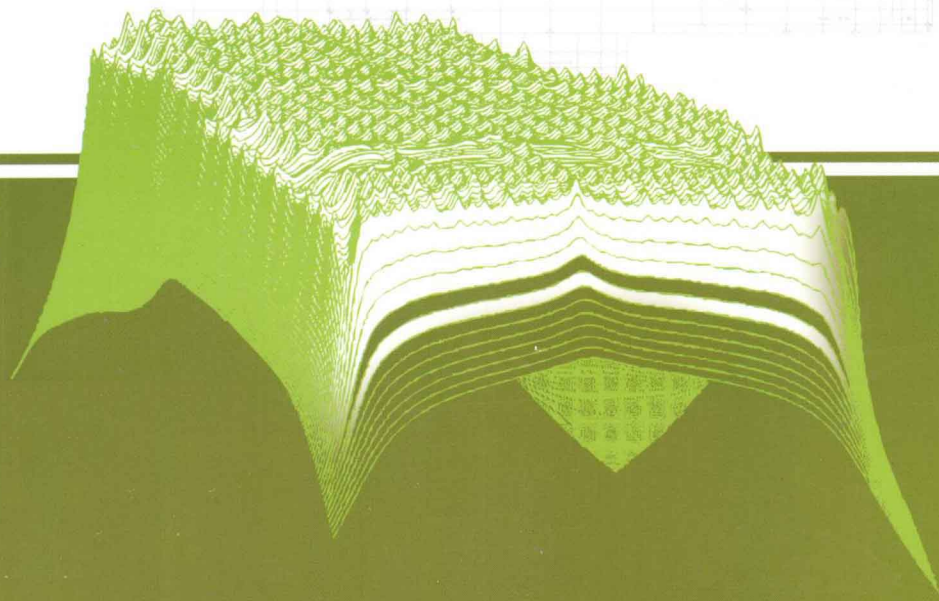


发电厂和变电站 接地网安全性状态评估

FADIANCHANG HE BIANDIANZHAN
JIEDIWANG ANQUANXING ZHUANGTAI PINGGU

李 谦 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

发电厂和变电站 接地网安全性状态评估

FADIANCHANG HE BIANDIANZHAN
JIEDIWANG ANQUANKING ZHUANGTAI PINGGU

李 谦 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

针对接地网基本安全性能而开展的接地网安全性状态评估（本书也称接地网状态评估）是发电厂和变电站（包括换流站、串补站等）接地网运行维护工作的最高形式。随着电网的持续发展，自动化水平的提高，电磁兼容问题越来越突出，国内对接地网运行维护逐步向安全性状态评估的模式转变，南方电网公司已将接地网状态评估纳入 Q/CSG 114002—2011《电气设备预防性试验规程》中，其应用也向接地网的设计阶段延伸。

本书针对国内部分地区接地网状态评估工作起步较晚、技术手段相对落后等现状，结合现有的国家标准和行业规程，总结近年来广东电网开展变电站接地网状态评估的经验，通过丰富的案例，对接地网安全性状态评估工作内容和方法进行论述，以解决接地网安全性状态评估工作实施过程中遇到的技术问题。

本书共分为 13 章，内容涵盖接地网特性参数实测方法，状态评估理论基础和以 CDEGS 软件为主的分析软件，土壤分层结构分析，接地阻抗、故障时地线分流和入地电流、接地网电位升高和电位差、跨步电压和接触电压计算，接地网雷电暂态参数计算，导体热稳定校核等接地网安全性状态内容，介绍了安全性状态评估在接地网运行维护、大修改造和基建设计中的应用，以实例介绍为特点，理论与实际结合紧密，图文并茂，具有较强的实操性，是国内介绍接地网状态评估技术方面较为全面的科技图书。

本书主要面向基层技术人员，针对性强，深入浅出，以期达到接地分析软件简单用于发电厂和变电站接地网状态评估的目的，同时为接地软件在接地网设计和维护中的进一步应用奠定基础。

本书可作为电力行业基层专业技术人员的培训教材，还可作为高等学校电气工程专业在校本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

发电厂和变电站接地网安全性状态评估/李谦编著. —北京: 中国电力出版社, 2013.10

ISBN 978-7-5124-1458-1

I. ①发… II. ①李… III. ①发电厂-接地网-安全评价②变电所-接地网-安全评价 IV. ①TM6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 148561 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 10 月第一版 2013 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22 印张 537 千字

印数 0001—3000 册 定价 80.00 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

发电厂和变电站的接地问题由来已久，一方面是随着近年来我国国民经济持续高速发展，电网规模不断扩大，电压等级不断提高，系统容量和接地短路电流水平越来越高；另一方面，我国电网向数字化、自动化和智能化大踏步迈进，带来电子设备如雨后春笋般的应用，与此同时带来的是电磁兼容问题越来越突出，人们对接地网多年来停留在接地电阻等简单参数认识的水平上，已远远不能适应我国电力高速发展对接地网安全性和可靠性越来越高要求的新形势，接地技术的发展也要与时俱进，不断地提升和创新。

所幸的是，随着形势的发展和接地技术的进步，对接地网的认识也逐步向接地网的综合安全性能方向转变，国内对接地网运行维护逐步向针对接地网基本安全性能而开展的安全性状态评估的模式转变，南方电网公司在国内率先将接地网状态评估纳入 Q/CSG 114002—2011《电气设备预防性试验规程》中，并向接地网的设计关口延伸。

