

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



大电网安全性评估的 系统复杂性理论

曹一家 郭剑波 梅生伟 侯云鹤

清华大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍了复杂性理论及其在大电网安全分析领域的应用,内容分为9章。第1章研究了电力系统的复杂性特征,提出了构建电力系统复杂性理论的框架及研究电力系统复杂性理论的综合集成方法。第2章介绍了电力系统大停电的自组织临界现象,通过对北美及我国大停电的历史数据分析,证明了大停电规模与频率之间呈幂律关系以及大停电规模分布的分形分维特征。第3章主要介绍序优化算法和电网演化机制一般模型,该模型将电网演化过程中的动态行为划分为三个时间尺度,涵盖了电力系统长期演化发展过程中的各个要素。第4章利用复杂网络理论研究了电力网络的静态和动态特性,研究了网络结构对于电网安全的影响,提出了线路脆弱度的评估方法。第5章结合电力网络的实际特性,提出了电力网络的局域世界演化模型和电力网络的时空演化模型,并对电力网络结构脆弱性进行了分析。第6章提出了基于直流潮流的改进OPA模型和基于交流潮流的大停电事故。第7章建立了考虑暂态稳定约束的大停电事故模型。第8章提出了改进的连锁故障模型,从时间和空间两个尺度同时刻画电网的演化,并进一步提出了有效准确地评估电力系统连锁故障风险和连锁故障的多智能体控制方法。第9章紧密结合工程实际,初步探讨了自组织临界理论在电力应急管理中的应用。

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

大电网安全性评估的系统复杂性理论/曹一家等著. --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 978-7-302-24057-0

I. ①大… II. ①曹… III. ①电力系统—安全性—评价—复杂性理论—研究报告
IV. ①TM08

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第200028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:19.25

字 数:450千字

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:75.00元

产品编号:037675-01

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均进行了详尽的分析研究,但很多情况下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;然而时隔 7 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认识连锁故障引起的大型互联电网大面积停电事故的本质还远远不够,主要表现为以下两方面:一是电力系统中的各职能部门各有分工,分别管理着电力系统规划、建设和运行等,从而导致电力系统的长期演化过程被割裂、简化成很多片段和子问题;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,而且统计数据表明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,在大型互联电网的大面积停电方面也逐渐兴起。

广义地说,自组织临界意味着标度不变性,意味着复杂现象背后具有简单的遵循幂律分布的统计规律,也意味着或大或小的灾变都有可能发生,即极端事件的概率不能忽略。自组织临界现象发生在很多组元相互作用的系统,这类系统除了内部的作用力之外还存在着外部驱动力;自组织过程要求外部的影响因素相对比较弱,也就是内部作用力是主导因素;自组织的方向是驱使系统朝着临界状态发展,这类似于平衡态系统发生相变的临界点,但不是所有系统都会朝着临界态发展,尤其当外部作用很弱时;外部驱动应该较之内部动态过程慢,也就是具有相对较长的时间尺度;阈值值的存在是发生自组织临界现象的必要非充分条件,它使得系统存在很多种亚稳定态,反映了系统的局部稳定程度,并且提供了度量当前态与临界态之间距离的方法,而该距离通常可作为评估系统安全稳定的裕度指标。自组织临界理论认为,任何系统的运行与演化都受制于快慢两种变量(或称快动态、慢动态)的作用。

当这两种作用达到一定条件时,系统进入临界运行状态。此时针对系统的任何一个扰动,都有可能使系统发生预想不到的变化。

为了模拟电力系统停电事故数据的幂律特性及其蕴涵的临界性质,学者们提出了各种电力系统停电模型模拟电力系统连锁故障和大停电,其中主要有基于“近似”直流潮流和隐故障机理的隐故障模型,基于直流最优潮流的 OPA 模型,基于负荷切除和交流潮流的 Manchester 模型等。以上模型都模拟了连锁故障大停电事故的发生和发展过程,从不同的角度分析了大电网的安全性。然而上述方法都存在一定的特殊性和局限性。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,也未有实质性进展。

