国家重点基础研究发展计划资助
(2004CB217900)

大型互联电网运行可靠性研究系列图书

电力受端系统的动态特性及安全性评价

汤涌 贺仁睦 鞠平 李兴源

清华大学出版社

电力受端系统的动态特性及安全性评价

汤　涌　贺仁睦　鞠　平　李兴源

清华大学出版社
北　京

内 容 简 介

本书阐述了电力受端系统的动态特性及安全性评价的基础理论和研究方法。全书分为4篇，主要内容包括：第1篇，电力系统电压稳定性的定义、机理、特征，暂态及中长期电压稳定判据、算法实现等基础理论和方法；第2篇，电力受端系统广义负荷特性和负荷建模；第3篇，动态等值的基础理论和方法；第4篇，交直流混合输电系统的交互影响以及直流系统换流站换相失败的机理。

本书可供高等院校电力系统专业的研究生以及从事电力系统运行、规划设计和科学研究的人员参考。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989　13701121933

图书在版编目（CIP）数据

电力受端系统的动态特性及安全性评价/汤涌等著. --北京：清华大学出版社，2010.12
（大型互联电网运行可靠性研究系列图书/周孝信主编）
ISBN 978-7-302-24080-8

Ⅰ. ①电… Ⅱ. ①汤… Ⅲ. ①电力系统－动态特性－研究 ②电力系统－安全性－评价
Ⅳ. ①TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第225770号

责任编辑：张占奎
责任校对：赵丽敏
责任印制：

出版发行：清华大学出版社　　**地　　址**：北京清华大学学研大厦A座
http://www.tup.com.cn　　**邮　　编**：100084
社　总　机：010-62770175　　**邮　购**：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 刷 者：
装 订 者：
经　　销：全国新华书店
开　　本：185×260　　**印　张**：27.25　　**字　数**：634千字
版　　次：2010年12月第1版　　**印　次**：2010年12月第1次印刷
印　　数：1～0000
定　　价：0.00元

产品编号：-

大型互联电网运行可靠性研究系列图书
编辑委员会

主　　编　周孝信

副 主 编　郭剑波　孙元章

编　　委（按姓氏笔画）

王锡凡　白晓民　刘文华　孙元章

汤　涌　汤广福　张伯明　李亚楼

沈　沉　周孝信　周家启　郭剑波

曹一家　梁曦东　程时杰　薛禹胜

编委会办公室　刘应梅

序　言

20世纪90年代以来，国内外相继发生了多次大规模的停电事故，造成了严重损失。这些事故大多是在大型互联电网内发生的。其显著特点是由单一故障引发多重故障，由局部地区小范围扩展到广大地区的大范围，并最终导致大面积停电甚至全网崩溃。造成电网大面积停电的原因已不再是单一的暂态稳定性、电压稳定性或小干扰稳定性破坏，而是在故障持续过程中电网内发生大范围电力负荷转移，发、输变电设备和线路过负荷或低电压效应跳闸、局部电网电压稳定性或暂态稳定性破坏、负阻尼低频振荡、电网解列、频率异常升高或降低等现象相互交织，呈现连锁反应的演化过程。

本世纪初期，国内外已有的电网调度和安全稳定技术还难以正确应对类似于这种连锁反应式的故障。继电保护装置作为电网安全稳定的第一道防线起着十分重要的作用，然而多起大停电事故表明，即使保护装置正确动作，对那种过负荷连锁反应式的故障的演化也无能为力；此外，保护装置可能存在的“隐性失效”又会起着推波助澜的作用，使连锁反应事故扩大；电网中装设的安全稳定控制装置也缺乏应对连锁故障的能力。当时的电网调度自动化系统，基本上只能实现基于稳态状态监测的调度功能；在电网在线安全监控方面，防止过负荷采用的是 $N-1$ 静态安全分析；对暂态稳定破坏的防范，则是采用基于典型运行方式的离线计算给出稳定极限在线应用的简单方式，也就是通过电网离线分析，针对预期出现的故障，检验电网能否承受，然后将分析结果用于实际运行的在线指导。几次大事故的教训表明，在连锁故障过程中的运行和故障模式是离线分析所未能预计到的，而实际故障发生后对系统的状况又缺乏全面掌握和分析的手段，未能作出正确的判断和处理，从而导致事故的扩大。