接地网具有隐蔽工程的特点，存在复杂的土壤和电气环境多种影响因素，给接地网安全性状态评估工作带来了很大的难度，接地技术基础理论和计算技术的发展，为数值分析手段弥补现场实测的不足提供了现实可能，接地网安全性状态评估工作在国内江苏、广东等部分地区以点带面，逐步开展了起来，积累了有价值的经验，顺应电力设备状态检测和状态检修对接地网安全性状态评估的形势要求，在总体看来，由于工作基础、技术积累和认识水平的差异，该工作在国内因地区不同而参差不齐，这种现状阻碍了接地技术的发展，对电力系统接地网全过程管理工作带来不利的影响。

接地网安全性状态评估是接地网设计、建设和运行维护全过程管理的重要手段，开展接地网安全性状态评估工作的重要意义是不言而喻的。作为一项新的技术应用，目前国内介绍接地网状态评估的论著和规程标准凤毛麟角，多在教科书和接地网技术专著中有所提及，缺乏全面性、系统性和实操性，不能满足指导基层试验人员正确、规范开展接地网状态评估工作的需要，缺少一本充当教科书与实际工作之间桥梁角色，面向基层试验人员的接地网状态评估的专门技术著作。

本书作者李谦博士主要从事接地专业工作，长期耕耘在广东电网生产第一线，以严谨的治学态度，将理论与实践密切联系在一起，十分注重实践经验的积累，参与了 GB 50169—2006《电气装置安装工程 接地装置施工及验收规范》和 DL/T 475—2006《接地装置特性参数测量导则》的编制工作，在总结广东电网多年接地网测试技术的基础上，编著了《电力系统接地网特性参数测量及其应用》。近年来，伴随着广东电网这个国内最大省级电网的高速发展，变电站接地网状态评估已作为常态化、制度化和规范化的运行接地网维护工作开展起

来，通过主持广东电网多个接地技术相关的科研项目，并将反映接地网测量的创新性研究成果成功应用于接地网状态评估实践，针对广东电网的土壤结构特点和电网特点，解决了较多的接地网状态评估和整改问题，取得了较好的效益，也为本书的编写积累了扎实的素材，使得本书内容层次清晰，能较为全面地反映和回答基层现场试验人员的需求，统一对接地网状态评估工作的认识，普及和规范接地网安全性状态评估工作，提高整体接地技术水平具有积极的意义。

本书针对目前部分地区对接地网安全性认识较为薄弱，接地网状态评估工作尚未开展，技术手段相对落后等现状，结合现有的国家标准和行业规程，主要以广东电网公司电力科学研究院近年来的接地网状态评估工作为基础，着眼于现场评估实测，就接地网安全性状态评估工作模式、内容和具体方法等进行总结，结合丰富的案例，以实用性强作为本书的鲜明特色，以大量的评估实例的总结作为支撑，达到与教科书和规程标准相辅相成的目的，是教科书的有益补充。

相信本书的出版发行必将推动电力系统接地技术的创新与提升，我们期待有更多的接地技术创新成果涌现出来，并与业内同行分享，为我国电力事业的技术进步多做贡献。

文习山

2013年8月

发电厂和变电站（包括换流站、串补站等）接地网是维护电力系统安全可靠运行、保障人员安全的重要措施，是变电站设备的重要组成部分。其基本功能主要反映在安全性能方面，属于过电压保护装置的范畴，即在系统发生接地故障时起到快速泄放故障电流，改善接地网金属导体和场区地表地电位分布，从而保障设备和人员的安全，接地网的状态主要通过其安全性状态的优劣反映出来。

由于历史的原因，人们对接地网的认识，主要局限在接地阻抗（习惯称为接地电阻）上，对接地网交接验收和运行维护阶段的预防性试验，也主要考虑接地阻抗、导通性测试和腐蚀开挖检查等项目，随着电网的持续发展、电网规模不断扩大、电压等级不断提高、系统容量和接地短路电流水平的提高，对电力系统安全、稳定运行的要求越来越高；另外，我国电网向数字化、自动化和智能化大踏步迈进，带来弱电子设备的大量应用，电磁兼容问题越来越突出，电网安全、稳定运行对接地网安全性的要求越来越高，对接地网的可靠性以及接地技术提出了越来越高的要求。在这种形势下，随着近年来人们对接地网认识水平的提高，越来越多地关注反映系统故障状态下的接地网安全性能。

接地网隐蔽工程的特点，决定了在运行维护方面与其他电网设备的区别非常大，一般来说，接地网安装覆土并投入运行后，基本处于免维护状态，按照 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》的要求，只是针对接地阻抗、导通性和腐蚀性开挖检查三个项目进行。由于发电厂和变电站投运后，架空线路和电缆的接入，不可避免地改变了接地网的拓扑结构，造成对测试电流的分流，给接地阻抗的定期准确测量带来困难，随着接地测试技术的进步，已经具备通过测量分流的模值和方向，实现运行变电站接地阻抗较为准确的测量；腐蚀性选点开挖检查也有很大的主观性和随意性，腐蚀诊断技术的发展也针对接地网的腐蚀诊断有所突破。尽管如此，反映接地网安全性状态的特性参数包括接地故障电流下接地网电位升高、接地网电位差、跨步电压和接触电压等一些关键参数，以当前的接地技术水平，无法或难以通过实测的手段得到，只能通过数值分析手段，模拟真实短路电流进行数值仿真，弥补现场实测手段的不足。可见，传统的运行维护模式手段并不能有的放矢地实现对接地网安全性的状态评估。如何针对反映接地网安全性的特性参数进行评价，来准确反映接地网的真实运行状态，成为长期以来困扰接地技术工作者和试验人员的难题和挑战。

