

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



# 大型互联电网分布式计算 理论与方法

沈沉 李亚楼

清华大学出版社



## 内 容 简 介

基于多层计算协同的分布式计算和基于多级数据整合的分布式计算是解决大规模互联电网一体化仿真的两种重要途径。基于多层计算协同的分布式计算的核心内容是,在各调度中心独立计算的基础上,通过交换边界信息使边界条件得以满足,达到全网一体化仿真的目的。其主要研究内容为分布式计算模型和求解算法设计,高效的通信中间件开发。基于多级数据整合的分布式并行计算通过整合分布在多级调度中心的数据,建立统一的数据平台,利用各级调度中心的分布式并行计算平台,实现各级电网的安全稳定分析计算,从而实现统一大规模互联电网背景下的分布式并行计算。这种分布式计算模式已经成功应用于国家电力调度中心、华北电网调度中心、黑龙江电力调度中心等多家单位的动态安全分析与预警系统。本书将介绍以上两个研究方向上取得的最新成果。

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

大型互联电网分布式计算理论与方法/沈沉,李亚楼. --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 978-7-302-24055-6

I. ①大… II. ①沈… ②李… III. ①联合电网—分布式计算机系统—研究报告 IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第200033号

责任编辑:张占奎

责任校对:刘玉霞

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto: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:14.75

字 数:342千字

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:58.00元

---

产品编号:037673-01

# 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,对本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

电力系统是现代社会重要的能源基础设施。互联电网覆盖地域广,控制复杂,对可靠性要求高。鉴于这些特点,中外互联电网无一例外从它诞生的那一天起就一直采用分布式的控制方式,即整个互联电网根据地域划分成不同的区域,由分散的区域调度中心负责各分区的调度及监控任务,各个区域调度中心通过必要的协调,在一定程度上保证整个互联电网的安全与经济运行。与集中控制相比,这种分布式处理的方式有着更高的可靠性,更大的灵活性,更好的经济性以及更优的效率。

考虑到电力系统的复杂性以及电力系统运行对可靠性的严格要求,调度运行人员一直借助各种仿真计算工具对系统加以分析,并在此基础上对系统加以控制。可以毫不夸张地说,仿真计算为调度人员提供了了解系统运行现状、预见系统未来发展的能力。例如:潮流计算可以帮助调度人员了解电力网络中的功率分布以及系统中各节点的电压高低等系统稳态运行情况;动态潮流计算可以帮助调度人员了解系统中发电或负荷功率发生变化时系统中功率流动的变化情况;时域暂态仿真则可以向调度人员展示系统在受到干扰情况下的动态变化过程;基于  $N-1$  校验的电力系统动态安全分析则可以帮助调度员预测系统在某些故障情况下系统的稳定情况。电力系统的仿真分析工具发展到今天,完全可以分析包括电力系统一个运行断面到微秒级、秒级、分钟级甚至小时级的过程。如果没有仿真工具的帮助,无论是电力系统的长期规划、日常调度还是紧急控制都是无法想象的。

为了实现对电力系统的仿真分析,必须具备几个关键要素。一是系统模型,包括描述系统中各种元件行为的数学模型以及描述这些模型之间关系的关联模型;二是数据,电力系统覆盖地域广,所以数据也是分散在各个调度中心的,这些数据描述的对象特性、表达方式、存储格式等都可能完全不同;三是数值计算方法,仿真分析的目标总是根据部分已知信息推算未知信息。不同的数值计算方法可能在计算准确性、计算效率等方面有所差异。要实现对系统的仿真,首先要关注上述三个要素是否具备。

除上述三个要素之外,考虑到仿真分析对调度人员的辅助决策功能,还必须关注仿真计算工具的性能。这其中正确性和快速性是两个重要指标。仿真计算的结果必须与系统的实际运行情况相吻合,即仿真结果必须具有正确性,这是对仿真计算的最基本的性能要求。仿真的快速性是指在希望的时间内获得仿真结果。调度人员总是希望仿真计算工具在尽可能短的时间内给出计算结果,以便为控制预留足够的反应时间。可以想象,如果动态安全分析工具无法在一个调度周期内完成对预想事故集中所有故障的扫描,这个工具是没有在线应用价值的。在讨论仿真计算所需时间时,人们常常关注的是计算机求解方程的耗时,而忽略了建立模型和准备仿真所需数据的时间和难度。实际上,从决定开始仿真到获得最终的仿真结果,这中间既包含了模型与数据的准备时间也包含计算时间。对于针对全网的仿真而言,前一个阶段的耗时可能比单纯的计算时间更长,因为电力系统的的数据是分散的,异构的。

