果是层数大于4的情况,格林函数的表达式求解非常容易出错。

由于广大范围内大地直流电性的复杂性,要细致考虑大地电阻率具体分布情况尚不现实。即使接地计算中简单的一座山、一条河的情况,也需要进行大量的计算工作^[25-27]。目前对这方面问题的处理方法是尽量使用简化的土壤模型,如水平四层大地模型^[22,33]。在数值方法方面,往往需要进行场域或边界的剖分。这方面的内容目前以有限元和有限差分的场域剖分算法居多,尚没有关于边界元方法剖分的文献。

近年来,交流电网直流电流分布的计算机仿真研究取得了较大的进展。文献^[22-27]利用矩量法和电路理论,分析局部电网的直流电流分布及其规律;文献^[25]计算复合分层土壤结构模型下的直流电流分布,分析了土壤参数对直流电流分布的影响;文献^[34,35]采用镜像法分析海洋对直流电流分布的影响;文献^[33,36-38]探讨了地表电位的分布规律;文献^[39]介绍了Hummel模型简化地电位分布的计算方法,讨论了直流电流分布的电路模型。

对解析法不适用的接地问题,数值法是唯一的解决方案。文献^[40-43]应用有限元法(FEM)分析了接地网的特性;文献^[44]首先提出复合土壤的直接边界元法(BEM),文献^[45,46]运用直接边界元法求解三峡水电站接地问题,文献^[47]巧妙地利用恒流场和静电场的相似性推导,得到了一种新形式的间接边界元法。

接地计算属于开域电磁场问题,目前已发表的文献中,FEM最多只能取7倍地网尺寸外的大地作为媒质的零位边界。明显地,FEM在仿真的空间尺寸方面存在局限性,计算结果可能为伪解;BEM则在处理无穷边界的时候可以把媒质边界取至100倍以上

地网的尺寸。从求解接地问题的规模来看, BEM 优胜于 FEM。

自适应剖分技术是电磁场数值计算的重点研究对象, 它直接影响数值计算的准确度和性能。接地导体和土壤边界的剖分是接地边界元数值计算的关键技术之一。在过往的接地边界元计算过程中, 边界的剖分往往使用均匀剖分和比例剖分的方式进行, 此法最大的弊端是依靠经验进行, 灵活性不足, 无法处理复杂边界。由边界元法的原理可知, 边界上的待求量直接与方程中的系数相关, 而这些系数是空间位置的函数, 由各边界的物理性质决定。只有足够准确地对接地导体和土壤边界进行模拟, 才可能正确地模拟不均匀土壤情况下接地导体的散流特性。边界单元越小, 就越能模拟土壤的细微内部结构, 接地导体的剖分越小就越能模拟电磁场的非均匀性。但此举必然导致剖分后的导体和边界元数目增加, 从而消耗更多的计算机内存和 CPU 时间。解决此矛盾的唯一方法是在基本满足计算准确度的前提下尽量节省内存和计算时间。为保证一定的计算准确度, 除了要求散流模拟准确程度外, 还要考虑边界元剖分尺寸对边界元计算误差的影响。

自适应剖分边界元方法的研究, 主要着眼于如何降低边界元剖分计算复杂度和提高生成边界元的质量, 让剖分程序具有良好的适应性且具有较快的剖分速度。商用的电磁分析软件如 ANSYS、COMSOL 等软件拥有自身开发的 FEM 剖分系统, 而接地 BEM 计算中, 目前应用最广泛的是加拿大的 CDEGS, 但出于商业目的, 该软件也只公布了其 Finite Volume 组件的算法, 并没有给出边界元剖分的具体方法。

目前的研究还存在以下问题: 地电位分布和接地电阻是直流电流分布的两个重要参数, 两者均与大地模型相关, 不应独立讨论; 半岛能否简化为劈面形状有待商榷; 复合分层结构土壤接地问题不存在解析解, 镜像法、复镜像法不适用, Hummel 简化也有一定的适用范围; 直流电流分布计算时往往要面对奇异的土壤参数, 已有计算方法是否适用, 是否有新型计算方法也是值得深入讨论的问题。

