

现代电力系统丛书



电力系统自组织临界特性 与大电网安全

梅生伟 薛安成 张雪敏 著

清华大学出版社

现代电力系统丛书

电力系统自组织临界特性 与大电网安全

梅生伟 薛安成 张雪敏 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书主要介绍自组织临界理论及其在大电网安全分析领域的应用成果,内容分为三部分。第一部分(第1~4章)主要利用概率论和随机过程为大电网的自组织临界理论奠定严格的数学基础,包括介绍与自组织临界理论相关的数学与统计物理方面的基本概念和基本理论、复杂系统幂律分布特性的数学解释、基于控制论的自组织临界一般原理及电力系统演化机制模型等内容;第二部分(第5~8章)主要利用复杂系统自组织临界理论,建立了系列电力系统连锁故障及大停电事故模型,包括基于直流潮流的 OPA 和改进 OPA 模型、基于交流潮流的大停电事故模型、计及无功/电压特性的大停电事故模型以及考虑暂态稳定约束的大停电事故模型等,这些模型可从各个层面全方位地揭示超大规模互联电网的异常动态特性及其机理,评估大停电风险并提出相应的预防措施;第三部分(第9~10章)紧密结合工程实际,初步探讨了自组织临界理论在电网/电源规划和电力应急管理中的应用,包括大电网关键线路和节点的辨识方法、运行参数设置与大电网安全的关系、灾害预警和防灾预案评估等。

本书可以作为电气工程和系统科学专业的研究生教材,也可供从事上述专业的科研人员和工程技术人员参考。

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

电力系统自组织临界特性与大电网安全/梅生伟,薛安成,张雪敏著. —北京:清华大学出版社,2009.4

(现代电力系统丛书)

ISBN 978-7-302-19397-5

I. 电… II. ①梅… ②薛… ③张… III. 电力系统—安全技术 IV. TM08

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 012612 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

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

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

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:20.25 插 页:1 字 数:413千字

版 次:2009年4月第1版

印 次:2009年4月第1次印刷

印 数:1~0000

定 价:00.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:-

作者简介



梅生伟 1984年毕业于新疆大学数学系,获基础数学学士学位;1989年毕业于清华大学应用数学系,获计算数学硕士学位;1996年毕业于中国科学院系统科学研究所,获运筹学与控制论博士学位;1998年10月清华大学电机系博士后出站并留校任教;现为电力系统研究所副所长、教授、博士生导师,主要从事电力系统分析和控制以及控制理论的研究工作。曾获国家杰出青年基金项目资助、教育部科技进步一等奖、国家电网公司科技进步一等奖和国家自然科学二等奖。发表论文200余篇,其中IEEE、IEE等SCI期刊论文50余篇;出版中英文著作6部。



薛安成 2001年毕业于清华大学数学科学系,获理学学士学位;2006年毕业于清华大学电机系,获工学博士学位;2008年3月中国科学院数学与系统科学研究院博士后出站;同年进入华北电力大学电气与电子工程学院四方研究所工作。已在IEEE Trans. CAS-I、《中国科学》、《电力系统自动化》等国内外刊物发表论文30余篇,其中SCI论文6篇,EI论文15篇。已获国家自然科学基金资助项目1项(No. 50707035)。曾参与“973”子课题“实时综合稳定域及可视化”等多项科研项目。曾在香港大学电机与电子工程系、香港理工大学数学系和清华港大深圳电力系统研究所担任研究助理。主要从事电力系统分析、控制和保护等研究。



张雪敏 2001年获清华大学电气工程学士学位,2006年获清华大学电气工程博士学位并留校任教。研究方向为电力系统稳定分析与控制。已发表SCI论文4篇,EI论文12篇,编著图书1部。曾赴英国Brunel大学进行为期半年的访问研究。参与“973”课题“大电网安全性评估的系统复杂性理论研究”、自然科学基金重大项目子课题一“影响超大规模电力系统安全性的动态行为与特征”、“四川电网灾难性事故及防治对策研究”和“东北500 kV电网混成自动电压控制系统”等多项基础研究和重大工程研发。

