

国家重点基础研究发展计划资助
(2004CB217300)

大型互联电网运行可靠性研究系列图书



大型互联电网在线运行 可靠性评估、预警和决策支持系统

白晓民 张伯明

清华大学出版社

内 容 简 介

本书对大型互联电网的运行可靠性在线评估理论和方法,在线故障诊断和安全预警理论和方法,保证其安全运行的在线分析平台和综合决策支持系统三方面进行了深入研究。通过理论分析和方法创新,系统地建立了大规模互联电网在线运行可靠性的安全评估理论、指标体系和分析方法,同时基于在线动态安全评估和预警系统总体设计,将在线数据接口以及在线分布式计算平台提高到工程化实用程度;提出了基于贝叶斯网络和协同式专家系统的方法应用于电力系统在线故障诊断和控制;研究系统动态变化趋势和连锁故障分析方法,提出连锁故障初期发展阶段中的扰动后预想事故分析方法,形成了连锁故障缓慢相继开断过程的诊断及分析综合方法的总体研究思路和综合诊断分析系统设计;完成了在线可靠性评估、安全预警及决策支持的系统平台各部分软件的设计开发工作;建立基于 EMS、WAMS、保护和故障信息系统等多数据源的大型电网动态安全评估、安全预警及决策支持系统平台,并集成为实用的大型电网动态安全监控系统。

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

大型互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统/白晓民,张伯明著. —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 978-7-302-24056-3

I. ①大… II. ①白… ②张… III. ①联合电网—电力系统运行—可靠性—评估—研究报告 ②联合电网—电力系统运行—预警系统—研究报告 ③联合电网—电力系统运行—决策支持系统—研究报告 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 200034 号

责任编辑:张占奎

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

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 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:25.75

字 数:598 千字

版 次:2010 年 12 月第 1 版

印 次:2010 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:90.00 元

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(按姓氏笔画排序)

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。

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 and 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发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 and 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

随着我国电力需求的快速增长,西电东输以及大区电网的互联,尤其是最近特高压输电线路的投入运行,我国现已基本实现了全国联网,建成为世界上少有的超大规模电网。电网的互联使电力系统规模越来越大,大量超高压、大容量电力设备和新型电力元件通过超大规模电网连接在一起,运行中这些电力元件之间发生的物理变化相互制约,相互影响,使得这样一个超级电网上发生的物理过程异常复杂,人类很难认识和把握;同时,电力系统的安全稳定问题日益突出,如我国电力系统在互联后出现的超低频振荡、可能隐藏的大负荷区暂态电压稳定、南方电网交直流系统并联运行相互影响等问题,不仅已成为影响我国电网稳定运行的安全隐患,也严重制约线路传输容量,造成巨大经济损失。提高大型互联电网运行可靠性、保证电网安全已成为我国电力系统面临的关键性和迫切性问题。

针对以上目标,项目组制定了第4课题的计划任务书,并在后期根据实际情况对任务书进行了进一步的调整;项目组紧密扣住大型互联电网的运行风险评估、安全预警和基于预防控制的决策支持系统这个中心展开研究工作,在各参加单位之间进行了有序的课题分工,研究内容各有侧重,从时间维、空间维和控制对象维3个维度开展课题研究,研究内容包括评估—预警—决策—控制等一条完整的主线,以这个主线为中心线索,将分课题有机结合,全面实施,重点突破,历时五年,在该课题的三个主要方面取得了重要进展(大型互联电网运行可靠性的在线评估的理论和方法;大型互联电网在线故障诊断和安全预警的理论和方法;保证大型互联电网安全运行的在线分析平台和综合决策支持系统),达到了预期目标。主要的成果有:

1. 解决了在线动态安全评估和预警系统问题,研究了在线暂态、动态和安全分析的系统分析技术,能够进行综合的安全稳定分析和预警,并实现综合的预防控制;在暂态稳定性评估、静态电压稳定域、电压稳定性计算指标、动态安全域等方面有理论创新。