鉴于此,本书在深入研究和分析电力系统运行特性的基础上,结合复杂性理论分别对电力系统大停电的复杂性和自组织临界、电网结构脆弱性分析及电力系统连锁故障风险评估与控制等方面进行了较深入的研究,提出了基于复杂网络理论和自组织临界理论的电网演化机制一般模型,该模型涵盖了电网演化的所有动态行为,前人提出的所有模型的方法都是该一般模型的简化。另外,我们通过研究电力网络的结构性质进一步揭示了电力系统大停电的自组织临界性。对所提出的一般模型做相应的简化,我们得到了若干适用于特定环境的模型,如基于直流潮流的改进 OPA 模型、基于交流潮流的大停电事故以及考虑暂态稳定约束的大停电事故模型。最后,我们将上述研究成果应用于电力系统应急管理平台。

参加本课题研究的人员包括:曹一家、郭剑波、梅生伟、韩祯祥、吴复立、倪以信、江全元、侯云鹤、甘德强、包哲静、钟金、于群、吴浩、丁理杰、王光增、陈晓刚、孙可、薛安成、何飞、倪向萍、夏德明、翁晓峰、王莹莹、马韬韬、陈为化、李蓉蓉、刘友飞、刘皓明、刘磊、朱浩骏、余畅、杜兆彬、周华锋、贾庆山、宿吉锋、谢敏等。

本书初稿执笔分工如下:第 1,5,8 章和第 2,9 章的部分内容由曹一家教授主笔,第 3 章的部分内容由侯云鹤博士主笔,第 4,6,7 章和第 3,9 章的部分内容由梅生伟教授主笔,第 2 章部分内容由郭剑波教授主笔,全报告由曹一家、郭剑波教授统稿。

目 录

第 1 章 复杂性科学与电力系统的复杂性	1
1.1 前言	1
1.2 复杂性科学与电力系统的复杂性理论	1
1.2.1 复杂性科学的建立发展与现状	1
1.2.2 电力系统灾变防治研究的复杂性理论框架	4
1.3 复杂电力系统灾变防治的综合集成方法论初探	5
1.3.1 复杂电力系统研究需要新的科学方法	5
1.3.2 综合集成方法的基本思想及其在电力系统中的应用	6
1.3.3 电力系统复杂性研究的相关问题	7
参考文献	9
第 2 章 电力系统大停电的自组织临界现象	10
2.1 前言	10
2.2 自组织临界性	11
2.3 电力系统大停电的自组织临界性	12
2.4 电力系统大停电的规模与频率的幂次规律	14
2.5 电力系统大停电的规模分布的分形分维特征	15
2.6 电力系统大停电的自组织临界性的意义	16
2.7 我国电力系统大停电事故自组织临界性的研究	16
2.7.1 引言	16
2.7.2 自组织临界性	17
2.7.3 资料来源及研究方法	17
2.7.4 数据分析及结果	18
2.7.5 沙堆模型在电力系统中的应用	22
2.7.6 小结	23
2.8 电网停电事故的极值分析	23
2.8.1 极值理论及幂特征下的极值分布	23
2.8.2 实例计算	24
2.8.3 小结	25
参考文献	25
第 3 章 复杂电网的规划方法和演化机制模型	28
3.1 电力系统复杂性描述	28
3.1.1 基于 F-matrix 的电网安全复杂性评价	28
3.1.2 大型互联电网 HOT 性质分析	29
3.2 序优化理论及其在电力系统规划中的应用	33
3.2.1 序优化理论	33

3.2.2	基于单目标序优化理论的输电网规划	35
3.2.3	基于向量序优化理论的多目标输电网规划	40
3.3	电网演化机制模型	44
	参考文献	46
第4章	电力网络复杂性	47
4.1	电力网络的结构脆弱性	47
4.2	复杂静态电力网络的脆弱性	50
4.2.1	互补性脆弱度指标集	50
4.2.2	输电线路脆弱度评估方法	53
4.3	静态电力网络的分解与协调	55
4.3.1	基于社团结构的无功分区算法	55
4.3.2	基于控制中心度的关键节点选取	58
4.4	复杂动态电力网络的等值与化简	62
4.4.1	动态电力网络的 Laplace 矩阵	63
4.4.2	同调等值新算法	66
4.5	动态电力网络的同步化控制	68
4.5.1	发电机的同步能力系数	68
4.5.2	扰动对同步能力系数的影响	68
4.5.3	切机策略计算方法	69
	参考文献	70
第5章	电力网络拓扑特性研究	72
5.1	电力网络建模	72
5.1.1	引言	72
5.1.2	电力网络局域世界演化模型	73
5.1.3	电力网络时空演化模型	80
5.1.4	小结	90
5.2	电力网络的脆弱性研究	92
5.2.1	引言	92
5.2.2	基于隐性故障模型和风险理论的关键线路辨识	93
5.2.3	基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析	101
5.2.4	基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识	108
	参考文献	115
第6章	改进 OPA 模型与考虑电压的大停电模型	118
6.1	改进 OPA 模型	118
6.1.1	基于直流潮流的优化问题	118
6.1.2	改进 OPA 模型	119
6.2	基于交流潮流的大停电事故模型	126
6.2.1	最优潮流数学模型	126
6.2.2	模型设计	127