《现代电力系统丛书》编委会(第三届)

主 编：卢 强

副主编：周孝信 韩祯祥 陈寿孙

编 委：(按姓氏笔画排序)

王祥珩 甘德强 卢 强 余贻鑫 张伯明

杨奇逊 陈 陈 陈寿孙 周孝信 贺仁睦

赵争鸣 倪以信 夏道止 徐 政 顾国彪

梁恩忠 程时杰 韩英铎 韩祯祥

责任编辑：张占奎

丛 书 序

当我剪烛为这篇短序时,竟几次因思绪万千未开头便搁笔。出版“现代电力系统丛书”是我的导师高景德院士于1990年开始构思、策划的。作为一位科学家和教育家,高先生十分重视“丛书”对提高我国电力系统学术水平和高层次人才培养方面的重要作用。先生认为:各领域的科技专著应是那个领域最前沿和最高水平科技成果的结晶,是培育一代代科技精英和先锋人物的沃野和圣堂。先生对我说:优秀著作是人类先进思想和成果最重要的载体,正是它们构成了人类文化、科技发展万世不竭的长河。导师的教导音犹在耳。

1997年因这位清华大学老校长烛炬耗尽致使“丛书”出版工作一度停顿。三年后,清华大学出版社重新启动了“丛书”的出版工作,于2002年组成了第二届编委会,继擎着高景德院士亲手点燃的火炬前行。

自1992年以高先生为主编的第一届编委会成立起,至2006年止,我国的电力装机提高了2.7倍,年均以将近20%的速度增长。这在世界各国电力工业发展史上是绝无仅有的。此刻我想到,高先生的在天之灵会问我们这些晚辈:我国的高科技含量的增长是否也与我国的电力总量的增长相匹配?这一问题是要我国电力科技工作者用毕生不懈的努力来回答的。

时光如梭,2002年的第二届编委会又到了换届之时,感谢数位资深编委出色完成了他们的职责。时至2007年5月,第三届编委会在清华大学出版社主持下成立。编委共19名,包括四位中国科学院院士,四位中国工程院院士,其他皆为处于我国电力系统顶尖之列的精英学者,其中不乏新充实的优秀中青年学者。保证了“丛书”的火炬不仅能得以传承,而且会愈燃愈旺。本次编委会进一步明确“丛书”涵盖的领域为:电力系统建模、分析、控制,以安全稳定经济运行为主;新能源并网发电,如风力发电、太阳能发电等;分布式能源电力系统等内容。

至今,该“丛书”系列已出版专著约十本,预计今明两年将至少再出版六部。应该说已出版的该系列专著已经引领几代青年学者、科技工作者走上了科技大道。近年来,我们在“电力系统灾变防治和经济运行重大科学问题”方面得到国家首期“973”项目资助和支持,并取得了一些突破性进展;电力领域第二期“973”项目“提高超大规模输电系统的运行可靠性研究”从2004年推着前浪前进,成果丰硕。所取得的这些前沿成果将在“丛书”中得到充分的体现。有些成果在世界上未有先例。因此,我们相信中国电力科学会引领世界电力科技的发展;相信“丛书”系列还将继续引领和帮助

一代代电力界科技工作者开辟康庄之途。

按照高景德院士的教育思想，“丛书”的作用主要不是去“灌满一桶桶的水”，而是去“点燃一把把的火”。

导师英名长存。感谢清华大学出版社使“丛书”之炬得以传承。

相信中国电力科技能成为世界电力科技引路之光。

卢 强

2007年7月于清华园

序

随着我国电力需求的快速增长,西电东送、全国联网战略的实施,我国电网的规模和复杂程度不断增大,目前已成为世界上最复杂的人造工业网络系统之一。确保我国超大规模电网安全稳定,显著提高其运行可靠性成为电力科技工作必须实现的最高目标。