长期以来，为了解决电网运行的安全稳定性问题，国内外学术界和工业界进行了大量的研究和实践。尤其是国内，多年来在电网分析方法和软件、安全稳定控制理论、继电保护和安全稳定装置等领域做了大量研究、开发工作，并在实际系统中得到广泛应用。20世纪80年代中期开始，我国电力主管部门针对国内电网实际相继制订和修订了《电力系统安全稳定导则》和《电力系统技术导则》，用以指导电网的规划设计和运行，大大提高了电网的安全运行水平，使电网稳定性破坏事故发生的频率大幅度降低。然而在针对上述互联电网的安全稳定运行新情况、新问题的解决方面，既无充分的理论基础，又无相应关键技术，也缺乏在线应用的平台和工具支持。

在此背景下，我们于2004—2009年承担了国家重点基础研究发展计划（“973”计划）“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”项目的研究工作。针对当时和未来我国电网大规模互联出现的问题，以及电网一次设备和二次系统技术进步的现状和前景，对电网的安全稳定性问题进行了新的基础性和前瞻性的研究，以便为解决新形势下电网的安全稳定性运行问题奠定理论和关键技术的基础。根据项目批准的计划，研究工作主要围绕四个方面的科学问题展开：①大规模电力网络特性和大面积停电机理；②大型互联电网的仿真计算方法；③大型互联电网在线运行可靠性评估、预警及决策理论；④提高电网的输电能力和输变电设备可靠性的关键技术基础。基于以上四方面的科学问题，立项时设置了七个课题。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

项目中期评估时，根据专家意见将原来分散在多个课题中的关于运行可靠性理论的研究内容集中起来，调整为第8课题。其中第1课题“电力受端系统的动态特性及安全性评价的基础研究”，由中国电力科学研究院、华北电力大学、河海大学和四川大学共同完成；第2课题“大电网安全性评估的系统复杂性理论研究”，由浙江大学、中国电力科学研究院和清华港大深圳电力系统研究所共同完成；第3课题“大型互联电网分布式计算理论和方法研究”，由清华大学和中国电力科学研究院共同完成；第4课题“大型互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统”，由中国电力科学研究院、清华大学和天津大学共同完成；第5课题“电力市场对电力系统运行可靠性的影响研究”，由国网电力科学研究院（原国网南京自动化研究院）和西安交通大学共同完成；第6课题“提高超高压交流输电线路输送能力的研究”，由清华大学、华中科技大学和上海电缆研究所共同完成；第7课题“提高电网可靠性的大功率电力电子技术基础理论研究”，由中国电力科学研究院和清华大学共同完成；第8课题“大型互联电网在线运行可靠性的基础理论研究”，由清华大学、重庆大学和合肥工业大学共同完成。

通过五年的研究，本项目在基础性理论研究、前瞻性关键技术研究和基础性应用平台建设三方面取得了较大的进展。

（1）在基础性理论研究方面，提出并建立了电力系统运行可靠性理论和分析方法；发展完善了电力受端系统建模分析的理论和方法；将系统复杂性理论应用于大电网安全评估分析；提出了大功率电力电子装置的等效试验理论和方法；提出了研究电力市场与电网安全运行相互影响的理论方法。

（2）在前瞻性关键技术研究方面，研究建立了大型互联电网分布式计算理论、方法和技术；大型互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统的理论、方法和技术；提高电网运行可靠性的大功率电力电子技术；提高超特高压交流输电线路输送能力的柔性紧凑型输电技术。

（3）在基础性应用平台建设方面，研究建立了互联电网分布式计算试验平台；互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统平台；电力市场与电力系统安全运行仿真试验平台；大功率电力电子装置和系统仿真试验平台。

本项目的研究成果既能满足国家提高大型互联电网运行可靠性的重大需求，也为未来国家骨干电网建设、新能源电力接入、智能电网建设提供重要的技术储备。项目取得的部分成果已应用于实际工程。如在电力系统在线分析、预警及决策支持方面，解决了联网在线仿真计算面临的资源分散、数据异构的矛盾，实现了运行电网的在线安全分析从静态分析到动态分析的跨越；基于等效试验理论和方法所研制的大功率电力电子试验平台已成功地用于我国自主研制的特高压直流输电换流阀试验。部分成果还有待进一步完善后，在未来电网运行和发展中发挥作用，还有一部分前瞻性创新成果将为本领域技术的进一步发展奠定基础和提供支撑。