6.3	计及无功/电压特性的大停电事故模型	129
6.3.1	大停电事故模型 I	129
6.3.2	大停电事故模型 I 的无功/电压分析方法	130
6.3.3	大停电事故模型 II	132
6.3.4	大停电事故模型 II 的无功/电压分析方法	133
	参考文献	138
第 7 章	OTS 大停电模型	139
7.1	暂态稳定裕度指标	139
7.2	OTS 数学模型和算法实现	141
7.2.1	暂态稳定约束处理	141
7.2.2	含暂稳约束的最优潮流	142
7.2.3	OTS 算法实现	142
7.2.4	10 机 39 节点系统仿真分析	142
7.3	大停电事故模型	146
7.3.1	暂态过程(内层循环)	146
7.3.2	快动态过程(中层循环)	147
7.3.3	慢动态过程(外层循环)	148
7.4	连锁故障过程模拟	149
7.5	自组织临界性分析	150
7.5.1	宏观自组织临界性分析	150
7.5.2	快动态临界性及风险评估	150
7.6	电源及电网规划应用	152
7.6.1	关键线路辨识与调整方法	152
7.6.2	电源规划方法	154
7.6.3	线路传输容量增长因子的参数调整	156
7.6.4	重载线路切除概率参数调整	157
7.7	复杂电力系统评估体系	158
7.7.1	一致性风险度量	159
7.7.2	风险备用与条件风险备用指标体系	159
7.7.3	新指标体系的应用	163
	参考文献	167
第 8 章	电力网络连锁故障研究	169
8.1	连锁故障建模	169
8.1.1	引言	169
8.1.2	直流潮流计算	170
8.1.3	基本的 OPA 模型	171
8.1.4	考虑电网演化的连锁故障停电模型与自组织临界性分析	172
8.1.5	时空演化 OPA 模型	179
8.1.6	复杂电力网络的连锁故障动态模型与分析	185

8.2	电力网络连锁故障机理研究	194
8.2.1	引言	194
8.2.2	电力网络连锁故障的协同学原理	195
8.2.3	电力网络连锁故障的潮流熵研究	201
8.2.4	基于潮流熵的复杂电力网络自组织临界性研究	210
8.3	连锁故障风险评估	217
8.3.1	引言	217
8.3.2	连锁故障	218
8.3.3	风险理论及其应用	220
8.3.4	基于模糊神经网络的电力系统连锁故障风险评估	222
8.3.5	考虑继电保护隐性故障的电力系统连锁故障风险评估	229
8.4	电力网络连锁故障的防御及控制	233
8.4.1	引言	233
8.4.2	基于多智能体技术的大电网连锁跳闸预防控制	234
	参考文献	244
第9章	电力应急管理平台应用	251
9.1	电力应急管理平台简介	251
9.2	电力系统灾变演化模型	252
9.3	灾变演化及预警仿真分析	253
9.3.1	正常情况下电网运行风险	253
9.3.2	灾害评价与预警及防灾预案评价	254
9.4	复杂电力系统控制中心概念设计	257
9.4.1	复杂电力系统控制中心的发展方向	257
9.4.2	基于网格服务的未来电力系统控制中心设计	260
9.5	从中长期动态稳定角度研究大面积停电的总体预防	264
9.5.1	中长期动态稳定的研究意义	264
9.5.2	多区域互联电力系统长期动态交流仿真	265
9.6	大停电故障后的恢复	275
9.6.1	机组恢复的优化选择方法	275
9.6.2	网络重构的智能优化策略	282
	参考文献	291