1.3.2 变压器直流偏磁问题

国外方面, 早在 20 世纪 80 年代, 以 John G. Kappenman 为代表的学者^[48,49]就开始了直流输电单极大地回路运行方式对输电系统的影响及地磁感应(GIC)对电力系统及其设备运行性能影响的研究。1993 年, 日本东京电力和东芝公司的学者进行了联合的试验研究^[50], 他们在小模型变压器和大模型变压器(尺寸约为实体变压器的 1/3~1/2) 试验分析的基础上, 结合变压器的结构特点, 指出芯式变压器的铁心拉板和壳式变压器铁心的支撑板分别为直流偏磁下关键的过热部位, 并给出这些部件的温升与磁场强度的对应关系。

加拿大魁北克电力公司于 1996 年发表了“关于芯式变压器允许直流电流的研究”^[51], 该文研究了 735kV 实际电网中从高压侧并联运行的单相 370MVA 和 550MVA 变压器的 12.5kV 低压绕组注入直流电流后变压器的直流偏磁特性。

高纬度地区地磁场活动频繁并且变化幅度较大, 位于北美和北欧的国家对 GIC 的研究较为重视, 并取得了不少成果, 除了对电网中的 GIC 进行监测外, 也针对本国电网建立了计算模型, 为减轻 GIC 的危害还研究了预报系统和防治措施^[52,53]。

国内方面, 武汉大学李晓萍博士在 2005 年发表了文献 [9], 该文通过铁心的非线性

性磁化曲线 Jiles - Atherton 理论, 在 MATLAB 环境里建立了变压器铁心的仿真模型, 并利用该模型分析了直流偏磁的大型单相变压器开路时励磁电流的波形特征。华北电力大学王倩^[54]对直流输电及磁暴引起的变压器直流偏磁问题进行了研究; 华北电力大学李慧奇博士^[12]对直流量与正弦电压激励同侧引入和直流量与正弦电压激励异侧引入两种情况进行了数值计算, 分析了两种引入直流量方法本质的区别及原因。

华北电力大学张轶君^[2]开展了变压器直流偏磁引起的振动噪声监测方法研究, 周盛^[55]提出了一种变压器直流偏磁问题的场路耦合算法; 东北电力大学党克^[56]基于经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 和 Hilbert 变换, 提出了一种新的变压器直流偏磁分析方法; 华北电力大学与保变天威集团^[57]联合提出了改进的磁路模型, 根据铁心和绕组的几何结构形成磁路的拓扑, 在铁心磁阻的计算中考虑涡流效应的作用, 同时将铁心接缝气隙的作用引入计算模型中, 建立了大型电力变压器直流偏磁的磁路模型, 基于矢量匹配法获得铁心等效磁路模型中元件参数的最优解。

武汉大学李晓萍针对三相五柱变压器的直流偏磁问题进行了计算研究^[19]。计算中, 利用麦克斯韦场的方程代替铁心柱的磁路方程, 与电路进行耦合, 并结合铁心的非线性特征曲线, 形成了非线性方程组, 通过求解该方程组, 最终实现对三相五柱变压器直流偏磁特性的分析。山东大学李长云教授基于铁心的折线式等效模型^[58], 利用电磁关系方程导出了变压器输出电压与偏磁电流间的数值关系, 进而根据系统的电能质量约束条件、电压调整率和电压总谐波畸变率, 建立了确定变压器所能承受的最大偏磁电流有效判据, 并给出了仿真验证。

西南交通大学肖华^[59]基于有限元法开展了单相变压器直流偏磁仿真研究; 河北工业大学与保变天威集团的研究人员研究了电力变压器叠片铁心损耗及磁通分布^[16], 提出并研制了完全按照电力变压器铁心的标准设计和叠装工艺制作的叠片铁心模型, 通过模型实验获得了叠片材料在不同偏置磁场作用时的损耗曲线, 解决了直流偏磁情况下叠片铁心三维电磁场数值计算中所需要的材料性能数据问题。西南交通大学蒋伟博士^[60]对变压器组直流偏磁及其内部特性开展了相关研究。华北电力大学李宇春^[61]和刘畅^[62]分别开展了变压器振动噪声的直流偏磁监测方法和评估软件方面的研究。