随着接地技术和计算机技术的发展，采用数值分析方法已能够全面考虑接地网的实际结构、土壤实际分层结构，以及故障电流散流时的实际情况，使接地阻抗、接地故障状态下的接地网电位分布、跨步电压和接触电压等特性参数计算成为可能。数值分析手段的突破，大

大推进了接地网安全性状态评估技术的发展，作为接地网状态评估的载体，接地分析软件扮演了不可或缺的角色，国外最早出现了基于电磁场理论的商业化的通用接地分析软件（典型如 CDEGS 软件）。我国已有部分高校、科研机构、设计院和电力企业引入了 CDEGS 软件，随后国内的部分高校也开发了针对接地网设计和状态评估的专用分析软件，但在接地网安全性状态评估方面的总体应用情况不理想，部分单位对接地软件的应用尚处于空白；另外，接地网状态评估从运行变电站起步，部分地区取得了较为成熟的经验，发现了接地网运行维护中存在的问题，并指导整改设计，取得了良好的成效。相比于运行维护阶段的应用，接地网状态评估在接地网基建设计阶段的应用面和深度则要小得多，大部分地区尚属空白，接地网设计还是沿用传统的模式，主要针对接地阻抗进行，少数校核了跨步电压和接触电压，很少针对接地网的基本功能，即故障状态下的接地网电位升高和电位差、跨步电压和接触电压进行校核和评价；从技术水平看，部分地区的接地网状态评估工作仍是空白，或者不了解接地网状态评估是怎么一回事，为什么要开展这项工作。或者虽知道怎么做，但接地软件的应用水平较低，对接地网安全性状态的理解不深，开展这项工作的目的性不强，甚至开展接地网状态评估只是简单测量接地阻抗、导通性测试和开挖检查，这项工作常常难以达到目的。接地网状态评估工作的现状远远不能满足发电厂、变电站接地网状态评估工作的形势要求。

接地网性能好坏直接影响电力系统的稳定运行以及设备、人身的安全，作为接地网设计、建设和运行维护全过程管理的重要手段，针对故障状态下接地网电位升高和电位差、跨步电压和接触电压等反映设备和人员安全性特性参数指标的接地网安全性状态评估，成为接地网全生命周期管理工作的最高形式。该工作已在部分地区开展起来，对接地网的维护逐步由预防性试验定期测量接地阻抗向必要时开展接地网安全性状态评估的模式转变，中国南方电网公司已将接地网状态评估纳入 Q/CSG 114002—2011《电气设备预防性试验规程》中，国家电网公司也编制了 Q/GDW 611—2011《变电站防雷接地装置状态评估导则》，其应用延伸到接地网的设计阶段，顺应了电力设备状态检测和状态检修的形势要求。

作为近年来国内出现的接地网新技术，目前涉及接地网安全性状态评估技术的专门论著很少，缺少系统介绍接地网安全性状态的手段，数值仿真基础理论，土壤分层结构分析，接地阻抗、接地故障时地线分流和入地电流、接地网电位升高和电位差、跨步电压和接触电压计算，雷电侵入状态下接地网参数计算等内容的材料。作为接地网状态评估的载体，接地分析软件扮演了不可替代的角色，随着接地技术和计算机技术的发展，采用数值分析方法已能够全面考虑接地网的实际结构，土壤实际分层结构，以及故障电流散流时的实际情况。为计算接地阻抗、电位分布、跨步电压和接触电压等接地系统特性参数，国外已出现了商业化的如 CDEGS 接地分析软件，我国已有部分高校、科研机构、设计院和电力企业引入了该软件，同时国内的高校也开发了相应的接地分析软件，但接地网安全性状态评估的总体应用情况不理想，部分单位对软件的应用尚处于空白，远远不能满足发电厂、变电站接地网状态工作的形势要求。

笔者长期从事接地网现场测试和状态评估工作，跟踪接地网新技术的发展多年，尤其是近年较为热门的接地网状态评估技术。广东电网公司电力科学研究院作为国内最大省级电网技术支持中心的良好平台，通过积极引进和消化 CDEGS 软件，借鉴兄弟省开展接地网状态评估的经验，在广东电网进行了适用性研究，从运行年久或重要的 500kV 变电站开始，逐步开展变电站接地网安全性状态评估工作，已完成近 50 个运行年久、负荷较大或腐蚀较为

严重的变电站接地网状态评估，利用与国内外同行交流的机会，积累了较为丰富的经验。笔者感觉有必要将积累的评估经验和体会进行归纳梳理，与同行们分享，希望起到抛砖引玉的作用，共同为推进电力系统发电厂、变电站接地网状态评估工作，提升接地网设计、施工和运行维护水平作出应有的努力，顺应接地技术发展的趋势。