对于针对全网的仿真,为了保证在足够短的时间内完成计算,人们往往采用假设边界条件或外网简化等值的方法来缩短模型与数据的准备时间。显然,利用上述方法得到的计算结果其正确性受边界条件假设的准确性以及外网等值精度的影响较大。特别是在电网联系



紧密,区域间功率交换大的情况下,通过简化等值得到的计算结果很难满足实际控制的需要。实际上,要得到较为准确的边界条件预估模型或外网等值模型受到很多条件的限制。首先,电力系计算种类很多,如潮流计算、时域暂态仿真、小干扰特征值分析等,不同的计算需要的边界量不同,因此,对外网等值模型复杂度、等值精度、模型更新速率都会有不同要求。同时,由于电力系统本身的高维非线性特性,寻找满足以上计算要求的等值模型并非易事。其次,无论国内还是国外,现阶段不同的调度中心由于管理体制的原因并不能完全共享所有的电网数据。再次,各个区域调度中心在对自身资源的管理上相对独立,对资源的构成与组织形式具有决定权,因此,一般来讲,各个区域调度中心的资源是异构的,这为共享数据造成了技术上的障碍。其实,即使没有这种资源异构的障碍,各个调度中心完全拥有电网其他部分的参数也与电网分布式处理的初衷是背道而驰的。最后,由于电力市场化改革在世界各地的推广,出于经济利益与同行竞争的原因,各调度中心之间共享电网信息在管理层面上将面临更大的困难。

从上面论述的情况可以看出,为了使针对全网的快速仿真顺利实现,首先必须解决好系统模型和数据的整合问题。一种可行的思路是模型和数据由各调度中心分散维护,当某个调度中心需要进行全网一体化仿真时它将通过一定机制向其他调度中心申请协助。如果请求被获准,各调度中心都将利用自己维护的最新数据以及假设的边界条件对本网展开计算,计算过程中不断交换边界信息并调整假设边界条件,直至各调度中心假设的边界条件满足边界约束,此时全网计算一致收敛。这种解决思路的关键是高效分布式协同计算模型与算法的设计以及基于广域通信网络的分布式计算平台构建。此种解决思路很好地维护了调度中心管理的独立性;数据和模型的维护工作完全分散,易于管理;当各个分区发生重大开断时可以及时在模型中反映。当然,该种思路也存在一些弱点,例如:计算的快速性受限于通信网络的时延和带宽,计算可靠性易受通信网络可靠性的影响等。

另外一个直观的解决思路是:由电网公司的某个部门负责收集全网的模型和数据并加以整合,形成具有一定详细程度的全网统一基础仿真案例并分发给各级调度部门;各级调度中心根据自身需求针对所辖范围的详细电网数据进行增补,在此基础上就自身关心的问题进行详细仿真。这种解决思路的关键是数据整合技术的研究以及多级分布式数据平台的构建。目前我国电网中各级调度中心从组织结构上看都属于国家电网公司或南方电网公司,这种上下垂直一体的机构设置使得该种解决思路的推行从组织管理上得到了保证。同时,由于各级调度中心都获得了全网的数据,仿真过程中对外网没有进行简化等值,仿真的正确性得到了提高。而且,各调度中心的仿真分析工作仅需利用本地计算资源,完全独立于其他调度中心,计算可靠性和计算资源利用率也可以有所提升。但是,该解决思路也存在一些弱点,例如:由于全网的数据整合任务由一个部门承担,该部门的工作量大,存在可靠性瓶颈;由于数据传输与处理的时延,全网数据从生成到分发需要一定时间,因此,全网数据一般按一定周期生成。考虑到当某一区域有重大开断发生时,必须重新形成全网数据,如果在一个周期内发生开断,全网统一数据将难以及时形成。