在暂态稳定性的评估和快速判别方面,提出了一种新的基于连续法的不稳定平衡点求解方法,并根据暂态功角失稳的机理,提出了一种确定功率改变方向,计算相关不稳定平衡点的方法;对现有五种稳定边界二次近似方法进行了系统的比较研究,证明了其中三种的等价性,并分析了造成不同的原因,为稳定边界近似方法的进一步发展提供参考;构造了异步电动机模型的能量函数,结合包含异步电动机模型的不稳定平衡点求解方法,使直接法能够应用于包含异步电动机模型的电力系统;为了评价稳定边界近似的效果,提出了可信域的概念,可信域可用于判断直接法结果的可信性,还能用于近似稳定边界的拓展,通过联合 Taylor 展开近似和等能量面近似得到更大的有效近似区域;基于电力系统角半径的概念提出了一种新型的电力系统暂态稳定评估方法。该方法应用投影公式建立了故障后电力系统的一个二维一阶伴随系统,该伴随系统的稳定性行为与原电力系统一致。

在静态电压稳定分区和关键断面、计及(超)低频振荡的小扰动稳定安全域边界的实用表示和拓扑性质,以及基于安全域的输电系统概率安全性评估方面取得了突出的成果,对可保证静态电压稳定和可保证不出现(超)低频振荡的小扰动(动态)稳定安全域的边界性质、表达形式和快速求取方法等进行了深入研究,并基于静态电压安全域和动态安全域的相关

研究成果,开发了安全域的在线稳定监视和可视化系统,为大型互联电网的在线运行可靠性评估、预警和决策提供了有力的分析工具。

成功地完成了安全稳定评估相关理论研究以及原型电力系统仿真、电力系统在线动态安全评估和预警系统的开发工作。理论研究包括:安全稳定评估方法、基于数据挖掘的在线稳定判别技术和系统应用、调度辅助决策算法、在线稳定极限算法等。

2. 在大型互联电网在线故障诊断和预防控制决策的理论和方法方面,深入研究了故障诊断与分析问题的方法;成功地完成了电力系统在线动态安全评估和预警系统的开发工作。

在大型互联电网动态诊断与分析方法研究中,提出了基于复杂事件处理技术的故障信息分析方法,将基于贝叶斯网络和协同式专家系统的方法应用于电力系统在线故障诊断和控制,并搭建了模拟系统。提出了基于广域量测系统的保护误动拒动的快速诊断与分析方法。

在大型互联电网在线监控方法研究方面,为防范连锁故障,对电网的脆弱性进行了分析,开展了连锁故障初期扰动后的相继开断发展模式分析,研究了系统动态变化趋势和连锁故障分析方法,连锁故障初期发展阶段中的后续预想事故分析方法,形成了连锁故障缓慢相继开断过程的诊断及分析综合方法的总体研究思路和连锁故障缓慢相继开断综合诊断分析系统设计;并基于慢同调理论和图论的方法电网选择解列点,对电网的控制行为进行了基于广域量测系统的诊断尝试。

3. 在保证大型互联电网安全运行的在线分析平台和综合决策支持系统方面,提出了基于三维协调的新一代能量管理系统的体系结构设计和协调机制,实现了安全域在线监视和可视化,对在线可靠性评估、安全预警及决策支持的平台进行了研究开发。

从空间、时间和控制目标三个维度分析了新一代电网能量管理系统的设计原理,研究了每一个维度的协调技术,提出有效的解决方法。给出了三维协调的理论和设计思路,(空间维)提出了电网分布式建模和分解协调计算方法;(时间维)提出了不同时间尺度调度控制的协调策略;(目标维)提出了综合多目标的电网安全稳定评估、预警和决策支持的理论和方法;采用多智能代理技术设计了基于集群计算机的分布式并行计算支撑平台;报告了所研究的理论和实现技术在实际系统中的应用情况。