近年来,国内外发生了多起由连锁故障引发的大停电事故,即电力系统灾变事件,并因此造成了巨大的经济损失和严重的社会危害,甚至影响到国家安全。这些大停电事故的频繁发生,引起了科学界和工程界专家学者的高度重视。有鉴于此,应用先进的复杂系统理论,探索电力系统灾变的统计规律,分析大停电事故的内在原因及形成机理并寻找有效的灾变预防途径,成为具有重大现实意义的科学问题。

自组织临界理论最早是由丹麦科学家 Per Bak 等于 1987 年提出并建立的,主要用于分析并阐释无序的、非线性的复杂系统的行为特征。该理论甫经建立,即在工程、社会和自然等诸多领域产生了广泛的影响。进入 21 世纪以来,自组织临界理论被应用于电力系统,其中一个标志性进展便是由美国学者提出的 OPA 模型,该模型可从快慢两个时间尺度模拟电网演化过程并提出预防灾变的控制措施。自组织临界理论研究大电网的基本思路是:电力系统的运行和演化受到内外两种因素的制约,其中前者主要包括潮流和发电机的动态等,后者则指系统升级、网络建设等。在内外两种因素的作用下,电力系统总是处于持续的非平衡状态;而又由于系统内部要素之间的相互作用,进一步自发地驱使系统运行至一种临界稳定的状态,即临界态。当系统处于这种自组织临界状态时,任意微小的扰动都可能引发意想不到的后果,甚至引发连锁事件并最终导致灾变,即大停电事故发生。电力系统大停电的整体动态行为,可能是由表征系统处于自组织临界状态的不稳定结构产生的,这就是自组织临界理论能够用来揭示复杂电力系统的临界整体行为特征的关键所在。有关电力系统自组织临界性的研究目前已有许多工作,但由于识别灾变特征是当前非线性科学领域的普遍难题,故迄今为止,尚没有建立电力系统自组织临界的一般理论,包括表征电力系统大停电过程的模型设计、大停电风险评估方法和相应的预防控制策略以及大电网安全水平临界量的提取等。

清华大学电机系的梅生伟教授及其所负责的“973”项目子课题组,勇于探索,锐意进取,在电力网络复杂性领域取得了长足的进展。该书即是他们四年研究工作的结晶,其内容概括起来主要有三个方面:一是利用概率论和随机过程为大电网的自

组织临界理论奠定了严格的数学基础；二是利用先进的复杂系统理论，建立了一系列电力系统大停电事故模型，可从各个层面全方位地揭示超大规模互联电网的异常动态特性及运行机理，评估大停电风险并提出相应的预防措施；三是紧密结合工程实际，初步探讨了自组织临界理论在电网规划和公共安全及应急体系中的作用。

该书是国内外电网复杂性研究领域的首部专著，相信该书的出版对提高我国超大规模互联电网运行的安全可靠性和应用价值，同时也希望该书对我国电力系统的发展、电力系统学科水平的提高有所裨益。

中国科学院院士、中国电力科学研究院总工程师 周孝信

2008年5月

前 言

电力网络是当今世界覆盖面最广、结构最复杂的人造系统之一。作为国民经济的支柱,电网的安全运行与国计民生息息相关,而近年来频频发生的大面积停电事故则充分暴露了大型互联电网脆弱性的一面。迄今为止,电力科技工作者对发生在世界各主要电力系统的大面积停电事故原因进行了详尽的分析研究,但很多情况下仍不能给出具有说服力的理论分析结果,也未能阻止停电事故的继续发生。如1996年美国西部电网相继发生两次大面积停电后,北美电力可靠性委员会(North American Electric Reliability Corporation, NERC)成立了“新”的互联系统动态工作组,研究了有关系统稳定、电压、无功电源、系统控制和保护等一系列问题,并协助制订为保证互联系统能正确地规划设计和可靠运行的标准程序和原则^①;然而时隔七年的2003年8月14日,又发生了震惊世界的美加大停电,这一次与1996年的两次大停电相比损失更为惨重。究其原因,是对电网本身的特性和电网大面积停电事故的机理缺乏有成效的理论研究,对若干复杂现象缺乏科学的理论解释和分析方法,如电网的演化特性、连锁反应事故发展机理等,而这正是当前电网安全分析研究的难点,也是包括我国电网在内的世界各国电网提高安全可靠水平必须解决的基础性科学问题。

