



电力系统 复杂性理论初探

郭剑波 于 群 贺 庆 著



科学出版社

内 容 简 介

复杂性科学是近年来新兴的一门交叉学科,受到了国内外学者的广泛关注。本书基于复杂性理论,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自组织临界性特征研究,并建立了相关的仿真模型,探索了复杂性理论在电力系统运行中的应用。全书共六章,内容包括:绪论、电力系统的自组织临界性、电力系统停电事故自组织临界性的模型与仿真、我国电网复杂网络特征与自组织临界特性的关系、基于自组织临界性的电网停电事故风险定量评估方法探讨、降低大停电事故期望值的控制方法。

本书适合从事电力系统运行与调度、规划设计和科学研究的人员以及高等院校电气工程等相关专业的研究生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统复杂性理论初探/郭剑波,于群,贺庆著. —北京:科学出版社, 2012. 10

ISBN 978-7-03-035598-0

I. ①电… II. ①郭…②于…③贺… III. ①电力系统-系统复杂性-理论研究 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 222907 号

责任编辑:牛宇锋 汤 枫 / 责任校对:张怡君

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

深圳印制有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 10 月第一次印刷 印张: 10

字数: 189 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电气化是现代社会发展水平的重要标志,电力作为基础能源与现代社会息息相关。电网是维系电力供需的纽带,是国民经济健康发展和人民生活正常秩序的重要保障,电网安全关系国家安全。

现代社会对电力供应的可靠性要求越来越高,电网运行安全已成为突出问题。2003年8月14日,美国东部8个州以及加拿大的安大略省和魁北克省发生大规模的停电事故,共计损失负荷6180万kW,受停电影响人数达5000万。2006年11月4日,欧洲发生大规模的停电事故,停电波及多个国家,德国、法国、意大利三国受影响最大,共计损失负荷1450万kW,受停电影响人数达1000万。2012年7月30日,包括首都新德里在内的印度北部9个邦发生大停电,共计损失负荷3567万kW,受停电影响人数达3.7亿。2012年7月31日,印度再次发生大停电,影响范围达22个邦,受停电影响人数达6亿。此外,澳大利亚、英国、瑞典、丹麦、意大利、新加坡、巴西、韩国、智利等国近年都发生了较大范围的停电事故,在经济上造成巨大损失,严重影响了社会生活。

改革开放以来,我国电力工业发展取得了举世瞩目的成绩。2011年我国电网装机容量达10.5亿kW,发电量达4.72万亿kW·h。特别是近年来,我国相继建成了1000kV特高压交流、±800kV特高压直流以及青藏±400kV直流输电工程,标志着我国电网已进入“特高压、大电网”时代,实现了除台湾地区外的全国电网互联。随着我国大容量远距离输电及跨国联网输电工程的增加、大规模新能源电源的接入,以及极端气候和自然灾害频发,保证大电网安全可靠运行在理论和实践上都将是严峻挑战。

电力网络是当今世界覆盖面最广、结构最复杂的人造网络系统之一。与其他人造基础设施系统如通信、交通等系统相比较,其特点是:①系统传输的电力不能大规模储存,电力的发、供、用须同时完成,每时每刻都要保持供需的平衡;②分布在广大地域的系统内所有发电机必须同步运转,一旦受到大的扰动产生异常偏离,系统稳定就可能遭到破坏,造成严重后果;③系统故障发生和故障事件演变的随机性,以及故障影响的快速性和全局性,使之很难做到准确预测和把握,从而为系统发生故障时的应对和事后恢复的处理过程带来巨大困难。国内外的大停电事故往往是从系统中某一元件的故障开始,由于继电保护装置的误动或拒动、控制措施不当或不及时、电网结构的不合理,或多种原因的综合作用,引发了一系列的元件故障,最终导致了电网的大面积停电。

面对日益扩大的互联电力系统及其复杂的动态行为和由大停电事故造成的巨大损失,各国政府和研究机构都清醒地认识到保障电力系统的安全稳定和优化经济运行是一个世界性的难题。近年来,研究复杂系统和系统复杂性的复杂性科学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方面。现代电力系统也呈现出了以上系统复杂性的特征,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。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是近年来电力系统研究的新领域。