本书针对目前国内发电厂、变电站接地网工作刚刚起步，部分地区的工作基础比较薄弱，一些关键的技术观念比较模糊，认识误区较多，技术手段落后，工作方法上缺乏统一规范和认识的现状，在总结归纳主要接地理论基础上，结合现有的国家标准和行业规程，总结广东电网近年来的评估工作经验，以大量的接地网状态评估案例作为支撑材料，就接地网状态评估的工作模式和内容，以及接地分析软件的应用等问题详细进行了论述，同时提供广东电网的评估经验和案例以期进行分享。

本书主要以广东电网公司电力科学研究院近年来的变电站接地网状态评估工作为基础，总结了大量的评估实例作为支撑，除了结合案例介绍接地网状态评估工作的具体内容、判断标准、评估结论和整改建议外，还进一步介绍了接地网安全性状态评估在接地网运行维护、大修改造和基建设计中应用的模式和案例，以提高接地网状态评估工作的层次。由于着眼于现场使用，达到与教科书的理论介绍相辅相成的目的，不失为教科书的有益补充。

本书共 13 章，先简单论述了接地网安全性状态评估的必要性，现场测量技术和接地网数值仿真计算基础理论，这部分不是本书的重点，重点放在站址土壤分层结构分析和反演，接地网拓扑结构和接地阻抗计算，接地短路故障时地线分流和入地电流、接地网电位升高和场区电位差、地表电势、跨步电压和接触电压计算，雷电波侵入状态下接地网特性参数分布，接地网导体腐蚀性诊断，接地网完整性和导通性，接地网导体热稳定校核等方面，对每部分内容均给出了具体的案例。对采用离子接地极情形下接地网拓扑结构的模拟进行了探讨。针对上述评估内容，给出了广东地区有代表性变电站接地网状态评估存在的共性问题 and 对策的分析和评价。最后，结合具体的工程案例，对接地网安全性状态评估在接地网运行维护、大修改造和基建设计中的应用进行了探讨和总结，如发现变电站接地网基建阶段遗留的问题、对变电站考虑外扩接地网被破坏后接地网状态的预测、采用加密网格降低变电站场区接触电压水平的原理性整改设计、在低土壤电阻率站址变电站接地网完善化设计中的应用、在高土壤电阻率变电站接地网降阻改造工程设计中的应用、站址分层土壤电阻率对接地网特性参数的影响，在城区变电站、普通常规变电站接地网和特殊用途接地网设计中的应用等。

本书的编写目的是为了帮助基层技术人员、试验班组人员、实习人员和新入职的培训人员在学习了解接地基本概念和基础理论知识的基础上，熟悉接地网安全性状态评估的内容和方法，实用性较强。对于高等院校电气工程专业的在校学生、研究生来说，是理解和巩固接地技术理论知识的不可多得的参考用书；对于基层单位来说，不失为一本较为全面的培训教材。

居一峰对本书的编写作出了很大贡献，本书第 5、6 章和第 13 章的部分内容引用了笔者指导居一峰开展的项目研究成果，第 10 章部分内容引用了豆朋高工的工作成果，饶章权、田妍、肖磊石、王锦永等对本书的编写给予了大力支持，加拿大 SES 公司马金喜博士和李业旭博士，加华赛时公司付龙海博士和张曼女士，江苏电力科学研究院张劲松高工等对本书的编写给予了很大的帮助，对他们的辛勤付出，表示由衷的感谢。

本书编写参考和引用了清华大学、武汉大学、重庆大学和佛山供电局等单位的大量相关

论文、书籍和技术报告，部分正式出版物已列入参考文献中，在此深表谢意。

本书的编写得到武汉大学文习山教授、潘卓洪博士，清华大学何金良教授、曾嵘教授、张波副教授，广东电网公司电力科学研究院钟定珠教授级高工等的关心、指导和帮助。文习山教授审阅了全稿，提出了许多宝贵的改进意见，并欣然为本书作序。另外，还有很多同行为本书的出版提供了资料和意见，在此一并致以诚挚的谢意。

在本书的撰写和出版过程中，还得到了广东电网公司电力科学研究院郑晓光总工程师、高压所陈锐民所长和彭向阳副所长、技术研发部主任阚伟民主任等的关心、支持和帮助，在此一并感谢。

本书历时两年完成，期间得到了家人的大力支持和理解，谨以本书的出版回报他们的关爱和付出。

由于编者水平所限，难免有不足之处，恳请读者多提宝贵意见和建议。

编 著 者

2013年6月

序
前言

第 1 章 概述	1
1.1 发电厂和变电站的接地	1
1.2 接地网的作用及安全性	2
1.3 接地网的安全性指标	4
1.4 接地网全生命周期管理存在的问题	6
1.5 发电厂、变电站接地网安全性状态评估的必要性	9
1.6 发电厂、变电站接地网安全性状态评估的手段.....	10
1.7 发电厂、变电站接地网安全性状态评估的内容	12
1.8 接地网安全性特性参数的取值和安全限值要求.....	18
1.9 本章小结.....	23
第 2 章 发电厂、变电站接地网安全性状态评估现场测量	24
2.1 接地网安全性状态评估现场测量的意义.....	24
2.2 接地阻抗测量.....	25
2.3 跨步电压和接触电压测量.....	50
2.4 接地网电气完整性测试.....	52
2.5 接地网导体检查和腐蚀性诊断.....	54
2.6 站址视在土壤电阻率测量.....	58
2.7 接地网特性参数测试案例.....	61
2.8 本章小结.....	78
第 3 章 接地网数值仿真计算基础理论和接地分析软件	80
3.1 接地网特性参数的计算方法.....	80
3.2 数值分析方法的电磁场理论基础.....	81
3.3 分层土壤电阻率模型.....	82
3.4 接地网仿真计算分析基本方法.....	84
3.5 接地分析软件介绍.....	87