本系列图书是在项目各课题研究报告基础上对成果的进一步总结和深化。本系列图书共分十册，第1课题、第2课题、第3课题、第4课题、第7课题、第8课题各有一册，第5课题、第6课题分别有两册。第1册《电力受端系统的动态特性及安全性评价》由汤涌教授级高工主编，第2册《大电网安全性评估的系统复杂性理论》由曹一家教授和郭剑波教授级高工主编，第3册《大型互联电网分布式计算理论与方法》由沈沉教授和李亚楼博士主编，

第4册《大型互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统》由白晓民教授级高工和张伯明教授主编，第5册《电力市场对电力系统运行可靠性的影响(一)》由薛禹胜院士主编，第6册《电力市场对电力系统运行可靠性的影响(二)》由王锡凡院士主编，第7册《提高超高压交流输电线路的输送能力(一)》由梁曦东教授主编，第8册《提高超高压交流输电线路的输送能力(二)》由程时杰院士主编，第9册《提高电网可靠性的大功率电力电子技术基础理论》由汤广福教授级高工和刘文华教授主编，第10册《大型互联电网在线运行可靠性的基础理论》由孙元章教授和周家启教授主编。周孝信院士作为本项目的首席科学家负责系列图书的总编和统稿。刘应梅博士在本项目的科学管理和系列图书的出版中做出很大贡献。在本系列图书出版之际，对项目的首席科学家助理郭剑波教授级高工和孙元章教授，对项目专家组成员韩祯祥院士、孙才新院士、赵遵廉教授级高工、孙嘉平教授级高工，对参与项目的所有研究人员和工作人员做出的贡献表示衷心感谢！对科技部和中国电力科学研究院、清华大学等项目承担单位的大力支持表示衷心感谢！对清华大学出版社张占奎编辑为本系列图书的出版所做出的努力表示衷心感谢！

周孝信

2010年11月于北京

前　言

“电力受端系统的动态特性及安全性评价的基础研究”是2004年国家“973”计划“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”项目中的第1子课题(课题编号2004CB217901),由中国电力科学研究院、华北电力大学、河海大学、四川大学四家单位共同承担。本书主要研究了电力受端系统广义负荷特性及动态等值方法、电力受端系统暂态及中长期电压稳定的机理以及超高压交直流混合输电系统的交互影响和直流系统换流站换相失败的机理。

本书《电力受端系统的动态特性及安全性评价》共分为4篇。

第1篇“电力受端系统暂态及中长期电压稳定的机理和判据研究”由中国电力科学研究院承担,主要成员:汤涌、孙华东、仲悟之、林伟芳、易俊、马世英、张鑫、宋新立、侯俊贤、张东霞、邵瑶,主要编写人员:汤涌、孙华东、仲悟之、林伟芳、易俊。主要研究了受端系统暂态及中长期电压崩溃性机理,提出了电压稳定和电压崩溃的定义,研究了受端系统暂态和中长期电压稳定性的特征及其影响因素,通过理论分析和动态时域仿真,结合我国电网运行的实践经验,提出了暂态及中长期电压稳定性判据和仿真算法,研究了基于戴维南等值跟踪的暂态功角稳定和暂态电压稳定失稳模式判别方法和基于能量函数及奇异诱导分岔的失稳模式判别法,开发完善了暂态及中长期电压稳定仿真分析软件。

第2篇“电力受端系统广义负荷特性分析”由华北电力大学承担,主要成员:贺仁睦、马进、郑晓雨、韩冬、王吉利、王会琳、张璞、张国飞、曹媛、王刚,主要编写人员:贺仁睦、马进、郑晓雨、韩冬、王吉利。在回顾了负荷建模发展历程的基础上按照实测建模法的步骤对模型结构的确定、参数辨识方法的选择等问题进行了研究,并阐述了如何利用PMU数据建立负荷模型。为提高模型的实用性和泛化能力,应用聚类分析和支持向量机的方法对负荷的统计学特性进行了探讨,并采用概率分配法和随机响应面法研究负荷不确定性对仿真的影响。为解决新能源发展过程中常规负荷模型所面临的问题,深入分析了包含分布式新能源的广义负荷模型以及能够描述冲击性负荷的冲击负荷模型,进一步完善了负荷建模体系,拓展了负荷模型的使用范围。