我国在 2004 年的国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”中,将“大电网安全性评估的系统复杂性理论研究”列为其研究的子课题(2004CB217902)。本书以该 973 计划项目研究成果为基础,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自组织临界性特征研究,并建立相关的仿真模型,探索了复杂性理论在电网规划和运行中的应用。在 973 计划项目研究过程中,得到了首席科学家周孝信院士的悉心指导,还得到了湖南大学曹一家教授,以及清华大学梅生伟教授、侯云鹤博士的支持和帮助,特此感谢!

感谢中国电力科学研究院专著出版基金对本书的支持。

由于国内外电力系统复杂性研究尚处于起步和探索阶段,加之作者水平有限,书中难免存在不足之处。出版本书的目的是希望抛砖引玉,与读者一道共同推进电力系统复杂性研究,并真诚地希望读者能够给予批评和指导。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力系统的特点	1
1.2 复杂性科学的建立及发展	3
1.3 电力系统的复杂性特点	7
1.4 本书章节设置及其说明	9
第 2 章 电力系统的自组织临界性	11
2.1 自组织临界性	11
2.1.1 自然界中的幂律关系	11
2.1.2 自组织临界性的定义及沙堆模型	12
2.2 电力系统大停电的自组织临界性	16
2.3 我国电网大停电事故的统计及其自组织临界性	18
2.3.1 资料来源及研究方法	18
2.3.2 数据分析及结果	19
2.4 本章小结	24
第 3 章 电力系统停电事故自组织临界性的模型与仿真	25
3.1 电力系统停电事故自组织临界性的常用模型简介	25
3.1.1 OPA 模型	25
3.1.2 Hidden Failure 模型简介	28
3.1.3 Cascade 模型简介	28
3.1.4 Manchester 模型简介	29
3.2 SOC-Power Failure 模型	29
3.2.1 OPA 模型存在的问题	29
3.2.2 SOC-Power Failure 模型的定义	30
3.3 利用新建模型的算例与结果分析	33
3.4 基于元胞自动机的电网自组织临界性模拟仿真	42
3.4.1 元胞自动机概述	42
3.4.2 电网故障元胞自动机模型构成	47
3.4.3 电网故障元胞自动机的仿真实验	49
3.5 负载率分布对电力系统自组织临界状态的影响	53

3.6 本章小结	58
第4章 我国电网复杂网络特征与自组织临界特性的关系	59
4.1 典型复杂网络	59
4.1.1 网络的基本几何量	59
4.1.2 规则网络和随机网络	60
4.1.3 小世界网络模型	61
4.1.4 Barabási-Albert 无标度网络模型	62
4.2 我国电网的复杂网络特征	64
4.2.1 资料来源及研究方法	64
4.2.2 数据分析结果	64
4.3 网络特性对电网自组织临界性的影响分析	67
4.4 本章小结	71
第5章 基于自组织临界性的电网停电事故风险定量评估方法探讨	73
5.1 电力系统风险评估与极值理论概述	73
5.1.1 电力系统风险评估概述	73
5.1.2 极值理论概述	76
5.2 极值分布	77
5.2.1 极值统计方法	77
5.2.2 电网事故幂律特征下的极值分布	78
5.2.3 实例计算	80
5.3 本章小结	81
第6章 降低大停电事故期望值的控制方法	83
6.1 引言	83
6.2 降低故障规模期望值的数学基础	83
6.2.1 事故序列分析	83
6.2.2 控制措施的作用	86
6.2.3 期望值控制	87
6.2.4 电力系统随机微分方程	90
6.3 基于沙堆模型的控制规则	93
6.3.1 沙堆模型	93
6.3.2 沙堆模型建模	93
6.3.3 沙堆模型特性分析	94
6.3.4 适用于沙堆模型的控制规则	97
6.3.5 结果分析	102
6.4 基于直流潮流模型的控制规则	104