第 1 章 复杂性科学与电力系统的复杂性

1.1 前 言

电力是国家的主要能源和经济命脉,安全、优质地保障电力供给关系国计民生,事关重大。但停电事故时有发生,2003 年 8 月 14 日美国东部和加拿大东部发生的大停电事故,波及美加 8 个州,5000 多万人受到影响,停电时间长达 29 个小时,损失负荷 61 800 MW,停电造成的经济损失在美国达 300 亿美元,在加拿大为 52 亿加元。2003 年还相继发生了 8 月 28 日英国伦敦大停电、9 月 23 日瑞典-丹麦大停电,9 月 28 日意大利全国大停电,12 月 20 日美国旧金山大停电,2004 年 7 月 12 日希腊雅典大停电,2005 年 5 月 25 日的莫斯科大停电等多起重大事故^[1-10]。这些停电事故往往是从系统中某一元件的故障开始,由于控制措施不当或不及时、电网结构的不合理、继电保护装置的误动或拒动,或者是上述多种原因的综合作用,引发了一系列的元件故障,这种连锁性故障的迅速传播,最终导致了电网的大面积停电。

近年来,研究复杂系统和系统复杂性的复杂性科学(complexity science)作为一门新兴的交叉学科受到了国内外学者的广泛关注。系统的复杂性主要表现为系统组成成分的多要素性、结构的多层次性、状态变量的多维性、演化发展的多方向性、有序进化的多规律性等几个方面。现代电力系统也呈现出了以上系统复杂性的特征^[4],停电事故的形成过程就是电力系统中各元件相互作用的非线性过程。当电力系统处于临界状态时,外界的细微扰动将导致大停电事故的发生。因此可以应用复杂性科学的相关理论和方法对电力系统的大停电事故进行探讨。

本报告结合电力系统本身的特性以及本课题计划的研究目标,首先分析了电力系统的复杂性特征,提出了构建电力系统复杂性理论的框架及研究电力系统复杂性理论的综合集成方法。在复杂性理论应用方面,基于复杂性理论,根据所收集到的我国电网实际事故的统计数据,进行了电力系统大停电的幂律分析及分形分析,验证了我国电网具有自组织临界性的特征。

1.2 复杂性科学与电力系统的复杂性理论

1.2.1 复杂性科学的建立发展与现状

20 世纪 80 年代,不同国家不同学科的研究人员不约而同地开始从新的角度来看待自然界和人类社会一些复杂的现象,并由此产生了一门新的 21 世纪交叉学科——复杂性科

学。从本质上讲,复杂性科学是一种关于过程的科学而不是关于状态的科学,是关于演化的科学而不是关于存在的科学。它要探讨的是复杂系统中,各组成部分之间相互作用所突现(emergence)出的特性。

在科学发展史上,从一般系统论到复杂性研究经历了如下的发展过程:20世纪20年代,von Bertalanffy 提出一般系统论。他将生物和生命现象的有序性与目的性和系统整体的结构稳定性联系起来。从理论生物学到一般系统论,提出了“整体观”(现在已发展为“整体论”(wholism))的新方法论。它与分子生物学中回归简单性的“还原论”(reductionism)截然不同。20世纪40年代,McCulloch 由神经网络研究发展成“网络理论”。von Neumann 和 Turing 奠定了电子计算机的数学、逻辑学和物理学基础。前者是人工生命研究的先驱,后者是人工智能研究的先行者,他们首先对复杂系统进行理论研究。60年代,Prigogine 创立“耗散结构论”。70年代,Haken 创立“协同学”,大大推动了自组织理论的发展。80年代,Gellmann, Anderson 和 Arrow 等人于1984年在美国 New Mexico 州的 Santa Fe 创立了“桑塔费研究所”(SFI),发起并推动复杂性研究。