进一步分析以上两种思路可以看出,采用前一种思路进行全网一体化仿真是在计算层面对仿真要素进行整合,采用后一种思路则是从数据层面对仿真要素进行整合,两种仿真模式都属于分布式计算的范畴。我们称第一种思路为基于多层计算协同的分布式计算,第二种思路为基于多级数据整合的分布式计算。两种思路在一定条件下都具有各自的优势和可

行性。作为国家重点基础研究发展计划——“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”的第三课题“互联电网分布式计算理论与方法研究”将围绕以上两种思路展开。

基于多层计算协同的分布式计算主要研究内容为：研究找到适合于互联电网的分布式计算体系与架构，设计出互联电网潮流计算和稳定分析的分布式计算模型和算法，掌握网络计算环境下的中间件技术，为大型互联电网运行可靠性研究奠定仿真分析基础。这方面的研究主要由清华大学电机工程与应用电子技术系承担，参加研究的人员还包括陈颖、张旭、王建、李競、苗少伟等。

基于多级数据整合的分布式计算主要研究内容为：研究通过整合分布在多级调度中心的数据，建立统一的数据平台，利用各级调度中心的分布式并行计算平台，实现各级电网的安全稳定分析计算，从而实现统一大规模互联电网背景下的分布式并行计算。这方面的研究主要由中国电力科学研究院承担，参加人员还有郭剑、严亚勤、陈勇、李芳等。

本书是对以上两个研究方向上取得的成果的汇总，从内容上可分为三部分。第一部分为概述，简单介绍分布式并行计算的基本概念和电力系统中的两种应用形式：基于广域通信网络的多调度中心间协同分布式计算和基于并行计算原理的调度中心内部多任务并行分布式计算，以及它们各自的体系结构和算法特点。第二部分包括第2章～第9章，主要讲述基于广域通信网络的多调度中心间协同分布式计算的计算模型、求解算法、各种实际分析工具（动态潮流、最优潮流、时域暂态仿真、小干扰稳定分析等）的分布化方法，基于故障扫描的动态安全分析分布式实验平台构建与性能测试，最后，提出了分布式计算系统的鲁棒性定义和分析方法。第三部分包括第10章～第12章，主要讲述基于多级数据整合的分布式计算的主要研究内容，包括多级数据整合技术的研究和平台开发及测试情况、大规模分布式并行计算平台的系统架构及测试情况、基于端口逆矩阵并行算法的电力系统分析相关分布式并行算法的开发及性能测试情况。

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 概述                          | 1  |
| 1.1 电力系统分布式并行计算                   | 2  |
| 1.2 电力系统分布式并行计算模式                 | 3  |
| 1.2.1 基于分层计算协同的分布式并行计算            | 3  |
| 1.2.2 基于分层计算协同的分布式并行计算的主要研究内容     | 4  |
| 1.2.3 基于多级数据整合的分布式并行计算            | 7  |
| 1.2.4 基于多级数据整合的分布式并行计算的主要研究内容     | 8  |
| 第 2 章 互联电网分布式计算模型和通用分解协调算法        | 10 |
| 2.1 概述                            | 10 |
| 2.2 互联电力系统切分方法                    | 10 |
| 2.2.1 母线撕裂法                       | 10 |
| 2.2.2 重叠边界法                       | 11 |
| 2.2.3 带有边界分区的互联电力系统切分方法           | 12 |
| 2.3 边界协调方程的非线性方程组描述方法             | 12 |
| 2.4 基于 JFNG 方法的协调求解策略             | 14 |
| 2.4.1 Krylov 迭代方法和 GMRES( $m$ )方法 | 15 |
| 2.4.2 含内外层预处理矩阵修正的 JFNG( $m$ )算法  | 18 |
| 2.5 基于 JFNG 方法的分布式潮流算法            | 21 |
| 2.5.1 算法流程                        | 21 |
| 2.5.2 算法检验——实例计算和分析               | 22 |
| 2.6 通用电力系统分布式计算模型的设计              | 24 |
| 2.6.1 一般非线性方程组的分解协调求解             | 25 |
| 2.6.2 通用电力系统分布式应用迭代求解计算模型         | 28 |
| 2.7 小结                            | 28 |
| 第 3 章 基于 JFNG( $m$ )方法的分布式暂态仿真算法  | 30 |
| 3.1 概述                            | 30 |
| 3.1.1 暂态仿真计算模型                    | 30 |
| 3.1.2 动态方程求解方法                    | 30 |
| 3.2 分布式暂态仿真计算模型                   | 31 |
| 3.2.1 系统切分方法                      | 31 |
| 3.2.2 分解协调计算方法                    | 32 |
| 3.3 故障处理方法                        | 35 |
| 3.3.1 普通故障处理方法                    | 35 |
| 3.3.2 序网同时分解协调求解方法                | 36 |
| 3.3.3 序网等值计算方法                    | 37 |