3.6	本章小结	94
第4章	发电厂、变电站站址土壤分层结构分析和反演	95
4.1	克服测量引线互感影响的视在土壤电阻率测量	95
4.2	基于接地分析软件的发电厂、变电站站址土壤结构分析	96
4.3	广东地区发电厂、变电站站址土壤结构分析及土壤条件评价	103
4.4	本章小结	112
第5章	发电厂、变电站接地网拓扑结构和接地阻抗计算	114
5.1	接地网拓扑结构的输入	114
5.2	基于接地网拓扑结构和站址土壤结构模型的接地阻抗仿真计算	116
5.3	离子接地极和深井爆破情形下接地网拓扑结构的模拟	120
5.4	广东地区变电站接地网接地阻抗分析和评价	125
5.5	本章小结	131
第6章	接地短路故障时地线分流和入地电流计算	133
6.1	地线分流的原理和分流系数计算方法	133
6.2	基于 CDEGS 软件的 FCDIST 模块的分流和入地电流计算	137
6.3	广东地区变电站单相接地故障电流和入地电流水平分析和评价	160
6.4	基于 CDEGS 软件仿真计算正确性的比对验证	163
6.5	本章小结	166
第7章	接地短路故障时接地网电位升高和场区电位差计算	168
7.1	变电站发生单相接地故障时接地网导体电位升高	168
7.2	基于 CDEGS 软件的 MALZ 模块的接地网电位升高计算	172
7.3	广东地区变电站单相接地故障时接地网导体电位升高分析和评价	181
7.4	本章小结	184
第8章	接地短路故障时地表电势、跨步电压和接触电压计算	186
8.1	变电站发生单相接地故障时场区地表电势分布、跨步电压和接触电压	186
8.2	基于 CDEGS 软件的 MALZ 模块的地表电势、跨步电压和接触电压计算	187
8.3	广东地区变电站单相接地故障时跨步电压和接触电压水平分析和评价	213
8.4	本章小结	219
第9章	发电厂、变电站雷电波侵入状态下接地网特性参数分布计算	221
9.1	雷电波侵入途径	221
9.2	基于 HIFREQ 和 FFTSES 模块对雷击状态下导体和地表电位分布的计算	222
9.3	基于雷击状态下接地网暂态电位升高对变电站二次设备运行的评估	235
9.4	本章小结	238
第10章	接地网导体热稳定校核	240
10.1	接地网导体热稳定	240
10.2	接地装置热稳定校验	240
10.3	本章小结	249
第11章	接地网安全性状态评估在发电厂、变电站接地网运行维护中的应用	250

11.1	发现变电站接地网基建阶段遗留的问题并提出整改措施	250
11.2	变电站考虑外扩接地网被破坏后接地网状态的预测	255
11.3	发电厂、变电站接地网安全性状态评估的主要结论	262
11.4	广东地区变电站接地网安全性状态评估发现的共性问题 and 对策	265
11.5	接地网安全性状态评估在变电站接地网运行维护中的应用	267
11.6	本章小结	269
第 12 章	接地网安全性状态评估在发电厂、变电站接地网大修改造中的应用	271
12.1	数值分析手段在运行发电厂、变电站接地网大修改造中的应用	271
12.2	采用加密网格降低变电站场区接触电压水平的原理性整改设计	272
12.3	接地网状态评估在低土壤电阻率站址变电站接地网完善化设计中的应用	280
12.4	接地网状态评价在高土壤电阻率变电站接地网降阻改造工程设计中的应用	288
12.5	本章小结	295
第 13 章	接地网安全性状态评估在发电厂、变电站接地网基建设计中的应用	297
13.1	数值分析手段在运行发电厂、变电站接地网基建设计中的应用	297
13.2	发电厂、变电站站址分层土壤电阻率对接地网特性参数的影响	298
13.3	接地网安全性评估在城区变电站接地网设计中的应用	304
13.4	接地网安全性评估在普通常规变电站接地网设计中的应用	313
13.5	接地网安全性评估在特殊用途接地网设计中的应用	325
13.6	本章小结	336
参考文献	338

概 述

1.1 发电厂和变电站的接地

在电力系统发电厂和变电站（包括换流站等）中，为了系统和设备正常运行，以及人员人身安全的需要，需将电力系统及电气设备的某些部分与大地做电气上的连接，构成了接地（grounding 或 earthing），从本质上讲，其目的就是为了在正常和事故以及雷击的情况下，利用大地作为接地电流回路的一个元件，从而限制设备接地处的电位升高。