实现了系统集成和工程实现技术,在线分析平台和综合决策支持系统建设,建立和开发了动态监控功能的仿真实验系统。建立了一个基于 EMS、WAMS、故障信息系统等多数据源的大型电网动态安全评估、安全预警及决策支持系统平台。可以用于方法研究论证、仿真分析,并集成成为一套实用的大型电网动态安全监控系统。满足大规模系统在线调度需要,在实时数据应用以及在线分布式计算平台两个方面取得了重要进展,达到了工程化实用的程度。

本项目所开发的电力系统在线安全评估和预警系统依,托于先进的仿真手段和高效的调度策略,基于电力系统在线数据和动态信息,在给定的时间间隔内,对电力系统做出包括静态安全分析、暂态稳定、电压稳定和小干扰稳定在内的全面的稳定评估,给出稳定极限和调度策略,以保障电力系统的安全稳定运行。本项目研究成果的应用将为电网供电安全、建设坚强电网提供充分的技术保证。

电力系统在线动态安全评估和预警系统的研究和系统开发涉及如下方面的相关理论及技术:

(1) 并行计算平台的开发。并行计算平台为完成电力系统大批量在线/离线计算任务提供了有效的途径。该技术可充分利用计算资源,极大提高计算速度。并行计算平台为动态安全评估和预警系统包括的多个应用提供一个集成的并行运行环境。该平台实现如下功能:进行各个应用子系统的网络互连;监视和协调各个子系统的运行,保证整个系统在各种条件下可以安全稳定可靠的运行;提供人机交互可视化的手段。

(2) 有效的数据整合。将电网在线实时运行数据和已有的离线数据整合。当电网运行数据不完整时,利用离线数据进行补充,形成全网电网模型和运行数据。根据全网电网模型和运行数据进行整合潮流计算,得到结构完整的全网实时运行方式,为后续的高级分析应用提供初始分析数据。

(3) 在线安全稳定评估、预警及决策。对静态安全分析、暂态稳定、小干扰稳定和电压稳定等多种评估方法进行在线化改造,实现了全面准确的电力系统在线稳定分析及预决策;对于存在失稳隐患的运行方式,可以给出相应的调整建议;对于正常的运行方式,可以给出稳定极限。集电力系统运行的安全评估、预警和决策支持等功能于一体,兼备正常运行操作指导和事故状态的控制恢复功能,防患于未然。

本书是国家重点研究发展计划(“973”计划)项目第四课题——大型互联电网在线动态安全评估、预警及决策支持系统的研究报告。本课题的主要承担单位是中国电力科学研究院,协作单位是清华大学和天津大学。课题负责人白晓民(中国电力科学研究院)、张伯明(清华大学)。参与编写本书的人员主要有:中国电力科学研究院的吴中习、赵伟、王文平、丁剑、许婧、李再华、周子冠、方竹、李小珺、田芳、严剑峰、严亚勤、徐得超、于之虹、王文、何江等;清华大学的闵勇、孙宏斌、程林、吴文传等;天津大学的余贻鑫、房大中、曾沅、贾宏杰等。