由于大电网结构和运行方式的复杂性,现有的电力系统分析计算理论和试验方法对连锁故障引起的大型互联电网大面积停电事故本质的认识还远远不够,主要表现为以下两方面:一是电力系统中的职能部门各有分工,分别管理电力系统规划、建设和运行等,从而导致电力系统的长期演化过程被割裂、简化成很多片断和子问题;二是通用的 $N-1$ 和 $N-2$ 校验标准假设连锁故障是小概率事件,并认为这些事件造成系统大停电的影响也因其概率很小而可以忽略。然而,正是这些被忽略的多重连锁故障引发了一次次的大停电事故。直到2000年,人们才发现大停电的概率分布并不是正态分布而是幂律尾形式的分布,换言之,大停电的风险不容忽视。上述事实提醒我们要研究大停电必须建立合理的分析模型,并基于此指导电力系统规划和运行等。

近几年,国内外学者将复杂系统理论和方法应用于计算机网络、生态学、社会学以及经济学等相关学科的研究并取得诸多重要进展,但在大型互联电网的大面积停电事故方面,现有的研究仅从统计学角度给出了电网连锁故障具有自组织临界性质

^① 中国知网,中国知识基础设施工程知识元。北美电力系统可靠性管理。<http://www1.cnkd.cnki.net>

的初步结论；而对于电力系统复杂特征、复杂电网结构稳定性及自组织临界一般理论方法的探索，目前尚无实质性进展。

本书的编写思路，就是利用自组织临界理论和方法深入系统地研究大型互联电网连锁故障的发生和发展过程，从网络演化角度探讨互联电网的时空演化特性和动态特性，给出大电网灾变的风险评估指标，提出防止灾变的预防控制策略。

本书共 10 章，各章主要内容如下：

第 1 章为绪论，主要从复杂性科学的角度探讨电力系统大停电与自组织临界特性，并扼要介绍电力系统自组织临界特性领域的研究进展以及全书的背景和结构。

第 2 章介绍与自组织临界理论相关的数学和统计物理方面的基本概念和基本理论，继而以此为基础重点讨论复杂系统的幂律分布特性，并给出初步的数学解释。

第 3 章介绍自然界或社会中多种典型的自组织临界现象，并在此基础上讨论自组织临界的一般特征，尔后基于控制论介绍自组织临界一般原理。

第 4 章首先阐述电力系统演化机制的数学模型，然后讨论基于我国电力系统大停电统计数据所揭示的大电网自组织临界现象，并提出风险评估指标。

第 5 章讨论基于直流潮流的大停电事故模型，包括 OPA 和改进 OPA 两种模型，进而在宏观和微观两个层次研究电力系统的自组织临界特性。

第 6 章建立了基于交流最优潮流的大停电事故模型，该模型由内外两层循环结构组成，其中内循环利用交流最优潮流模拟电力系统快动态并分析其临界性，外循环从宏观上研究和分析电力系统的长时间演化过程即慢动态，能够清晰揭示电网宏观自组织临界特征及演化机理。

第 7 章讨论计及无功/电压特性的大停电事故模型，重点研究大停电中的电压稳定及电压崩溃问题，并从无功电压角度分析电力系统的自组织临界特性。

第 8 章基于暂态约束下的最优潮流，提出涵盖电力系统三个时间尺度动态特性，即暂态、快动态和慢动态的大停电事故模型。该模型既可更真实地反映连锁故障的起因及其物理过程的演化，又可考虑预防控制和紧急控制措施，从而使模拟人为控制因素对大停电的影响成为可能。