按功能和目的不同，发电厂和变电站接地主要包括以下几种类型：

工作接地（working grounding），也称为系统接地，是指为保证电力系统的正常运行需要所设的电气装置接地（如中性点直接接地或经其他装置接地等）。

保护接地（protective grounding），也称为安全接地，是指电气装置的金属外壳、底座、配电装置的构架和线路杆塔等，由于绝缘损坏有可能带电，为防止其危及人身和设备的安全而设的接地。

雷电保护接地（lightning protective grounding），是指雷电保护装置，如避雷针、避雷线和避雷器，为了把雷电流泄放入地中，以消除过电压的危险影响而设的接地。

接地装置（grounding connection），是实现电力系统或建筑物电气装置、设施接地的功能系统，是埋入地中的接地体和接地线的总称。

发电厂和变电站接地系统（grounding system），是为实现上述接地而设置的接地装置，是埋入地中的接地极（接地体）和地上部分的接地线的总和。

接地极（grounding electrode），是指埋入地中并直接与大地（包括土壤、江、河、湖、井水）接触的金属导体，包括人工接地极和自然接地极两种形式。人工接地极则一般分为水平接地极和垂直接地极，在我国，水平接地极通常采用扁钢或圆钢，垂直接地极一般采用角钢。自然接地极则指兼起到接地极作用的直接与大地接触的各种金属导体、钢筋混凝土建筑物（构）的基础、金属管道和设备。

接地线（grounding conductor），是指电力设备应接地部位的接地端子与地下接地极之间的金属导体部分，也称为接地引下线，包括垂直和水平部分。

接地网（grounding grid），也简称地网，在本书特指发电厂和变电站用，兼有泄流和均压作用的较大型的水平网状接地装置，通常由水平接地极和垂直接地极组成，为了降阻需要，还包括深井接地极、电解离子接地极和接地模块等。

对于大型接地网的定义，习惯上采用接地网的面积来划分，一般指 110kV 及以上电压等级变电站的接地网，装机容量 200MW 以上的火电厂和水电厂的接地网，或者等效面积在 5000m² 以上的接地网；但近年来，GIS 的广泛应用，接地网短路容量迅速增加，采用 GIS

的变电站虽然接地网面积小了，但接地网面临的问题同等严重，应兼顾实际情况，将电压等级考虑到大型接地网的定义和划分中。

1.2 接地网的作用及安全性

发电厂和变电站接地网是变电站设备的重要组成部分，首先它为变电站内各种电气设备提供公共参考地，更重要的是在系统发生接地故障时起到快速泄放故障电流，改善接地网金属导体和场区地表地电位分布的作用，保障故障状态下一、二次设备和人员安全。

由于土壤散流特性的限制，系统发生接地短路故障时，强大的短路电流流经接地网将使接地电极及其周围的土壤发热，电流在接地体上的压降将引起接地体电位升高；另外，电流离开接地体在地中扩散时，在地面上出现的电位梯度会使人体遭受接触电压和跨步电压的作用。接地装置运行状态的好坏与否将直接影响到电网安全运行、事故状态下的设备安全和人身安全，如接地网接地阻抗偏大，或短路电流水平偏高，地电位升高、接触电压和跨步电压可能危及设备和人员的安全。

据不完全统计，我国每年电网运行事故中有 30% 是由于接地网的缺陷或不良直接引起，或间接导致已发生其他事故进一步扩大，严重影响了电网的安全和稳定运行，我国曾发生多起因接地网性能不良或接地网特性参数不满足运行要求而引起的恶性事故，每次接地事故产生的直接经济损失大约在数十万元到几千万元，而由于电力系统事故造成的停电所带来的间接经济损失则更大。

湖北某变电站地处高土壤电阻率地区，采用各种办法降低接地阻抗，结果接地阻抗仍高达 1.5Ω 。1986 年 4 月 5 日，该变电站 35kV 系统遭受雷击，由于线路故障引入变电站，35kV 设备多处放电、燃烧，并发展为相间短路，使不合格的接地网（ $\phi 8\text{mm}$ 圆钢）承受超过热稳定极限的接地短路电流而被烧断，引起局部接地网电位升高，高电位窜入二次系统，击穿直流二次操作控制回路和保护装置电缆及通信电缆，造成站用电源中断；35kV 系统二次设备、通信载波机损坏，通信中断；造成 110kV 主变压器烧毁以及其他大量设备损坏，事故损失达 3000 万元。

1999 年 7 月 20 日，太原某变电站发生特大全站停电事故，事故起因是 8023 插头柜三相短路的较小故障，但由于开关柜接地线与主接地网未连接，造成开关柜高电位，由于接地网泄流能力差形成反击过电压损坏了直流电源系统，造成直流电控制电源失效而不能及时切除故障，导致了事故的扩大。事故造成一台 220kV 变压器（150MVA）烧毁，10kV 的 B 段配电设备、主控室全部二次设备等严重烧损，并扩大到华北电网，致使部分发电厂共计 10 台发电机组发生相继跳闸的系统事故。