6.4.1 直流潮流模型设计·····	105
6.4.2 直流潮流自组织临界性分析 ·····	108
6.4.3 递切控制 ·····	114
6.5 均衡性控制方法 ·····	115
6.5.1 区域均衡性指标设计 ·····	116
6.5.2 沙堆模型中的均衡性控制 ·····	118
6.5.3 直流潮流模型中的均衡性控制 ·····	123
6.6 本章小结 ·····	132
参考文献 ·····	133
附录 ·····	140

第 1 章 绪 论

1.1 电力系统的特点

改革开放以来,我国电力工业发展取得了举世瞩目的成绩,交流 500kV、750kV、1000kV,以及直流 $\pm 500\text{kV}$ 、 $\pm 660\text{kV}$ 和 $\pm 800\text{kV}$ 输电工程相继建成投入运行并实现国产化。2011 年我国电网装机容量达 10.5 亿 kW,发电量达 4.72 万亿 kW·h。随着青藏 $\pm 400\text{kV}$ 直流输电工程建成投入运行,我国已完成除台湾地区外的全国电网互联。我国电网已进入“特高压、大电网”时代。与此同时,电网的大规模互联成为全世界范围内电力系统发展的必然趋势。相邻电网的互联可在紧急情况下互相支援,并能够实现跨地区输送电力、调剂余缺,优化配置资源。联网规模越大,资源优化配置的范围也越大,现在联合电网可以横跨多个国家广大区域,从而形成了一个复杂的庞大系统。这对电力系统的设计及安全运行提出了新的挑战。

在电网规模不断扩大,区域性电力系统互联形成超大规模电网的同时,并社会经济发展需求、资源配置需求、经济互补和可持续发展的推动下,电力系统已从独立的、封闭的“发-用”树形的传统电力系统结构演变成为由电力系统及其关联的信息通信系统和监测/控制系统所组成的以电能流与信息流的交换、共享、互动为一体的现代电力系统结构^[1]。

在这个超大规模的现代电力系统中,电网潮流交换和信息交换的日益频繁以及数量的剧烈增大,互联电网内各子电网间的相互依赖性亦日益增加,管理日趋复杂,电力系统及其关联的信息通信系统和监测/控制系统的任何一个脆弱部位的故障,都有可能導致电力系统灾难性事故的发生。

自 20 世纪 60 年代以来,国内外发生的多起重大电力系统事故如附录(事故统计)所示,特别是近年来相继发生的一系列大停电事故,如 2003 年 8 月 14 日美加大停电、2003 年 8 月 28 日英国伦敦大停电、2003 年 9 月 23 日瑞典-丹麦大停电、2003 年 9 月 28 日意大利全国大停电、2003 年 12 月 20 日美国旧金山大停电,以及 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;国内,如 1996 年北京 1·19 大停电事故,2001 年辽沈大停电事故^[2~10]等,这些事故往往是从系统中某一元件的故障开始,引发多重元件故障,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。例如,2003 年美加 8·14

大停电,起因是美国俄亥俄州的一条 345kV 输电线(Camberlain—Harding)因过负荷而跳线,其输送功率转移到相邻的一条 345kV 线路(Hanna—Juniper),引起该条线路长时间过热并下垂,从而对线下树木短路跳闸,随后造成连锁反应酿成大停电事故。该停电事故波及美国 8 个州及加拿大的安大略省和魁北克省 5000 万人受到影响,停电时间长达 29h,损失负荷 6180 万 kW,停电造成的经济损失在美国达 300 亿美元,在加拿大达 52 亿加元。莫斯科 5·25 大停电也只是因为一座变电站设备老化、爆炸起火所致。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破坏,而是故障持续过程中电网内发生大范围的电力负荷转移,发、输变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的相互交织。在上述多种因素的综合作用,最终导致了系统的连锁性故障,造成大面积停电,给国民经济和人民生活带来巨大的损失和影响。