目 录

第 1 篇 大型互联电网运行可靠性的在线评估理论和方法

第 1 章 电力系统暂态稳定性的评估和在线分析方法	3
1.1 暂态稳定性的评估和快速判别理论	3
1.1.1 引言	3
1.1.2 基于连续法的不稳定平衡点求解方法	4
1.1.3 稳定边界二次近似方法的比较研究	12
1.1.4 包含异步电动机模型的能量函数	14
1.1.5 稳定边界的可信域	16
1.1.6 小结	17
1.2 基于二维一阶伴随系统的电力系统暂态稳定在线分析方法	17
1.2.1 引言	17
1.2.2 电力系统的伴随二维一阶微分方程	18
1.2.3 基于伴随系统的电力系统的功角稳定性判据	20
1.2.4 投影能量函数及稳定极限的计算	27
1.2.5 电力系统暂态稳定故障扫描算法	30
1.2.6 算例分析	32
1.2.7 小结	35
第 2 章 电力系统电压稳定评估方法	36
2.1 割集空间静态电压稳定域	36
2.1.1 临界割集与割集空间	36
2.1.2 CVSR 边界的超平面表示	36
2.1.3 CVSR 边界实用表达式系数的计算	38
2.1.4 EPRI 1000 节点系统算例分析	38
2.1.5 小结	39
2.2 电压稳定分区和关键断面	40
2.2.1 谱聚类算法	40
2.2.2 电网电压稳定性分区算法	41
2.2.3 算法验证和应用	42
2.2.4 小结	44
第 3 章 电力系统小扰动稳定评估	45
3.1 电力系统小扰动稳定域	45
3.1.1 小扰动稳定域边界	45
3.1.2 小扰动稳定域边界与主导振荡模式的关系	46
3.1.3 小扰动稳定域边界的超平面拟合法	47

3.1.4	全国联网系统中小扰动稳定域的应用	49
3.1.5	小结	51
3.2	小扰动稳定域拓扑性质	51
3.2.1	微分动力系统的退化 Hopf 分岔	51
3.2.2	与退化 Hopf 分岔有关的小扰动稳定域边界突变现象	52
3.2.3	小结	58
第 4 章	输电系统动态安全风险评估	59
4.1.1	动态安全风险评估模型	59
4.1.2	风险控制最优化模型	62
4.1.3	算例分析	63
4.1.4	小结	65
第 5 章	电力系统在线稳定评估和稳定极限计算	66
5.1	安全稳定评估方法	66
5.1.1	静态安全分析	66
5.1.2	暂态稳定评估	67
5.1.3	小干扰稳定评估	76
5.1.4	电压稳定评估	77
5.1.5	小结	82
5.2	在线稳定极限的计算方法	82
5.2.1	概述	82
5.2.2	技术路线和计算原则	83
5.2.3	稳定极限计算的在线实现	84
5.2.4	小结	89
第 6 章	调度辅助决策的计算方法	90
6.1	概述	90
6.2	灵敏度计算	92
6.2.1	暂态稳定轨迹灵敏度的计算方法	92
6.2.2	小干扰灵敏度的计算方法	92
6.2.3	静态电压稳定灵敏度的计算方法	93
6.3	调度辅助决策的计算过程	95
6.3.1	基本过程	95
6.3.2	调度辅助决策的并行化	96
6.4	小结	97
第 7 章	原型电力系统仿真	98
7.1	原型电力系统仿真的硬件结构	99
7.2	原型电力系统仿真的软件结构	100
7.2.1	基于 PSASP 构建的系统	100
7.2.2	面向服务的架构	100
7.2.3	重要模块设计	102

7.3	与其他系统的接口	103
7.3.1	实时数据库	103
7.3.2	原型电力系统仿真与网络拓扑功能的接口实现	103
7.3.3	原型电力系统仿真与 SCADA/EMS 系统的接口实现	105
7.3.4	原型电力系统仿真与 WAMS 系统的接口实现	107
7.3.5	原型电力系统仿真与故障信息系统的接口实现	108
7.4	小结	112