江西某发电厂土壤电阻率较高，接地网接地阻抗为 0.69Ω ，开关场最大短路电流为 8kA，1984 年 7 月 31 日，在 110kV 倒闸运行操作中，I 母线 GW4-110 隔离开关 B 相头部断落，甩到 II 母线同相隔离开关上，形成单相接地短路故障，短路电流 6.8kA，地电位升高达 4.7kV，高压窜入电气、热工二次系统，引发全厂停电和 50MW 的 6 号汽轮机超速的严重事故，直接损失达 1300 万元。

1986 年广西某发电厂由于接地网缺陷而引起接地事故，二次电缆端子排烧坏，二次设备烧毁，一台 10MW 的发电机损坏，最后导致全厂停电的重大事故。事故损失达 2000

万元。

1991年某电网一个110kV变电站发生了35kV开关站短路接地。由于接地装置存在问题，使一次系统故障扩大到二次系统，造成全站失电，一、二次设备大量损坏。

1996年12月4日，山东烟台220kV某变电站1号主变压器由于110kV侧中性点接地不良，在110kV幸山线A相同期TV发生污闪时，大电流窜入二次系统，造成直流电源消失，保护拒动，引发全站停电事故，二次设备损坏严重。

总结分析我国已发生的接地网事故，可得出影响接地装置安全性的主要因素有：

(1) 设计阶段存在着接地网布置不合理，考虑因素不周全等弊端。

(2) 施工单位没有严格按合理的设计进行施工，为以后接地网事故的发生埋下隐患。

(3) 随着地区经济的发展，电网系统容量不断增加，接地故障电流水平不断升高，1000kV特高压系统短路电流已达到了70kA，500kV变电站单相接地短路故障电流普遍达到40~50kA，部分负荷较大的220kV变电站则达到40kA以上，给降低接地网电位升高、场区电位差、跨步电压和接触电压水平增加了难度。

(4) 随着电压等级增加，发电厂、变电站（换流站）接地网面积相应增大，接地网电位升高不平衡度和场区电位差增大，增加了二次系统和二次电缆的安全运行风险。

(5) 接地装置属于隐蔽工程，常年处于地下，由于自然界不可抗拒力的作用，随着接地网运行年限增加，金属体会出现不同程度的腐蚀，尤其是湿度和酸碱度较高地区，接地网导体局部范围腐蚀严重，致使接地网的热稳定能力下降。接地网导体及接地引下线的腐蚀，甚至断裂，将使接地网的电气连接性能变坏。若遇接地短路故障，将造成接地网本身局部电位差和接地网电位异常增加，除给运行人员带来威胁外，还可能因反击或电缆外皮环流使得二次设备的绝缘遭到破坏，严重者可能导致监测或控制设备发生误动或拒动而扩大事故。据有关部门统计，全国每年电网运行事故中有30%是由于接地装置的缺陷直接引起或间接导致已发生其他事故进一步扩大，严重影响了电网的安全、稳定运行。

(6) 系统短路电流水平不断增加，部分变电站原设计接地网导体热容量越来越不能满足电网的实际运行容量的要求；随着接地网运行年限的增加，接地网局部范围腐蚀致使接地网的热稳定能力下降，给接地网安全运行留下隐患。

(7) 由于日常运行、维护以及预试中未能严格按照相关规程及导则进行合理的维护和测量，为以后的事故发生埋下隐患。

在高土壤电阻率地区，当接地阻抗难以满足要求，接地网泄流能力不满足要求时，有可能发生以下几种后果：

(1) 接地网电位升高，转移电位引起的危害，尤其是可能将接地网的高电位引向发电厂和变电站外或将低电位引向发电厂和变电站内的设施。

(2) 当接地网电位升高时，由于短路电流的影响，发电厂、变电站内的3~10kV避雷器可能动作并导致损坏。

(3) 有的地带的接触电压和跨步电压超过安全限值，对人身安全构成危险。

事实上，类似以上由于接地网直接引起的电力系统事故较少，而隐性事故却大量存在。由于接地网性能不良或特性参数不满足运行要求，在接地短路故障状态下，或者遭受雷击（雷直击站内避雷针或近区雷击）时，可能导致接地网局部电位和电位差异常升高，给一、二次设备和人员带来潜在威胁，更重要的是将可能因接地网电位过高、反击或电缆外皮环流

使得二次系统绝缘遭到破坏,或造成强烈的电磁骚扰,或二次系统正常工作条件遭破坏,严重者可能导致监测、控制或保护设备误动或拒动而间接导致事故扩大,事故状态下站内和站外人员安全风险等隐性事故则普遍存在,可能带来巨大的经济损失和社会影响。

随着我国电网的高速发展,系统容量显著增加,入地短路电流水平持续升高;电力技术的日新月异,变电站自动化程度提高,带来了数字化电子设备和弱电子设备的普遍应用,数字化变电站将雨后春笋般涌现,其抗电磁骚扰能力和绝缘水平普遍较低,接地工作条件非常严格,电磁兼容问题日益突出;而与之不相适应的是变电站和出线走廊的征地越来越困难、变电站和线路杆塔的土壤条件越发恶劣,在这个大背景下,二次设备和微电子设备对接地网电位升高和场区压差等安全性指标的要求逐步提高,电网的稳定运行对接地网的安全可靠性提出了越来越严格的要求。