多年来,电力系统分析主要侧重于研究电力系统动态行为,根据电力系统中各元件在所研究的系统动态过程中的动态响应建立起相应的数学模型,并根据电气接线将系统描述为一个巨维的微分-代数方程组,通过计算机仿真技术得到系统的解。这种分析方法在深入分析电力系统连锁事故和大停电事故的演化机理方面,尤其是研究电力系统大停电的宏观规律方面存在局限性。这是因为大电网本身就是一个复杂的组合体,它既与分布各地的发电电源相联,又对分散在全供电范围的各种用户供电;同时其本身又是一个复杂而庞大的输变电网络组群,各种继电保护装置、自动调控装置以及与之相关的通信系统及设施,遍布电网各处。在电网中任一设备及其运行状态的变化,将立即或轻或重地影响全网,引起自动调控装置甚至继电保护的動作,还可能引起对现场人员以及各级电网调度人员的干预,各种设备及其保护控制装置对系统状态变化的响应具有一定的随机性。这种自然的、自动的以及人工干预并具有一定随机性的动态变化和行为的组合,相互关联、相互影响、错综复杂。对于这种极为复杂的现象,至今还没有找到有效的分析理论与方法^[2,11,12]。

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已无能为力;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。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,未能做出正确的判断和处理,从而导致事故的扩大^[13~15]。

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,我国主管部门针对国内电网,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。

1.2 复杂性科学的建立及发展

从亚里士多德时代以来,人们就相信大自然本质上来说是简单的。我国古代自然哲学家就把世界万物归结为少数几种简单物质或简单要素,如阴阳五行等。在古希腊,人们则把一切自然归于最小不可分的原子。随着近代自然科学的发展,强调在实验基础上的分析和归纳,把复杂系统分为简单的要素来研究,已经取得了很大的成功。例如,物理学把世界看成是夸克和轻子的不同组合,把复杂的相互关系归结为四种基本的相互作用;力学把非常复杂的机器系统分解成各种简单机械的重复;光学上瑰丽多姿的色彩被分解为红、绿、蓝三种原色;化学发现世界已知的近550万种化合物都是由112种(或更多种)元素构成,而各元素又仅仅是电子、中子、质子的不同结合等。在长期探索和实践的基础上,人们提出一条重要的方法论原则——简单性原则。简单性原则一般是指用尽可能少的、逻辑上独立的,而且不能再简化的基本概念和公理构成科学理论体系的原则。它是建立科学理论体系的一条重要原则,是探索客观事物和现象本质的一种科学思维方法。科学理论体系的发展过程是一个从运用较多概念、公理到运用较少概念、公理的过程。这一过程反映了人们对客观世界认识的深化。简单性原则促使科学家建立普适性、统一性越来越高的理论体系,为评价和选择科学理论提供了准则。

随着科学的发展和技术的进步,当人类面对一个由多状态变量非线性相互作用、多层次结构交织起来的复杂世界时,一些复杂的现象难以用传统方法研究解释。这就需要确立相应的自然观,掌握相应的科学方法论。从20世纪30年代开始,人们逐渐认识到系统大于其组成部分之和,系统具有层次结构和功能结构,系统处于不断地发展变化之中,系统经常与其环境(外界)有物质、能量和信息的交换,系统在远离平衡的状态下也可以稳定(自组织),确定性的系统有其内在的随机性(混沌),而随机性的系统却又有其内在的确定性(突现)。这些新的发现不断地冲击着经典科学的传统观念。系统论、信息论、控制论、相变论(主要研究平衡结构的形成与演化)、耗散结构论(主要研究非平衡相变与自组织)、突变论(主要研究连续过程引起的不连续结果)、协同论(主要研究系统演化与自组织)、混沌论(主要研究确定性系统的内在随机性)、超循环论(主要研究在生命系统演化行为基础上的自组织理论)等新科学理论也相继诞生。这种趋势使许多科学家感到困惑,也促使一些有远见的科学家开始思考并探索新的道路。复杂系统和系统的复