第3篇“电力受端系统的动态等值理论”由河海大学承担,主要成员:鞠平、周海强、王万成、谢宏杰、王卫华、杨辉、吴磊、蒋周士、王舒琴、陈燕萍,主要编写人员:鞠平、周海强、王万成。主要研究了大型互联电网的动态等值建模,通过分层次方式进行网络动态等值,并就缓冲网络的确定和辨识的动态等值模型方程进行了深入研究;提出了计及动态负荷的动态等值方法和判别同调发电机群理论基础以及等值励磁和调速系统模型的方法和思路。分析了大规模非线性电网可辨识性方法和频域灵敏度,给出了基于同调方法模型结构采用辨识方法确定关键参数的方法。从理论上探讨了大规模非线性电网精确线性化模态方法,给出了基本框架和思路。

第4篇“超高压交、直流混合输电系统的交互影响和直流系统换流站换相失败的机理分析”由四川大学承担,主要成员:李兴源、刘天琪,以及研究生,主要编写人员:李兴源、刘天

琪。主要研究了互联交直流混合输电系统的交互影响及其稳定性，提出基于模态级数理论和符号计算代数的综合分析技术和互联交直流混合输电系统的非线性和分散协调控制器的多种设计方法，给出了交直流互联电网的机电和电磁暂态混合仿真方法，并建立了机电和电磁暂态混合仿真平台，分析了交流系统强度和多馈入直流系统耦合导纳等对换相失败的影响，以表示交流系统强度的短路比(SCR)或有效短路比(ESCR)、多馈入交互作用因子(MIIF)、换相失败免疫因子(CFII)为指标，进行了换相失败机理及其量化判据的研究。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　　录

第1篇　电力受端系统暂态及中长期电压稳定的机理和判据研究

第1章　概述 …… 3
1.1　电压稳定研究的目的和意义 …… 3
1.2　电压稳定的研究内容 …… 3
1.3　电压稳定的研究进展 …… 4
1.4　本课题的主要研究成果 …… 5
参考文献 …… 7
第2章　暂态及中长期电压稳定机理研究 …… 8
2.1　电压稳定性的定义 …… 9
2.2　电压失稳机理研究 …… 12
2.2.1　简单纯电阻电路电压稳定性 …… 12
2.2.2　简单纯电阻电路电压稳定性的数学描述 …… 14
2.2.3　交流电路的电压稳定性 …… 15
2.3　暂态电压失稳影响因素 …… 16
2.3.1　暂态电压失稳 …… 16
2.3.2　暂态电压失稳影响因素分析 …… 18
2.4　中长期电压稳定影响因素 …… 21
2.4.1　中长期电压稳定 …… 21
2.4.2　中长期电压失稳影响因素分析 …… 22
2.5　典型电压崩溃事故综述及电压崩溃特征分析 …… 22
2.5.1　典型电压崩溃事故综述 …… 23
2.5.2　暂态电压失稳的特征 …… 26
2.5.3　中长期电压失稳的特征 …… 26
2.6　小结 …… 27
参考文献 …… 27
第3章　暂态及中长期电压稳定判据研究 …… 30
3.1　暂态及中长期电压稳定判据研究现状 …… 30
3.2　基于时域仿真的戴维南等值参数跟踪计算方法 …… 32
3.2.1　数学描述 …… 33
3.2.2　准确性分析 …… 35
3.3　基于全微分的戴维南等值参数跟踪计算方法 …… 37
3.3.1　传统戴维南等值方法 …… 37