目前对直流偏磁的研究还很不完善: 模拟试验的成本太高, 工作量大; 仿真结果往往和试验结果有出入, 结论可信度不高; 非线性磁化曲线 Jiles - Atherton 理论的数值计算方法复杂, 计算时容易出现发散现象; 不同厂家或不同型号的变压器直流偏磁特性不一, 难以总结变压器耐受直流电流的经验数据。

1.3.3 交流电网直流电流分布

交流电网直流电流分布的研究主要集中在国内。

中国电力科学研究院的朱艺颖等以 2005 年南方电网为对象, 提出在简化电网规模的基础上, 采用“等值简化的大地电网模型”进行直流分布 EMTDC 程序的仿真计算, 探讨了天广、三广、贵广 I 回直流输电工程运行方式对变压器中性点直流电流的影响, 比较了变压器中性点串联电阻、线路串联电容、变压器中性点串联电容这三种措施的抑制效果^[63]。

广东省电机工程学会的马志强高级工程师认为“大地电流分布涉及电流场计算, 而

交流电网中的直流电流分布涉及电路计算,因而计算过程存在‘电路’和‘电场’的交替迭代,在迭代计算收敛后才能求得大地直流电流场和交流电网直流电流的稳态分布”,因此应用极自电阻和耦合电阻的概念,将地网和交流电网直流通路电网联合计算,在此基础上提出了变压器中性点直流分量的网络算法。该算法把电流场计算变换为电路计算,将原来的场-路交替问题演化成纯电路问题,并形成研究结论:“直流地网与交流电网通过接地极形成的某种强度耦合是直流输电大地电流影响交流电网的主要途径”。^[64]

华中科技大学的何俊佳教授在2006年发表了关于交流系统直流分布的计算模型^[65],在随后的研究^[27]中重点分析了土壤结构对流入变压器中性点直流电流的影响,认为“上层土壤的水平均匀程度对地面电位分布影响较大”,选择变电站站址时应考虑使变电站接地网与直流接地极之间的耦合通道存在着较小电阻率(如湖泊)或较大电阻率(如岩石山)区域。

华中科技大学的毛承雄教授^[66]采用有限元法分析了直流输电单极运行时接地极附近的地表电位分布特征,并通过简化的大地电阻率数学模型,定性分析了地形、大地各层电阻率、接地极设计和多个接地极共同作用等因素对地表电位分布的影响,认为因大地导电条件复杂,传统方法很难计算出有实际意义的可能流过变压器中性点的电流值,故根据等效阻抗的概念和逆向求解的思路,提出一种计算流过变压器中性点直流电流的新方法:通过中性点直流电流的测量值,反推求出接地极和变压器间的电阻网络参数。

郑健超院士、李立浯院士和清华大学刘曲博士把研究的重点放在复合土壤模型^[25]上,根据镜像法的物理意义,推导求得接地极地表电位的计算公式,比较了复合土壤模型下地表电位分布的差异,强调了地表电位和交流电网的拓扑结构是影响流过变压器中性点直流电流分布的重要因素。刘曲博士的论文中建立考虑海洋影响的模型,解释了海边变电站(核电站)的电位较低使得这些厂站接地变压器中性点有较大电流流过的现象。

清华大学何金良教授、曾嵘教授和张波副教授带领的科研团队^[15,22,67-69]认为,地下的电流场是在交流系统产生直流电流的驱动源,而该电流场是由大地中所有导体向大地泄漏或吸收电流产生的,因而得到埋地导体的漏电流分布是分析直流大地运行时交流系统直流电流分布的关键。基于场路结合的方法,把整个直流通地极、交流接地网和交流输电线路视为一个由位于地上的电阻网络和位于地下的多导体电流场构成的复杂系统。基于矩量法的原理,建立了包括完整的地上交流输电网络和地下各个接地网的计算模型,使用导体表面电位的连续性条件来对由直流接地极和交流接地网泄漏电流构成的电流场建立分析模型,提出了分析直流大地运行时交流系统直流电流分布的数值方法。分析影响流过线路电流的因素有:线路两端的地电位差(由距直流接地极的距离、线路走向、线路长度决定)、大地在线路两端的等效阻抗(由大地地质情况、变电站接地网情况决定)、线路的等效直流电阻(由线路长度、线路回数、导线参数决定)。