第 9 章初步探讨自组织临界理论在电网规划和电源规划方面的应用。

第 10 章探讨基于自组织临界理论的电网连锁故障模型在电力系统应急管理中的应用。

本书的写作遵循内容完备和求实创新两项原则。前者指本书首先利用概率论、随机过程和统计物理等基础理论系统地梳理和总结了复杂系统自组织临界一般理论，进而利用该理论研究互联大型电网的安全稳定问题；后者指本书不仅力图做到理论严谨，即所有概念、原理和算法均给出了相关的数学说明或证明，而且力求介绍前沿领域，特别是作者自身及所在研究团队的最新理论及应用成果。此外，本书侧重基础理论和工程背景相结合，而在基本原理阐述方面和算法设计方面，则力求简明扼要、通俗易懂。涉及有关概率论、控制理论等数学基础知识时，不拘泥于严格的数学推导，从而便于具有工科数学基础的读者能够理解本书的基本内容。鉴于上述两项

写作原则,相信本书对研究和学习复杂系统理论和应用的读者也有所裨益。

本书的写作动机应追溯到2004年。当年4月,我有幸参与中国电力科学研究院周孝信院士主持的国家重点基础研究计划“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”,并具体参加子课题二“大电网安全性评估的系统复杂性理论研究”。当时主要缘于两个原因让我萌发写作一本系统地介绍大电网复杂性基础理论与学术前沿著作的想法:一是自恃数学出身并对复杂系统有浓厚的兴趣;二是多年来一直工作在电力系统领域,以为二者结合总会有“机”可趁。现在看来有不自量力之嫌,尤其完全低估了这项工作的难度。四年光阴匆匆而过,期间在研究过程中碰到许多困难,迭有灰心动摇之念。所幸周院士在布置指导课题研究方向时,即明确提出要用复杂性科学理论研究大型互联电网,并特别强调从宏观上研究大电网的整体动态行为,从而为本书涉及的研究确定了主攻方向。更让我终身难忘的是,每年一度的“973”学术交流会上周孝信和韩祯祥两位院士总是鼓励和支持我们在该领域进行不断的努力,特别强调要勇于探索,敢于失败,表现了一流科学家宽广的胸襟和卓识的远见。正是因为他们的教诲,使我和本书的另外两位青年作者终于能够坚持下去,最终造就本书。还要特别感谢我的导师卢强院士,正是卢先生的强力推荐和支持,才使得本书有幸成为“现代电力系统丛书”的一册。同时本书大纲(包括书名)更是先生字斟句酌而得,若干重要研究工作均得到先生耐心细致的指点。

本书不仅是一本复杂系统自组织临界理论的基础读物,而且也是一本反映大电网安全研究前沿进展的著作。我们希望该书成为大电网一般复杂性理论的抛砖引玉之作,同时也能为大电网灾变防治提供有益的启示。总之,期望本书在学术研究和工程实践方面具有一定的借鉴意义。

本书在全面总结该领域国内外研究成果的基础上,重点介绍了近年作者从事国家重点基础研究发展计划项目(No. 2004CB217902)、国家杰出青年基金项目(No. 50525721)和国家自然科学基金重大项目子课题一(No. 50595411)等有关课题所取得的最新成果。在项目研究和本书写作过程中,得到了香港大学 Felix F. Wu 教授、倪以信教授以及中国科学院系统科学研究所洪奕光教授和中国电力科学研究院郭剑波教授、浙江大学曹一家教授的热情帮助和支持,其中倪以信教授素我景仰,特别荣幸的是她曾三次邀请我赴香港大学访问交流,本书许多重要成果深得倪老师谆谆教益;郭剑波教授以丰富的工程实践和深刻的洞察力见长,本书关于电网演化生长的研究即得益于他的点化。浙江大学甘德强教授认真审阅了全稿并提出了诸多宝贵意见。本书所涉及的部分内容,包括清华大学电机系研究生何飞、翁晓峰、夏德明、王刚、倪向萍、王莹莹、伍声宇和田超等刻苦研究的成果。在此一并向他们表示感谢。