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| 3.3.4        | 联络线故障处理方法 .....                                   | 38        |
| 3.4          | 基于 JFNG( $m$ ) 的分布式暂态仿真协调算法 .....                 | 38        |
| 3.4.1        | 基础算法 .....  | 39        |
| 3.4.2        | 加速计算的改进方法 .....                                   | 39        |
| 3.5          | 算法收敛性能测试 .....                                    | 41        |
| 3.6          | 分布式暂稳仿真测试 .....                                   | 43        |
| 3.6.1        | 分布式仿真评价指标 .....                                   | 44        |
| 3.6.2        | 大规模互联电网分布式仿真测试 .....                              | 46        |
| 3.7          | 小结 .....  | 54        |
| <b>第 4 章</b> | <b>基于 JFNG(<math>m</math>) 方法的分布式动态潮流算法 .....</b> | <b>55</b> |
| 4.1          | 概述 .....  | 55        |
| 4.1.1        | 动态潮流的定义 .....                                     | 55        |
| 4.1.2        | 分布式动态潮流的应用前景 .....                                | 56        |
| 4.2          | 分布式动态潮流计算模型 .....                                 | 56        |
| 4.2.1        | 系统切分方式 .....                                      | 56        |
| 4.2.2        | 分布式动态潮流的边界协调方程的构造 .....                           | 57        |
| 4.2.3        | 边界协调方程的求解 .....                                   | 59        |
| 4.3          | 算例测试 .....  | 60        |
| 4.3.1        | 测试平台 .....  | 60        |
| 4.3.2        | 测试系统和测试结果 .....                                   | 61        |
| 4.4          | 小结 .....  | 63        |
| <b>第 5 章</b> | <b>基于 JFNG(<math>m</math>) 方法的分布式最优潮流算法 .....</b> | <b>64</b> |
| 5.1          | 概述 .....  | 64        |
| 5.1.1        | 最优潮流的定义 .....                                     | 64        |
| 5.1.2        | 分布式最优潮流的应用前景 .....                                | 64        |
| 5.2          | 分布式最优潮流计算模型 .....                                 | 65        |
| 5.2.1        | 问题分解 .....  | 65        |
| 5.2.2        | 协调求解算法 .....                                      | 67        |
| 5.2.3        | 算法实现细节 .....                                      | 69        |
| 5.3          | 算例测试 .....  | 70        |
| 5.4          | 小结 .....  | 72        |
| <b>第 6 章</b> | <b>基于自激法的分布式小干扰稳定分析 .....</b>                     | <b>73</b> |
| 6.1          | 概述 .....  | 73        |
| 6.1.1        | 小干扰稳定分析的一般方法 .....                                | 73        |
| 6.1.2        | 小干扰稳定特征值分析法的现状与分布化的意义 .....                       | 77        |
| 6.2          | 基于自激法的分布式小干扰稳定分析 .....                            | 80        |
| 6.3          | 仿真测试 .....  | 82        |
| 6.3.1        | 仿真流程 .....  | 82        |
| 6.3.2        | 算例结果 .....  | 84        |