3.3.2 基于全微分的戴维南等值参数跟踪计算方法 …… 38
3.4 暂态及中长期电压稳定判据 …… 42
3.4.1 电压稳定判据的理论推导 …… 42
3.4.2 等阻抗法 …… 45
3.4.3 最大电磁功率法 …… 49
3.4.4 功率电流反向法 …… 54
3.5 小结 …… 60
参考文献 …… 60
第4章 暂态电压稳定与暂态功角稳定的判别 …… 62
4.1 基于戴维南等值跟踪的失稳模式判别 …… 63
4.1.1 理论基础 …… 63
4.1.2 简单电力系统的失稳模式判别 …… 64
4.1.3 复杂电力系统的失稳模式判别 …… 65
4.1.4 算例分析 …… 65
4.2 基于能量函数法和奇异诱导分岔的失稳模式判别 …… 68
4.2.1 研究现状 …… 68
4.2.2 理论基础 …… 69
4.2.3 算法原理 …… 78
4.2.4 算例分析 …… 81
4.3 小结 …… 84
参考文献 …… 84
第5章 交直流系统电压稳定分析 …… 86
5.1 多馈入短路比和临界短路比 …… 86
5.1.1 理论基础 …… 86
5.1.2 多馈入短路比定义 …… 89
5.1.3 多馈入短路比与单馈入短路比的关系 …… 94
5.1.4 多馈入临界短路比 …… 94
5.2 多馈入短路比与电压稳定性分析 …… 97
5.2.1 多馈入电压灵敏因子 …… 97
5.2.2 多馈入最大直流功率 …… 97
5.2.3 数学分析 …… 98
5.2.4 仿真分析 …… 102
5.3 小结 …… 104
参考文献 …… 105
第6章 暂态及中长期稳定算法研究和软件开发 …… 106
6.1 程序算法及流程图 …… 107
6.1.1 数值积分算法 …… 107
6.1.2 程序的流程图 …… 108
6.2 程序的仿真模型 …… 110

6.3　暂态及中长期电压稳定判据的实现 …… 112
6.4　算例验证 …… 114
6.4.1　算例一 …… 114
6.4.2　算例二 …… 116
6.5　小结 …… 120
参考文献 …… 121
附录 A　本课题成果 …… 123
A.1　论著 …… 123
A.2　专利 …… 123
A.3　其他 …… 124
附录 B　3 机 10 节点系统 …… 126
附录 C　WSCC 4 机 11 节点系统 …… 128
附录 D　NEW ENGLAND 10 机 39 节点系统 …… 129
附录 E　感应电动机负荷三阶机电暂态数学模型 …… 130

第 2 篇　电力受端系统广义负荷特性分析

第 7 章　概述 …… 133
7.1　负荷建模的研究意义 …… 133
7.2　负荷建模的研究内容 …… 133
7.3　负荷建模研究进程 …… 134
7.4　本课题的研究成果 …… 134
参考文献 …… 135
第 8 章　负荷建模基础理论研究 …… 136
8.1　负荷模型的种类 …… 136
8.2　TVA 负荷模型结构 …… 137
8.3　模型参数辨识方法研究 …… 139
8.3.1　参数综合优化算法 …… 139
8.3.2　参数辨识范围调整 …… 140
8.3.3　根据灵敏度对有功进行调整 …… 143
8.4　基于 PMU 的负荷建模 …… 145
8.4.1　PMU 相量数据获取方法 …… 145
8.4.2　PMU 数据的可辨识性研究 …… 146
8.4.3　实际 PMU 数据及处理 …… 147
8.4.4　基于 PMU 负荷建模实践 …… 148
8.5　小结 …… 150
参考文献 …… 150
第 9 章　负荷统计学特性研究 …… 151
9.1　负荷分类 …… 151
9.1.1　聚类分析 …… 151