清华大学出版社对本书出版给予了大力帮助和支持,谨借此机会表达深切的谢意。

梅生伟

2008年5月于清华园

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 从复杂性科学角度看大电网	1
1.2 SOC 理论与大停电	6
1.3 大停电数据的 SOC 实证分析.....	8
1.4 电力网络的复杂特性	8
1.5 连锁故障模型.....	10
1.5.1 基于网络拓扑结构的连锁故障模型	11
1.5.2 基于元件级联失效的连锁故障模型	15
1.5.3 基于电网动态特性的连锁故障及大停电事故模型	16
1.6 本书内容概览.....	20
第 2 章 SOC 若干基本概念	22
2.1 随机变量.....	22
2.1.1 概率	22
2.1.2 随机变量和分布函数	24
2.1.3 连续型随机变量	25
2.1.4 随机变量的数字特征	27
2.2 随机过程.....	29
2.2.1 随机过程及其数字特征	30
2.2.2 平稳随机过程	32
2.2.3 各态历经过程	35
2.2.4 随机信号时域特征的估计	36
2.3 随机过程的频域特性——能量和谱.....	38
2.3.1 实随机过程的功率谱密度	38
2.3.2 实随机过程的互功率谱密度	40
2.4 Brown 运动和噪声	41
2.4.1 Brown 运动	42
2.4.2 噪声	43

2.5	中心极限定理	45
2.5.1	一般形式的中心极限定理	46
2.5.2	Donsker 不变原理	47
2.6	标度不变性	47
2.6.1	多尺度系统和自相似性	48
2.6.2	标度不变性的示例	49
2.7	涨落	50
2.8	幂律与相关性	52
2.8.1	幂律	52
2.8.2	Levy 分布	53
2.8.3	Levy 分布与长程相关	55
2.8.4	SWV 方法	58
2.8.5	R/S 方法	59
2.8.6	R/S 方法与 Levy 幂律分布	59
2.8.7	广义中心极限定理	60
2.9	几点讨论	61
第 3 章	SOC 一般性原理	62
3.1	组织与自组织	62
3.2	SOC 现象与临界态	64
3.2.1	自然界中的 SOC 现象	64
3.2.2	临界态和非临界态	68
3.3	SOC 特征	69
3.4	基于控制论的 SOC	71
3.4.1	演化系统的数学描述	71
3.4.2	系统演化过程和 SOC	72
3.5	SOC 与复杂性	73
3.6	SOC 与混沌	74
3.7	SOC 与 HOT	75
3.8	几点讨论	77
第 4 章	电力系统 SOC 基础	78
4.1	电网演化机制模型	79
4.1.1	暂态过程模拟	80
4.1.2	快动态过程模拟	86
4.1.3	慢动态过程模拟	88
4.1.4	电网生长演化过程模拟	91

4.2	电力系统大停电的 SOC 现象	98
4.2.1	我国电网停电事故统计的幂律特征	98
4.2.2	基于 SWV 方法的我国电网事故自相关性分析	103
4.2.3	基于 R/S 方法的我国电网事故自相关性分析	107
4.3	电力系统控制与 SOC	108
4.4	电力系统风险评估	109
4.4.1	VaR	109
4.4.2	CVaR	110
4.4.3	基于历史统计数据的停电风险评估	111
4.4.4	关于 VaR 和 CVaR 的进一步讨论	112
第 5 章	基于直流潮流的大停电事故模型	114
5.1	直流潮流及优化模型	114
5.1.1	直流潮流简介	114
5.1.2	基于直流潮流的优化问题	117
5.2	OPA 模型	118
5.2.1	OPA 模型简介	118
5.2.2	基于 OPA 模型的电力系统 SOC 分析	120
5.3	改进 OPA 模型	127
5.3.1	改进 OPA 模型设计	127
5.3.2	基于改进 OPA 模型的电力系统 SOC 分析	130
5.4	若干问题的讨论	143
第 6 章	基于交流潮流的大停电事故模型	144
6.1	最优潮流数学模型	144
6.2	模型设计	145
6.2.1	模型结构	145
6.2.2	快动态过程(内部循环)	145
6.2.3	慢动态过程(外部循环)	147
6.2.4	模型特点	147
6.3	连锁故障仿真	148
6.3.1	控制参数设计	148
6.3.2	IEEE 30 节点系统	149
6.3.3	东北 500 kV 主干网系统	153
6.3.4	网络拓扑对连锁故障的影响	159
6.4	宏观 SOC 特征提取及临界性分析	160
6.4.1	快动态的临界性	161