1.3 接地网的安全性指标

发电厂、变电站接地网对电力系统的安全、稳定运行有着极为重要的作用,属于过电压保护装置的范畴,其性能的好坏直接关系到人身、设备和电网的安全。

接地网特性参数是综合反映接地网状况的参数,尤其反映了发生接地短路故障时接地网的安全性能,包括接地阻抗、接地网导体电位升高和电位差、地线分流和分流系数、场区跨步电压和接触电压、电气完整性、场区地表电位梯度和转移电位等参数和指标,它们决定了故障时变电站场区设备和人员的安全性,是衡量变电站接地网性能好坏的主要指标,而接地阻抗值只是接地网散流性能好坏的一个宏观反映。接地网特性参数指标一方面取决于接地网泄流能力,另一方面,则取决于实际入地短路电流水平高低,而后者与站址土壤电阻率高低、地网接地阻抗大小和架空地线的分流贡献等因素有关。

本书与发电厂、变电站接地网安全性相关的特性参数和术语如下:

1. 接地阻抗 (ground impedance)

反映接地网散流能力的宏观量化指标,是衡量接地网性能最基本的特性参数,指接地网对地阻抗和接地线电阻的总和。由于历史原因,接地网一直沿用的是接地电阻 (ground resistance) 的概念,但由于接地网感性部分的存在,严格地说,应称为接地阻抗,即接地网对远方电位零点的阻抗,数值上为接地网与远方电位零点间的电位差,与通过接地网流入地中的电流的比值。对于大型接地网,其感性分量所占的比例较大,不能忽略,应引用接地阻抗的概念。

2. 接地网电位升高 (grounding potential rise, GPR)

电流(主要指变电站发生接地故障时的入地短路故障电流)经接地网流入大地时,接地网与大地零电位点之间的电位差,也可称为地电位升高。

3. 接地网电位差 (grounding potential difference, GPD)

习惯上将接地网作为等电位网来考虑,由于水平接地网(我国普遍采用钢材质)电阻率和磁导率较大,接地网非等电位分布特性较为明显,即当接地网通过故障电流时,接地网的电网分布实际上是不均匀的,接地网上不同两点之间存在电位差,也称为场区压差。当故障电流较大时,该电位差甚至达到数百伏,该电位差是造成控制电缆烧毁的主要原因之一。为便于操作,常考核场区最大电位差,或最大压差。

由于材质电阻率的差异，一般地，铜质接地网的电位分布较为均衡，接地网电位差较小；而钢材质接地网内部则呈现一定的电位差。

4. 地线分流 (fault current in ground wires) 和地线分流系数 (fault current division coefficient)

发电厂和变电站内发生接地短路故障时，由于运行变电站存在架空出线和电力电缆出线，出线线路杆塔和电力电缆终端（包括电缆分接箱）接地装置的存在，架空避雷线（包括普通地线和 OPGW 光纤地线）和电缆外护套将向外流出部分故障电流，导致接地网实际散流的故障电流减少。一般地，110kV 及以上电压等级的电力电缆外护套非两端接地（一端经电缆护层保护器接地），不会引起分流；而 110kV 以下电压等级的电力电缆外护套通常采用两端接地，对故障电流或测试电流将造成一定程度的分流。

地线分流系数为架空地线和电缆外护套对注入接地网故障电流的分流与故障电流的比值。

由于架空地线、杆塔接地网、电缆外护套和对侧接地装置感性分量的存在，各分流与故障电流之间存在一定的相位差，对分流系数和实际入地电流的严格处理方法应进行相量和运算，而不是简单的模代数和。

5. 中性点环流 (transformer neutral point current)

发电厂和变电站内发生接地短路故障时，从故障点经过接地网部分导体流回主变压器中性点的电流。

6. 接地网的电气完整性 (electric integrity of grounding connection)

指接地网中应该接地的各种电气设备之间，接地网的各部分及与各设备之间的电气连接性，即直流电阻值，也称为电气导通性。

7. 跨步电压或跨步电位差 (step potential difference)

接地短路（故障）电流流过接地网时，地面上水平距离为 1.0m 的两点间的电位差，反映人体两脚接触地面两点间的电位差。接地网外的地面上水平距离 1.0m 处对接地网边缘接地极的电位差，称为最大跨步电位差。

8. 接触电压或接触电位差 (touch potential difference)

接地短路（故障）电流流过接地网时，大地表面形成分布电位，人体两脚站在地面离设备水平距离为 1.0m 处与人手接触设备外壳、构架或墙壁离地面垂直距离 1.8m 处的两点间的电位差。主网孔中心对接地网接地极的最大电位差，称为最大接触电位差。

有习惯上称为跨步电势和接触电势的，但从定义和测试方法上看，称跨步电位差和接触电位差更准确，DL/T 621—1997《交流电气装置的接地》也采用这个称谓。

9. 场区地表电位梯度 (surface potential distribution)

指当接地短路电流或试验电流流过接地网时，被试接地网所在的场区地表面形成的电位梯度。通过测试电位梯度曲线分析评估地下接地网的状况，以整个场区为测试对象。

10. 转移电位 (diverting potential)

接地短路（故障）电流流过接地网时，由一端与接地网连接的金属导体传递的接地网对地电位。

11. 入地故障短路电流 (grid fault current)

发电厂和变电站发生短路故障时，由系统提供的经接地网泄放的入地故障电流，包括单