应该说,复杂性科学研究的前沿阵地是美国新墨西哥的圣菲研究所。这里汇集了一批不同领域的科学家,他们通过对不同学科之间的深入探讨,试图找出各种不同的系统之间的一些共性,并称之为“Complexity”。其早期的主要学术观点认为复杂系统是由大量相互作用的单元构成的系统,基本思路是复杂适应性系统理论与基于多智能体(agent)的计算机仿真与模拟。复杂性的研究内容则是研究复杂系统如何在一定的规则下产生有组织的行为以及系统的进化所突现出来的行为。近年来,SFI 的一些科学家如 Holland, Arthur, Kauffman 等,拓宽了复杂系统的研究内容,把兴趣逐步转移到复杂自适应系统(evolving complex system)、混沌边缘(edge of chaos)、人工生命(artificial life)和系统进化(evolution of system)的研究。桑塔费研究所的工作对传统的经济学、社会学、生物学造成了巨大的影响。

在我国,复杂系统和复杂性問題已引起许多科学家的深切关注和重视^[11-15]。以著名科学家钱学森为首的我国学者则在20世纪90年代初期提出了开放的复杂巨系统理论,其基本观点是对于自然界和人类社会中一些极其复杂的事物,从系统学的观点来看,可以用开放的复杂巨系统来描述,解决这类问题的方法是从定性到定量综合集成研讨厅体系。自2000年开始,在国家自然科学基金委员会支持下设立了“复杂性科学”专项基金资助,开展了物理、经济和生物等领域的复杂性问题的研究。最近,国家陆续推出与复杂网络系统的复杂性研究紧密相关的重大课题和重点项目。例如,国家自然科学基金委员会2003年推出两个重大研究计划——“以网络为基础的科学活动环境研究”和“化工过程中的时空多尺度结构及其效应”,以及一些有关的重点项目——“时空斑图和时空混沌系统的研究”、“复杂非线性力学系统的分析与控制研究”、“复杂动态系统的建模与控制”、“基于互联网络的控制理论与方法研究”、“化学工程中的复杂系统及其多尺度方法”。所有这些项目的研究不仅将可以解决各自领域网络相关的重要科学问题,而且更可以为复杂性科学的发展和應用提供生动的范例。

近年来复杂系统理论的研究出现了一个新的方向,即复杂网络理论。它主要研究大规模网络,如典型大规模复杂人造网络(互联网、交通网、电网等)的复杂特性。对复杂网络的定性特征与定量规律的深入探索、科学理解以及可能的应用,已成为网络时代复杂性科学研究

究中一个极其重要的挑战性课题。特别是,国际上有两项开创性工作掀起了一股研究复杂网络的热潮。一是1998年Watts和Strogatz在*Nature*上发表文章,提出了小世界网络的概念^[16],以描述从完全规则网络到完全随机网络的转变。该网络具有两个特性,即很小的平均距离和较大的簇系数,这两个特性就是通常意义上的小世界效应。该模型尽管具有小世界效应,但不足以用来刻画真实系统中的复杂网络,它与早期的一些随机网络一样,其顶点度的分布符合Poisson分布。二是1999年Barabasi和Albert在*Science*上发表文章指出,许多实际的复杂网络的连接度分布具有幂律形式^[17]。由于幂律分布没有明显的特征长度,该类网络被称为无尺度(scale-free)网络。随后,人们相继提出并研究了多种复杂网络模型及其性质,特别是这类网络的拓扑结构与网络行为之间的关系、它们的同步问题,以及复杂网络对于随机性“故障”、“错误”和“攻击”的“鲁棒性”与“脆弱性”的关系,等等。

总结目前的研究成果,复杂性科学的基本原理如下^[14]。

(1) 整体性原理

由于复杂性科学的研究对象是非线性系统,传统的叠加原理失效,因此,不能采用把研究对象分成若干个小系统分别进行研究,然后进行叠加的办法,而只能从总体上把握整个系统。

(2) 动态性原理

复杂系统必然是动态系统,即与时间变量有关的系统。没有时间的变化,就没有系统的演化,也就谈不上复杂性规律。

(3) 时间与空间相统一原理

复杂性科学不但研究系统在时间方向上的复杂演化轨迹,而且还试图说明系统演化的空间模式。一般来说,系统中非线性关系所导致的混沌可以认为是一种时间演化轨迹,同时也可以用来描述系统长期演化后的空间模式。

(4) 宏观与微观相统一原理

复杂系统的宏观变量大的波动可能来自于组成系统的一些元素的小变化。因此,为了探讨复杂系统宏观变量的变化规律,必须研究它的微观机制。但由于非线性机制的作用,又不能将系统进行分解,所以说必须将宏观与微观相统一。