第 2 篇 大型互联电网在线故障诊断和预防控制决策理论和方法

第 8 章	大型互联电网动态诊断与分析方法研究	115
8.1	基于复杂事件处理技术的故障信息分析	115
8.1.1	研究背景	115
8.1.2	复杂事件处理技术的理论基础	115
8.1.3	基于复杂事件处理的故障信息分析模型	116
8.1.4	典型算例仿真及其分析	122
8.1.5	小结	124
8.2	基于贝叶斯网络和马尔可夫链蒙特卡洛方法的不确定性故障 诊断方法研究	125
8.2.1	研究背景	125
8.2.2	贝叶斯网络理论和马尔可夫链蒙特卡洛方法	126
8.2.3	基于贝叶斯网络理论和马尔可夫链蒙特卡洛方法的 电力系统故障诊断	127
8.2.4	故障诊断案例	131
8.2.5	小结	136
8.3	基于协同式专家系统的大型互联电网故障诊断与分析方法	137
8.3.1	研究背景	137
8.3.2	研究思路	137
8.3.3	协同式专家系统的设计	138
8.3.4	协同式专家系统的应用	143
8.3.5	基于协同式专家系统的故障诊断案例	146
8.3.6	小结	149
8.4	基于广域量测系统的电网故障快速诊断与分析方法	149
8.4.1	研究背景	149
8.4.2	基于 WAMS 的电网故障诊断与分析	151
8.4.3	案例分析	155
8.4.4	小结	158
8.5	动态诊断与分析的其他方法	159
8.5.1	故障诊断规则演化推理方法	159

8.5.2	基于混杂系统模型的复杂故障诊断	161
8.5.3	基于 OPA/CASCADE 模型的连锁故障预警分析	164
8.5.4	基于知识网格技术的电网故障诊断方法	170
第 9 章	大型互联电网在线监控方法研究	185
9.1	电网脆弱性分析	185
9.1.1	研究背景	185
9.1.2	电网结构脆弱性分析	186
9.1.3	电网运行脆弱性分析	191
9.1.4	小结	196
9.2	扰动后的相继开断发展模式分析	196
9.2.1	研究背景	196
9.2.2	贝叶斯网络技术	197
9.2.3	用于预想事故分析的贝叶斯网络相继开断模型	198
9.2.4	算例分析	202
9.2.5	小结	203
9.3	基于慢同调理论和图论方法的电网解列点快速选择方法	203
9.3.1	研究背景	203
9.3.2	慢同调机群的辨识	204
9.3.3	基于图论的解列点选择方法	204
9.3.4	案例分析	207
9.3.5	小结	216
第 10 章	在线故障诊断及监控子系统开发和应用研究	217
10.1	故障诊断及监控子系统开发	217
10.1.1	概述	217
10.1.2	故障诊断及监控子系统结构	217
10.1.3	故障诊断及监控子系统数据源	219
10.1.4	故障诊断及监控子系统配置	219
10.2	故障诊断及监控子系统功能和技术特点	220
10.2.1	系统功能	220
10.2.2	方法应用	221
10.2.3	技术特点	222
10.3	小结	223
第 3 篇	保证大型互联电网安全运行的在线分析平台和综合决策支持系统	
第 11 章	三维协调的新一代电网能量管理系统	227
11.1	三维协调的新一代电网能量管理系统总体构想	227
11.1.1	引言	227

11.1.2	三维协调的构想和原理	229
第 12 章	N-EMS 在空间维度协调的原理和方法	235
12.1	全局电网的分布式建模	235
12.1.1	电网模型合并	235
12.1.2	电网潮流匹配	240
12.2	在线外网等值模型的自动生成	242
12.2.1	方法原理描述	242
12.2.2	一些技术问题的解决方法	243
12.2.3	实际应用效果	244
12.3	分布式分解协调计算	245
12.3.1	分布式分解协调的基本原理	245
12.3.2	应用例——省、地广域互联的分布式 DTS 系统	248
第 13 章	N-EMS 在时间维度协调的原理和方法	255
13.1	(时间维)分级优化调度控制原理	255
13.2	基于软分区的三级无功电压优化控制	255
13.2.1	概述	255
13.2.2	基于无功源控制空间的电压分区聚类方法	257
13.2.3	交叉逼近最优潮流算法	261
13.2.4	计及无功出力裕度均衡的协调二级电压控制方法	265
13.2.5	电压稳定校验	269
13.3	时间尺度协调的分级有功调度控制	269
13.3.1	有功调度控制的分解协调	269
13.3.2	协调有功调度控制方法	271
13.3.3	离线计算、在线匹配的断面极限传输容量更新	273
13.3.4	阻塞管理的校正控制	273
13.3.5	现场应用情况	274
13.4	考虑时间过程的电网安全分析	277
第 14 章	N-EMS 在目标维度协调的原理、方法以及应用系统实现	278
14.1	静态安全评估、预警和预控	279
14.2	暂态安全评估、预警和预控	280
14.2.1	基本功能结构	280
14.2.2	基于变参数轨迹追踪的时域仿真技术	281
14.2.3	在线传输极限 TTC 的计算	281
14.2.4	适用于在线调度决策的 TTC——保守、乐观 TTC	286
14.2.5	暂态稳定安全的预防控制	293
14.3	静态电压稳定评估、增强控制和预防控制	294
14.3.1	概述	294
14.3.2	电压稳定性评估(VSA)	295
14.3.3	电压稳定故障筛选和排序(CS&R)	296