---

|            |                             |           |
|------------|-----------------------------|-----------|
| 6.4        | 小结                          | 86        |
| <b>第7章</b> | <b>基于分布式暂稳仿真的电力系统动态安全分析</b> | <b>87</b> |
| 7.1        | 基于 $N-1$ 校验的电力系统动态安全分析      | 87        |
| 7.2        | 基于分布式暂稳仿真的电力系统动态安全分析        | 88        |
| 7.2.1      | 构建分布式动态安全分析系统的必然性           | 88        |
| 7.2.2      | 动态安全分析系统面临的挑战               | 89        |
| 7.3        | 分布式电力系统动态安全分析框架             | 90        |
| 7.4        | 性能改进措施                      | 91        |
| 7.4.1      | 更有效的协调算法                    | 91        |
| 7.4.2      | 变步长加速方法                     | 92        |
| 7.4.3      | 多算例并发机制                     | 92        |
| 7.4.4      | 提前判稳算法                      | 92        |
| 7.5        | 测试结果                        | 93        |
| 7.6        | 小结                          | 93        |
| <b>第8章</b> | <b>面向多调度中心协同分布式计算的仿真平台</b>  | <b>94</b> |
| 8.1        | 概述                          | 94        |
| 8.1.1      | 仿真平台的硬件组成                   | 94        |
| 8.1.2      | 仿真平台的总体架构                   | 95        |
| 8.2        | 分区暂稳仿真服务                    | 96        |
| 8.2.1      | 分区暂稳仿真服务功能分析                | 96        |
| 8.2.2      | 分区暂稳仿真服务的具体实现               | 96        |
| 8.3        | 暂稳仿真协调服务                    | 98        |
| 8.3.1      | 暂稳仿真协调服务功能分析                | 98        |
| 8.3.2      | 暂稳仿真协调服务的具体实现               | 98        |
| 8.4        | 通信中间件                       | 99        |
| 8.4.1      | 概述                          | 99        |
| 8.4.2      | 通信中间件设计需求                   | 99        |
| 8.4.3      | 通信中间件设计结构                   | 100       |
| 8.4.4      | 通信中间件的实现                    | 100       |
| 8.4.5      | 通信中间件性能测试                   | 102       |
| 8.4.6      | 通信中间件性能优化                   | 102       |
| 8.5        | 监控系统                        | 104       |
| 8.5.1      | 设计需求                        | 104       |
| 8.5.2      | 具体实现                        | 105       |
| 8.6        | 展示系统                        | 107       |
| 8.6.1      | 概述                          | 107       |
| 8.6.2      | 展示系统实际效果                    | 108       |
| 8.7        | 小结                          | 109       |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <b>第 9 章 基于控制理论的算法鲁棒性分析</b> .....    | 110 |
| 9.1 分布式仿真系统鲁棒性定义 .....               | 110 |
| 9.1.1 鲁棒性定义 .....                    | 110 |
| 9.1.2 分布式仿真系统中的不确定性分析 .....          | 110 |
| 9.1.3 分布式仿真系统的鲁棒性 .....              | 111 |
| 9.2 潮流迭代计算过程中的控制系统建模 .....           | 112 |
| 9.3 潮流计算的鲁棒性分析 .....                 | 114 |
| 9.3.1 潮流计算的鲁棒性分析实例 .....             | 114 |
| 9.3.2 算例分析 .....                     | 115 |
| 9.4 分布式暂态仿真过程的计算鲁棒性 .....            | 116 |
| 9.4.1 实用评估指标 .....                   | 116 |
| 9.4.2 实用评估指标的作用 .....                | 117 |
| 9.5 小结 .....                         | 118 |
| <b>第 10 章 多级数据整合技术研究和平台开发</b> .....  | 119 |
| 10.1 概述 .....                        | 119 |
| 10.2 国内外研究现状 .....                   | 119 |
| 10.3 多级在线数据整合分析 .....                | 120 |
| 10.3.1 调度中心计算数据分析 .....              | 120 |
| 10.3.2 在线数据整合目标 .....                | 121 |
| 10.3.3 在线数据整合分类 .....                | 122 |
| 10.3.4 在线数据整合技术难点分析 .....            | 122 |
| 10.3.5 以离线数据为基础的数据整合方案(方案 1) .....   | 123 |
| 10.3.6 以在线计算数据为基础的数据整合方案(方案 2) ..... | 124 |
| 10.4 多级在线数据整合的技术准备 .....             | 125 |
| 10.4.1 纯在线数据拼接 .....                 | 125 |
| 10.4.2 设备动态智能映射 .....                | 126 |
| 10.5 以离线数据为基础的数据整合方案 .....           | 127 |
| 10.5.1 整合数据的电网拓扑调整 .....             | 127 |
| 10.5.2 运行数据调整 .....                  | 128 |
| 10.5.3 以离线数据为基础的数据整合流程图 .....        | 129 |
| 10.6 以在线计算数据为基础的数据整合方案 .....         | 130 |
| 10.6.1 边界潮流匹配的方法 .....               | 130 |
| 10.6.2 以在线计算数据为基础的数据整合流程图 .....      | 131 |
| 10.7 OpenMP 并行计算技术 .....             | 132 |
| 10.7.1 OpenMP 模型 .....               | 133 |
| 10.7.2 OpenMP 指令 .....               | 133 |
| 10.7.3 OpenMP 库函数 .....              | 135 |
| 10.8 基于 OpenMP 的并行整合潮流算法设计 .....     | 135 |
| 10.8.1 并行的整合潮流算法 .....               | 136 |