9.1.2 特征向量选取…… 152
9.2 负荷空间降维和模型泛化 …… 157
9.2.1 负荷空间降维的必要性…… 157
9.2.2 支持向量机在负荷建模中的应用…… 159
9.3 小结 …… 165
参考文献…… 166
第 10 章 负荷的不确定性分析 …… 167
10.1 基于概率分配法的不确定性分析…… 167
10.1.1 概率分配法基本原理…… 167
10.1.2 概率分配法的适用性分析…… 169
10.2 基于随机响应面法的不确定性分析…… 170
10.2.1 随机响应面法基本原理…… 170
10.2.2 随机响应面法的适用性分析…… 173
10.3 负荷模型结构的不确定性分析…… 175
10.3.1 静态负荷模型的不确定性…… 175
10.3.2 综合负荷模型的不确定度…… 177
10.4 负荷模型参数的不确定性分析…… 178
10.4.1 实测负荷模型参数的有效性验证…… 179
10.4.2 极限切除时间下的不确定性分析…… 181
10.5 小结…… 183
参考文献…… 183
第 11 章 含分布式发电的负荷建模 …… 185
11.1 简介…… 185
11.2 含同步发电机的负荷建模…… 185
11.2.1 动态仿真系统介绍…… 185
11.2.2 同步发电机容量大小对负荷建模的影响…… 186
11.2.3 含同步发电机的负荷建模…… 188
11.2.4 异步机并联静特性负荷模型…… 191
11.2.5 异步机并联静特性模型仿真结果…… 191
11.3 含风电场的负荷建模…… 192
11.3.1 简介…… 192
11.3.2 风电场对负荷建模的影响…… 193
11.3.3 含风电场的负荷建模…… 194
11.4 小结…… 197
参考文献…… 197
第 12 章 电力系统冲击负荷建模 …… 199
12.1 冲击负荷建模思路…… 199
12.1.1 冲击负荷的范畴…… 199
12.1.2 冲击负荷建模思路…… 199

12.1.3　冲击负荷测量设备启动判据分析…… 200
12.2　冲击负荷生产特点分析…… 200
12.2.1　硅铁…… 200
12.2.2　电解铝…… 202
12.2.3　小结…… 204
12.3　冲击负荷的模型结构研究…… 204
12.4　冲击负荷的冲击特性建模…… 205
12.4.1　硅铁冲击负荷…… 205
12.4.2　模型检验…… 206
12.4.3　分析讨论…… 206
12.5　冲击负荷的负荷特性建模…… 207
12.5.1　异步电动机综合负荷模型…… 207
12.5.2　10％异步电动机＋90％恒电流…… 208
12.5.3　配网阻抗模型…… 209
12.5.4　本文提出的负荷模型…… 209
12.6　小结…… 210
参考文献…… 210
附录 F　本课题成果 …… 211
F.1　论著 …… 211
F.2　专利 …… 211
F.3　其他 …… 212
附录 G …… 213

第 3 篇　电力受端系统的动态等值理论

第 13 章　概述 …… 217
13.1　动态等值的目的意义…… 217
13.2　动态等值的研究内容…… 217
13.3　动态等值的研究进展…… 218
13.4　本课题的主要成果…… 219
参考文献…… 220
第 14 章　动态等值的方式 …… 222
14.1　动态等值的方式…… 222
14.2　异步迭代算法…… 223
14.2.1　基于灵敏度的校正算法…… 224
14.2.2　合理选择可调节点…… 225
14.2.3　算例分析…… 226
14.3　小结…… 229
参考文献…… 229

第 15 章 动态等值的模型 …… 230
15.1 动态等值模型的结构 …… 230
15.2 缓冲网节点的选择 …… 231
15.3 动态等值模型的方程 …… 232
15.3.1 以相角作为输入的模型 …… 232
15.3.2 以频率作为输入的模型 …… 233
15.4 小结 …… 234
参考文献 …… 234
第 16 章 动态等值的同调方法 …… 235
16.1 基本原理 …… 235
16.2 发电机群的动态等值 …… 236
16.2.1 同调发电机群的判别 …… 236
16.2.2 同调发电机母线的化简 …… 237
16.2.3 发电机本体的聚合 …… 239
16.2.4 励磁系统与 PSS 的聚合 …… 241
16.2.5 原动机调速系统的聚合 …… 248
16.3 电动机群的动态等值 …… 253
16.3.1 基本原理 …… 253
16.3.2 电动机群的判别 …… 254
16.3.3 电动机负荷母线的化简 …… 255
16.3.4 电动机负荷的参数聚合 …… 255
16.3.5 不同负荷模型影响对比 …… 255
16.4 剩余网络的化简 …… 258
16.4.1 REI 法 …… 258
16.4.2 CSR 法 …… 258
16.5 小结 …… 259
参考文献 …… 260
第 17 章 动态等值的辨识方法 …… 262
17.1 基本原理 …… 262
17.2 动态等值模型的结构特性 …… 262
17.2.1 参数灵敏度 …… 262
17.2.2 参数可辨识性 …… 266
17.2.3 参数辨识难易度 …… 272
17.3 动态等值模型的参数辨识 …… 272
17.4 动态等值的混合方法 …… 273
17.5 仿真算例 …… 274
17.6 工程实例 …… 276
17.7 小结 …… 277
参考文献 …… 277