14.3.4	电压稳定控制(VSC)·····	296
14.3.5	最小奇异值分析·····	297
14.3.6	连续潮流法·····	298
14.3.7	故障型连续潮流法·····	299
14.3.8	提高静态电压稳定性的控制算法·····	302
14.4	继电保护配合安全预警·····	306
14.4.1	概述·····	306
14.4.2	保护定值在线校核的难点·····	306
14.4.3	自定义规则的保护定值校核专家系统·····	307
14.4.4	保护定值校核的快速计算方法·····	309
14.4.5	基于电网分块的并行校核计算方法·····	311
14.4.6	算例·····	314
14.5	综合安全预警系统的应用情况·····	316
14.6	支持平台技术·····	318
14.6.1	系统功能的集成·····	318
14.6.2	软硬件平台体系的集成·····	319
第 15 章	电力系统在线动态安全评估、预警及决策支持的系统平台 ·····	325
15.1	系统总体结构·····	325
15.2	系统软硬件平台·····	326
15.2.1	软硬件平台设计思想·····	326
15.2.2	基于离线平台技术的在线化技术·····	327
15.2.3	总体技术特点·····	328
15.2.4	总体功能设计·····	331
15.2.5	系统配置·····	333
15.3	分布式计算平台·····	334
15.3.1	分布式计算平台构建·····	334
15.3.2	关键技术解决方案·····	334
15.3.3	任务预分配机制·····	336
15.3.4	数据触发计算机制·····	338
15.3.5	子计算节点管理·····	338
15.3.6	系统维护管理·····	342
15.4	动态数据平台·····	343
15.4.1	动态数据平台构建·····	343
15.4.2	关键技术解决方案·····	344
15.4.3	数据交换·····	345
15.4.4	整合潮流计算·····	346
第 16 章	电力系统安全评估、辅助决策和在线稳定极限计算 ·····	349
16.1	安全稳定评估·····	349
16.1.1	安全稳定评估算法的在线化处理·····	349

16.1.2	安全稳定评估功能说明	350
16.1.3	安全稳定评估内部模块功能说明	350
16.2	调度辅助决策	352
16.2.1	调度辅助决策计算的并行化实现	352
16.2.2	辅助决策模块信息交互流程	353
16.2.3	辅助决策模块实施新增目录组织结构	356
16.3	在线稳定极限	356
16.3.1	在线稳定极限计算的并行化实现	356
16.3.2	在线稳定裕度模块信息交互流程	357
16.3.3	稳定极限模块实施新增目录组织结构	359
第 17 章	在线分析平台和综合决策支持系统的可视化展示	360
17.1	安全域在线监视和可视化系统	360
17.1.1	电压稳定安全域在线监视软件	360
17.1.2	动态安全域在线监视软件	363
17.1.3	本系统在 EMS 上的实现	366
17.2	信息显示与可视化	367
17.2.1	图模一体化支持平台概述	367
17.2.2	平台的主要功能和特点	367
17.2.3	信息展现方式及可视化技术的应用	369
17.2.4	潮流断面比较工具	376
17.2.5	二维可视化技术	377
17.2.6	三维可视化技术	378
参考文献		381