---

|               |                        |            |
|---------------|------------------------|------------|
| 10.8.2        | 迭代修正方程的动态形成            | 138        |
| 10.8.3        | 基于 OpenMP 并行技术的整合潮流流程图 | 138        |
| 10.8.4        | 性能测试                   | 138        |
| 10.9          | 纯离线数据整合                | 140        |
| 10.10         | 基于 Web 的电网图示化编辑器       | 141        |
| 10.10.1       | 基于 RIA/Web 技术的电网数据管理   | 141        |
| 10.10.2       | 图示化编辑器的分析与设计           | 142        |
| 10.10.3       | 多视图的实现                 | 144        |
| 10.11         | 多级数据源对比工具              | 147        |
| 10.11.1       | 多级在线数据对比               | 147        |
| 10.11.2       | 在线/离线参数对比              | 148        |
| 10.11.3       | 在线运行数据越限检查             | 148        |
| 10.12         | 多级在线数据整合测试             | 149        |
| 10.12.1       | 以离线数据为基础的整合测试          | 149        |
| 10.12.2       | 以在线数据为基础的整合测试          | 150        |
| 10.13         | 小结                     | 152        |
| <b>第 11 章</b> | <b>大规模分布式并行计算平台</b>    | <b>153</b> |
| 11.1          | 系统概述                   | 153        |
| 11.2          | 通信交互流程                 | 155        |
| 11.2.1        | 服务器物理组播组               | 156        |
| 11.2.2        | 计算物理群播组                | 157        |
| 11.2.3        | 单播                     | 157        |
| 11.2.4        | 逻辑组播                   | 157        |
| 11.2.5        | 转播                     | 157        |
| 11.3          | 平台业务流程                 | 158        |
| 11.4          | 平台构建                   | 160        |
| 11.5          | 关键技术解决                 | 160        |
| 11.6          | 任务预分配机制                | 163        |
| 11.7          | 数据触发计算机制               | 165        |
| 11.8          | 子计算节点管理                | 167        |
| 11.8.1        | 平台消息通信                 | 167        |
| 11.8.2        | 开放式接口                  | 168        |
| 11.8.3        | 任务调度                   | 170        |
| 11.9          | 系统维护管理                 | 170        |
| 11.9.1        | 可靠通信中间件                | 170        |
| 11.9.2        | 纯软高可用技术                | 191        |
| 11.9.3        | 应用双网自动切换技术             | 192        |
| 11.9.4        | 运行状态监视                 | 192        |



---

|               |                             |            |
|---------------|-----------------------------|------------|
| 11.10         | 平台测试 .....                  | 192        |
| 11.10.1       | 测试环境 .....                  | 192        |
| 11.10.2       | 计算结果测试 .....                | 192        |
| 11.10.3       | 计算速度测试 .....                | 193        |
| 11.10.4       | 稳定性和可靠性测试 .....             | 193        |
| 11.10.5       | 负载率测试 .....                 | 194        |
| 11.10.6       | 接口通用性测试 .....               | 194        |
| 11.11         | 小结 .....                    | 195        |
| <b>第 12 章</b> | <b>分布式并行算法 .....</b>        | <b>196</b> |
| 12.1          | 端口逆矩阵并行算法 .....             | 196        |
| 12.1.1        | 端口逆矩阵并行算法简介 .....           | 196        |
| 12.1.2        | 端口逆矩阵并行算法的并行效率和特点分析 .....   | 198        |
| 12.2          | 端口逆矩阵并行算法在电力系统计算中的应用 .....  | 199        |
| 12.2.1        | 基于端口逆矩阵法的潮流计算分布式并行算法 .....  | 199        |
| 12.2.2        | 基于端口逆矩阵法的暂态稳定分布式并行算法 .....  | 200        |
| 12.2.3        | 基于端口逆矩阵法的小干扰稳定分布式并行算法 ..... | 201        |
| 12.3          | 仿真试验 .....                  | 203        |
| 12.3.1        | 试验系统概述 .....                | 203        |
| 12.3.2        | 测试环境 .....                  | 203        |
| 12.3.3        | 并行性能评测指标 .....              | 204        |
| 12.3.4        | 并行仿真性能测试 .....              | 204        |
| 12.4          | 分布式并行算法应用前景及展望 .....        | 208        |
| 12.5          | 小结 .....                    | 209        |
| <b>第 13 章</b> | <b>总结 .....</b>             | <b>210</b> |
|               | <b>参考文献 .....</b>           | <b>212</b> |