第 18 章　动态等值的模态方法 …… 278
18.1　近似线性化模态方法 …… 278
18.1.1　基本步骤 …… 278
18.1.2　主要问题 …… 278
18.2　精确线性化模态方法 …… 279
18.2.1　结构分解 …… 279
18.2.2　精确线性化模态等值 …… 280
18.2.3　总体框架 …… 284
18.3　小结 …… 285
参考文献 …… 285
第 19 章　动态等值软件开发 …… 286
19.1　软件结构与算法流程 …… 286
19.2　算例 …… 289
附录 H　本课题成果 …… 292
H.1　论著 …… 292
H.2　其他 …… 293
附录 I　IEEE 39 节点系统 …… 294

第 4 篇　超高压交、直流混合输电系统的交互影响和直流系统换流站换相失败的机理分析

第 20 章　概述 …… 301
20.1　本课题的研究意义 …… 301
20.2　本课题的研究内容及其成果 …… 302
参考文献 …… 302
第 21 章　交直流混合输电系统交互影响的模态级数分析 …… 304
21.1　非线性系统的模态级数表示 …… 305
21.2　数学模型 …… 306
21.2.1　交流系统模型 …… 306
21.2.2　直流系统模型 …… 307
21.2.3　发电机的电磁功率特性和 AC/DC 接口方程 …… 308
21.3　模态级数法的应用 …… 309
21.4　仿真算例分析 …… 310
21.5　小结 …… 312
参考文献 …… 312
第 22 章　交直流混合输电系统的优化控制措施 …… 314
22.1　基于模态级数法和轨迹灵敏度的励磁调节器参数的优化 …… 314
22.1.1　模态级数法简介 …… 314
22.1.2　数值微商算法 …… 315
22.1.3　励磁调节器参数优化设计 …… 316

22.1.4 仿真算例分析…… 316
22.2 考虑未建模动态的直流输电系统鲁棒自适应控制…… 320
22.2.1 带未建模动态的鲁棒自适应非线性控制原理简介…… 320
22.2.2 直流线路附加控制器设计…… 321
22.2.3 仿真算例分析…… 322
22.3 多馈入高压直流输电系统非线性附加控制器的设计…… 323
22.3.1 控制系统的数学模型…… 323
22.3.2 控制器设计…… 325
22.3.3 仿真算例分析…… 327
22.4 多馈入交直流输电系统的分散协调控制…… 328
22.4.1 基于可选择控制结构的部分输出量反馈最优分散协调控制…… 328
22.4.2 基于 PMU 的多馈入交直流系统的分散协调控制 …… 334
22.4.3 基于最优变目标的交直流混合输电系统分层协调控制…… 338
22.5 小结…… 344
参考文献…… 344
第 23 章 交直流混合输电系统的机电暂态和电磁暂态混合仿真 …… 346
23.1 典型数字仿真程序在交直流输电系统仿真中的应用…… 346
23.1.1 机电暂态仿真程序…… 346
23.1.2 电磁暂态仿真程序…… 347
23.1.3 本文采用的仿真程序…… 347
23.2 电力系统机电暂态和电磁暂态混合仿真的理论基础…… 347
23.2.1 机电暂态和电磁暂态数学模型…… 347
23.2.2 快、慢子系统的划分 …… 352
23.2.3 混合仿真模型的数据接口分析方法及其算法流程…… 352
23.2.4 双时标混合仿真方法…… 355
23.3 仿真算例分析…… 356
23.4 小结…… 359
参考文献…… 359
第 24 章 高压直流输电系统换相失败判断标准的理论分析研究 …… 361
24.1 数学模型的建立及机理分析…… 362
24.2 仿真算例分析…… 365
24.3 小结…… 367
参考文献…… 367
第 25 章 影响多馈入高压直流输电换相失败的因素 …… 369
25.1 系统强度对多馈入高压直流换相失败的影响…… 369
25.1.1 数学模型的建立及理论分析…… 369
25.1.2 仿真算例分析…… 375
25.2 耦合导纳对多馈入高压直流换相失败的影响…… 377
25.2.1 数学模型的建立及理论分析…… 377

需要全本请访问 www.ertongbook.com