(5) 确定性与随机性相统一原理

复杂性科学理论表明:一个确定性的系统中可以出现类似于随机的行为过程,它是系统“内在”随机性的一种表现,它与具有外在随机项的非线性系统的不规则结果有着本质差别。

电力系统灾变作为一种高度复杂的现象,人们对它的认识和探索,也需要经历一个往复的过程。为了减少电力系统灾变发生的可能性,使事故的损失和影响尽可能小,各国科学家们在不懈地应用各种理论、方法和技术,探索电力系统灾变的规律和形成机理,以提高人类对这一问题的认识水平,减轻电网事故(尤其是电网大规模的连锁故障)造成的影响和危害。

电力系统灾变是指电力系统发生灾难性事变。这类灾难性事变多由连锁性事故引起。电力系统灾变在空间上既具有普遍性,又具有区域性,在时间上既表现无序的非稳定性,又存在有序的节律性和周期性。通过仔细考察过去发生的多起重大电力系统灾变事故可知,电力系统灾变具有不均匀性、差异性、多样性、突发性、随机性与可预测性、规律性及复杂性等特点。

(1) 不均匀性与差异性

电力系统灾变事故的不均匀性与差异性,不仅表现在空间分布方面,而且也表现在时间分布上。

(2) 多样性

由于各互联电网的运行环境差异极大,灾变发生时的各种自然条件和社会经济条件不同,因此,电力系统灾变具有多样性。

(3) 随机性

电力系统灾变的随机性源于电力系统故障的多样性、差异性。从技术层面上有由于受端发电机出力下降或用电负荷上升,致使送端发电机出力增加,联络线功率越限;联络线传输功率接近极限,加上冲击负荷和波动负荷后,功率越限等造成的功角稳定破坏;小系统中大感性负荷投入;低电压下,大负荷增加;低电压地区,不能快速切除短路故障;由于雷击、冰冻、风暴、洪水、地震等不可抗力原因使多个电气元件被切除造成的故障。

(4) 突变性与规律性

电力系统的各种故障与事故是造成灾变发生的直接原因。然而,故障与事故具有突发性,它的出现并不以人的意志为转移。因此,电力系统灾变也在一定程度上,在一定的时间尺度内,表现出突变性。另一方面,自 20 世纪 60 年代以来,从世界范围内已发生的多起灾变性重大电力系统事故的统计资料来看,这些大的灾变均为连锁性事故,多数属于稳定破坏事故,事故的原因有管理原因、技术原因和不可抗力原因等共同点。因而这些电力系统灾变不但具有突发性,而且具有规律性。

综上所述,电力系统灾变具有复杂性的突出特点。

1.2.2 电力系统灾变防治研究的复杂性理论框架

由于电力系统灾变所表现出来的不均匀性、差异性、多样性、突发性、随机性与可预测性、规律性及复杂性等特点,使得传统的理论与手段已不适应日趋复杂的互联电网灾变防治的研究。分形、混沌等非线性动力学理论及复杂网络理论的引入,为电力系统灾变的研究注入了新的生机,复杂性科学的相关理论将在电力系统灾变研究中扮演重要的角色。

根据上述简述的复杂性科学的基本思想,我们认为电力系统灾变研究的复杂性理论就是应用复杂性科学的基本理论和数学工具,研究电力系统灾变中的各种复杂问题和复杂现象。因此,我们认为应该有从复杂性科学出发,借助于分形、混沌等非线性动力学及复杂网络理论,系统地研究和分析电力系统灾变中复杂现象的思想,构成电力系统灾变研究的复杂性理论。首先引入灾变防治的复杂系统概念,探讨电力系统灾变的复杂性特征,建立灾变分析、预测、模拟、防治的综合集成方法。具体包括以下几方面的内容:

- 电力系统灾变复杂性的概念及其综合分析体系方法;
- 电力系统灾变的时空分布规律的分形特征;
- 电力系统灾变的混沌特性,尤其是自组织临界性的研究;
- 基于复杂网络理论的电力系统网络特性的研究;
- 基于复杂性理论的电力系统灾变的仿真及预测方法研究;
- 电力系统灾变防治系统的综合集成技术研究。

图 1-1 描述了电力系统灾变研究的复杂性理论的一个基本框架。通过开展这一研究工