杂性这两个范畴就是在这样的背景下提出的。

复杂系统和系统的复杂性这两个范畴的提出是以重新确立复杂性的事物根本属性地位为标志,主张复杂性是普遍存在的,任何复杂现象都不是简单现象的叠加,复杂现象具有简单成分所没有的性质。因此,简单只是研究复杂问题的起点而非终点。复杂性研究认为以往人们更多关注简单性的原因并不在于其是事物的本质,而是受到研究手段的局限,无法认识与解释复杂现象的结果。现代科技的迅猛发展为我们全面认识复杂现象提供了可能。应该说,复杂性研究为困扰在还原论漩涡中的科学家们提供了新的思路,它促使人们从单纯研究构成系统的各要素中抽身而出,开始关注更为本质的要素间关系以及系统深化的过程。

虽然当前关于复杂系统的认识与定义尚未统一,但是形成复杂性科学框架的一系列概念已逐步清晰化。系统的复杂性主要表现在以下几个方面^[16,17]:

(1) 系统组成成分的多要素性。凡是复杂系统,无不是由多个要素构成的整体,这些要素并不是单一同质的,它们有各自的结构和功能,并且相互之间的联系广泛而密切。系统中的每一个单元的变化都会受到其他单元变化的影响,并会引起其他单元的变化。例如,人的神经网络有亿万个神经元组成,人类的基因组由约 30 亿个碱基对组成,并形成几千个基因小群。

(2) 系统结构的多层次性。组成成分多要素性并不是复杂系统之所以具有复杂性的关键所在,问题的关键在于系统在组成整体时,在结构上具有多层次性。每一层次均成为构筑其上一层的单元,同时也有助于系统的某一功能的实现。例如,细胞作为组成人体大系统的一个基本层次,处于该层次上的若干细胞相互联系,相互作用组成一个个的器官,不同的器官又组成人体的若干子系统(如神经系统、呼吸系统),再由这些子系统组成人体系统。

(3) 系统状态变量的多维性。对于一个复杂的系统,需要在各个层次上对系统进行描述,系统有多少个层次,就至少需要多少组变量来描述;若想了解系统内部的不同层次之间的关系,就需要更多的变量。要利用变量反应系统不同层次之间的关系,不仅需要找到这些变量,而且还要找到这些变量之间的联系,才能利用它们来描述系统的状态。

(4) 系统演化发展的多方向性。复杂系统是由众多要素非线性相互作用构成的不可积系统,这种非线性相互作用导致了系统在演化发展过程中的多个方向性。至于系统通过自组织究竟进化跃变到哪个方向,则受偶然性与必然性的对立统一规律所支配。

系统有序进化的多规律性,复杂系统的组织化、有序化或信息增值化水平的不断提高,有赖于多种规律同时发挥作用。

一般认为复杂系统具有以下特征^[16~23]:

(1) 非线性与动态性。普遍认为非线性是产生复杂性的必要条件,没有非线性

性就没有复杂性。复杂系统都是非线性的动力系统。非线性说明了系统大于各组成部分之和,即每个组成部分不能代替整体,每个层次的局部不能说明整体,低层次的规律不能说明高层次的规律。各组成部分之间、不同层次的组成部分之间相互关联、相互制约,并有复杂的非线性相互作用。动态性说明系统随着时间而变化,经过系统内部和系统与环境的相互作用,不断适应、调节,通过自组织作用,经过不同阶段和不同过程,向更高级的有序化发展,涌现独特的整体行为与特征。

(2) 非周期性与开放性。复杂系统的行为一般是没有周期的,非周期性展现了系统演化的不规则性和列序性,系统的演化不具有明显的规律。系统在运动过程中不会重复原来的轨迹,时间路径也不可能回归到它们以前所经历的任何一点,它们总是在一个有界的区域内展示出一种通常是极其“无序”的振荡行为。

系统是开放的,是与外部相互关联、相互作用的,系统与外部环境是统一的。开放系统不断地与外界进行物质、能量和信息的交换,没有这种交换,系统的生存和发展是不可能的。任何一种复杂系统,只有在开放条件下才能形成,也只有在开放条件下才能维持和生存。

(3) 积累效应(初值敏感性)。积累效应是指系统运动过程中,如果起始状态稍微有一点改变,那么随着系统的演化,这种变化就会被迅速积累和放大,最终导致系统行为发生巨大的变化。例如,“蝴蝶效应”就反映了初始条件的微小变化可能会给复杂系统带来重大的结局差异。系统的这种敏感性使我们不可能对系统做出精确的长期预测。