6.4.2	宏观 SOC 特征提取	162
6.4.3	东北 500 kV 主干网系统临界性分析	164
6.5	几点讨论	166
第 7 章	计及无功/电压特性的大停电事故模型	167
7.1	大停电事故模型 I	167
7.2	大停电事故模型 I 的无功/电压分析方法	168
7.2.1	临界电压分析方法	168
7.2.2	基于常规潮流的无功/电压模态分析方法	170
7.2.3	基于最优潮流的无功/电压模态分析方法	172
7.3	基于大停电事故模型 I 的 SOC 分析	175
7.3.1	三类临界特征指标	175
7.3.2	仿真算例	176
7.3.3	典型运行参数对停电事故分布的影响	187
7.4	大停电事故模型 II	191
7.5	大停电事故模型 II 的无功/电压分析方法	192
7.5.1	负荷裕度算法	192
7.5.2	大停电事故模型 II 切负荷环节的精确建模	194
7.6	基于大停电事故模型 II 的 SOC 分析	197
7.6.1	大停电过程中临界特征指标变化趋势	197
7.6.2	典型运行参数对停电分布的影响	198
7.7	几点讨论	200
第 8 章	基于 OTS 的大停电事故模型	202
8.1	暂态稳定裕度指标	202
8.1.1	暂态稳定裕度指标的构建	203
8.1.2	暂态稳定裕度指标的计算	205
8.1.3	暂态稳定裕度指标灵敏度的求取	206
8.2	OTS 数学模型和算法实现	207
8.2.1	常规最优潮流(OPF)	208
8.2.2	暂态稳定约束处理	209
8.2.3	含暂稳约束的最优潮流(OTS)	209
8.2.4	OTS 算法实现	210
8.2.5	10 机 39 节点系统仿真分析	210
8.2.6	OTS 算法的几点说明	217
8.3	大停电事故模型	218
8.3.1	暂态过程(内层循环)	219

8.3.2	快动态过程(中层循环).....	221
8.3.3	慢动态过程(外层循环).....	224
8.4	连锁故障过程模拟	226
8.5	宏观 SOC 特征提取及临界性分析.....	232
8.6	快动态临界性及风险评估	234
8.7	进一步的讨论	236
第 9 章	电源及电网规划应用	237
9.1	现有电源及电网规划的不足	237
9.2	关键线路辨识方法	239
9.3	关键电源辨识方法	243
9.4	线路传输容量增长因子与停电风险	246
9.5	重载线路切除概率与停电风险	247
9.6	小结	250
第 10 章	电力应急管理平台应用	251
10.1	电力应急平台简介.....	251
10.1.1	电力应急平台总体结构.....	252
10.1.2	辅助决策系统基本原理.....	254
10.2	基于直流潮流的电网灾变预测预警模型.....	255
10.2.1	模型设计.....	255
10.2.2	仿真分析.....	257
10.3	基于交流潮流的电网灾变预测预警模型.....	270
10.3.1	模型设计.....	270
10.3.2	仿真分析.....	272
10.4	小结.....	277
附录 A	IEEE 30 节点系统线路参数	279
附录 B	东北电网 500 kV 主干网络线路参数	280
附录 C	IEEE 118 节点系统线路参数	281
附录 D	电力设备停运影响因素分类	285
附录 E	电力设备停运概率模型	286
附录 F	名词索引	290
参考文献	293