# 第 1 章 概 述

我国电力系统发展速度处于世界首位。自 2004 年以来,我国的电力装机容量以每年 5000 万 kW 以上的速度递增。2005 年底,我国电力装机已突破 5 亿 kW<sup>[1]</sup>,完成了又一个里程碑式的发展目标。从 1996 年起,我国的发电装机容量和年发电量一直位居世界第二位。目前系统包括东北、华北、华东、华中、西北和南方 6 个跨省区电网,以及海南、新疆、西藏 3 个独立的省级电网<sup>[2]</sup>。

随着三峡电厂、西电东送等大型工程的建设,以及超高压、远距离交直流输电技术的发展和应用,在“十一五”期间,我国互联电网的规模还将有大跨度的扩展<sup>[3]</sup>。跨大区互联系统的建成有利于不同地区电力资源的互济和优化配置,大幅提高系统供电能力,并改善缺电、窝电共存的不利局面。

目前,我国电网在仿真计算方面应关注的问题和加以改进的方向可归纳为以下四点<sup>[4,5]</sup>。

一是我国一次能源分布不均匀,紧邻能源基地的发电中心与负荷中心相距较远,必须采用长距离输电方式。我国电网的建设长期滞后于社会经济的发展和电源建设,导致我国大电网运行的同步稳定性问题突出。若调控不当有可能让某一个局部故障发展为危害整个系统的重大事故,在这方面国外的教训很多。大电网的安全稳定经济运行是电力工业领域面临的重大科技难题,实践证明,电力系统仿真是开展电力系统安全稳定分析的基础技术手段,对电力系统建设和电网安全稳定运行具有重要作用。

二是我国电力系统的运行和管理具有“分级管理、分层控制、分布处理”<sup>[6]</sup>的特点,系统广域分布,各种资源具有很强的异构性,从而使得网络参数和实时同步的数据收集、整合和维护的难度增大。与此同时,电力市场环境运行规则加厚了各调度机构之间的信息壁垒,进一步阻碍了系统内数据和信息的共享,使得传统的集中式的仿真计算难以在线实现。基于分解协调的分布式仿真的一个重要功能则是在保留各调度中心计算独立性的同时获得全网统一的仿真结果,因而该技术有望成为解决大规模互联系统一体化仿真的有效手段。

三是随着计算机技术和网络技术的发展,互联电网监控系统正在从传统的封闭型集中式系统向开放型分布式系统发展<sup>[7-10]</sup>。而作为其技术支撑的仿真分析平台担负着数据分析、过程模拟、决策支持等职能,在离线和在线安全分析中发挥重要作用。为了适应电力网络规模不断扩展的运行趋势,电力系统仿真平台不仅应具有开放性和功能可扩展性,而且还要能够不断整合先进的计算资源,以提升自身计算能力,这就要求仿真平台的设计更加标准化、网络化和模块化。因此,随着监控系统向分布式系统发展,作为电力监控系统基础的仿真平台也应当具有分布式的特点。

四是目前电力系统仿真平台大多是封闭式的独立系统,未能全面开发和利用新一代的计算机网络技术;各平台之间缺乏高效的信息交互手段,这些因素使得联合统一仿真难以开展,大规模电力系统的联合反事故演习亦难以全网同时进行。目前在电力系统实时通信技术、信息传递与管理方面得到广泛应用的互联网技术,已经为建设现代化的仿真平台提供了