山东大学的李庆民教授及其团队^[35]利用保角变换中的正幂函数变换,将三维空间转化为二维空间,提出扩展镜像法的概念,据此推导出半岛地质环境下地表电位分布的函数表达式。

西南交通大学吴广宁教授的团队也对本课题做了大量的工作:曹晓斌博士首先借助了渗流物理学中的多孔介质模型,并结合试验的方法研究了直流电流密度对土壤电阻率

的影响^[70]；蒋伟博士使用电路模型^[71]研究了变压器直流偏磁及其与接地电阻关系，随后发表文献 [72, 73]，提出基于场路结合模型，该模型以限制变压器中性点直流电流大小和串入电阻大小为优化目标，引入了双目标粒子群算法对问题进行求解；任志超博士研究了大范围多层地质结构 Hummel 法简化的可行性及交流输电线路、变电站接地网对直流地电位分布的影响，得出了直流入地电流经交流电网分流的求解等效电路，推导了直流地电位的计算公式^[39]；最近任志超博士基于典型三层结构大地，提出了一种求解直流地表电位的简易算式^[74]，利用变压器中性点直流电流的现场实测值确定算式中的系数，利用该算式预测了某超高压直流工程单极投运后可能引起的直流地表电位、跨步电压，评估了直流接地极入地电流在变电站的分流情况。

综合国内学者对交流电网直流分布的理论模型，不难发现：这些模型以纯电路的模型居多，或者是模型中场的参数以电路元件表示；电网的模型相对简单，两站系统比较常见，最复杂的情况也只是局部的小型电网；对电网的运行方式缺少深入的讨论，计算结果和结论没有完善的对比分析；地表电位分布的计算依赖有限元软件 ANSYS 或者接地软件 CDEGS，真实性和有效性有待商榷；目前没有一个数值性能优良且界面友好的直流电流分布仿真软件，妨碍了直流电流分布预测和抑制措施仿真工作的开展。

1.3.4 抑制直流电流的措施

目前直流输电工程的入地电流可能导致交流电网出现大范围变压器直流偏磁的现象；为了保证电网的安全运行，迫切需要研究抑制电网直流偏磁的措施。

1. 国外方面

M. A. Eitzmann 在文献 [75] 中，以魁北克—新英格兰直流输电工程为对象，提出了几种抑制直流电流的方案，对中性线串联的电容器加以间隙、MOV 等实现中性点电容器过电压保护方案进行了比较分析。

J. G. Kappenman 提出的一种由电容器和放电间隙组成的旁路系统来抑制 GIC 导致的直流偏磁^[76]，但电容器的容抗值在 60Hz 情况下达到了 43Ω ，造成了变压器中性点不能有效接地。另外，该法还有一个不足之处：需要在电容器两端并联多个放电间隙用于防止电容器因过电压而损坏。

L. Bolduc 改进了 J. G. Kappenman 的方法，提出了一种电容器直流电流抑制装置^[77]。该装置首先将电容器的容抗减小到了 1Ω 左右 (60Hz)，然后将由整流桥和晶闸管构成的电子开关代替放电间隙引入到了装置的主回路中。

F. P. Dawalibi 提出了一种采用单独接地网抑制变压器中性点直流偏磁的方法^[78]：在变电站主接地网之外再设置一个接变压器中性点的专用接地网，隔离变压器中性点的接地通道与变电站其他一次设备的接地通道，并在变压器中性点专用接地网与变电站主接地网之间增加一个隔离装置。当变电站出现短路故障时，隔离装置即刻导通，保证变压器中性点绝缘不被击穿。

2. 国内方面

蒯狄正等研制了直流电流发生器及自动控制装置^[20,21]，该装置主要原理是电源经调压器调压后，经硅整流、辅助接地极和变压器中性点回路向变压器中性点注入反向直流电流。该装置已于 2005 年在江苏 500kV 武南站投运。但因调压器为电动机械式，响应