(4) 奇怪吸引子。复杂系统在相空间里的演化一般会形成奇怪吸引子。吸引子是指一个系统的时间运行轨道渐进地收敛到一系列点集。换言之,吸引子是指一个系统在不受外界干扰的情况下最终趋向的一种稳定行为形式。而奇怪吸引子既不同于稳定吸引子,它使系统的运行轨道趋向于单点集(点吸引子)或者一些周期圆环(极限环),也不同于不稳定吸引子,它使系统趋向于一些完全随机的行为形式。奇怪吸引子是一种既稳定又不稳定,处在稳定和不稳定区域之间的边界。系统在所有相邻的轨道上运行最终都会被吸引到它的势力范围。但吸引子中两个任意接近的点,虽然同属于一个吸引子,却可能发生背离,轨道的背离是因为它具有初值的敏感性。

(5) 结构自相似性(分形性)。所谓自相似是指系统部分以某种方式与整体相似。分形的两个基本特征是没有特征尺度和具有自相似性。这种自相似性不仅体现在空间结构上,而且还体现在时间序列中。一般来说,复杂系统的结构往往具有自相似性,或几何表征具有分数维数。

综上所述,复杂性科学是专门研究复杂现象和复杂系统,以寻找一般性规律的一门新兴学科。虽然目前对复杂系统的认识与定义尚未统一,但一般认为复杂系统是开放的,受外界作用影响的,由大量相互作用的单元组成,单元之间的相互

作用可以使系统作为一个整体产生自发性的自组织行为,并能够表现出涌现特征(emergent)^[16,17]。

关于复杂科学的研究一般认为是在 20 世纪 80 年代中期开始的。1984 年,在诺贝尔物理学奖获得者盖尔曼(Murray Gell-Mann)和安德逊(Philip Anderson)、经济学奖获得者阿若(Kenneth Arrow)等的支持下,聚集了一批从事物理、经济、理论生物、计算机等学科的研究人员,在圣菲成立了一个研究所,这就是著名的圣菲研究所(Santa Fe Institute, SFI),并将研究复杂系统的这一学科称为复杂性科学^[17~20]。

在我国,钱学森教授很早就注意到了复杂性研究,并以其深刻的洞察力,预见到复杂系统的意义及发展。他提出了“开放的复杂巨系统”的概念,并于 1992 年在复杂系统的研究方法方面,提出“从定性到定量的综合集成研讨厅体系”的设想^[21,22]。中国科学院自动化研究所的戴汝为、于景元教授是研讨班的主要成员,并在以后继承和领导了这个研究方向。成思危教授也领导了在管理科学方面复杂系统的研究^[23]。

经过 30 年来的研究,各种有关复杂性的观点和理论不断涌现,如协同学(synergetics)^[24]、耗散结构(dissipative structures)^[25]、遗传算法(genetic algorithms)^[26]、混沌(chaos)^[27]、灾变(catastrophe)^[28]、自组织临界(self organized criticality, SOC)^[29]、分形(fractals)^[30]和元胞自动机(cellular automata, CA)^[31]等。这些理论或概念强调了复杂性研究的不同侧面,在一定程度上反映了当今复杂性科学的指导思想和研究手段。

自组织临界性理论是复杂性科学中的一个重要分支,该理论解释了广延耗散动力系统的组织原则,即自然界中开放、远离平衡态、相互作用的耗散动力系统通过自组织过程,自发地向临界态演化。这类系统共同的特征是能量注入是持续的、缓慢的;能量耗散相对于能量注入来说是瞬时的、“雪崩”式的。当系统达到自组织临界态时,能量耗散事件的强度或尺度分布服从幂律关系标度不变性^[29,32]。

1987 年,美国 Brookhaven 国家实验室巴克(P. Bak)、汤超(C. Tang)和威森费尔德(K. Wiesenfeld)在美国《物理评论快报》(*Physical Review Letters*)发表了题为“Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise”的文章^[29],第一次提出了自组织临界性(self-organized criticality)的概念。此后,许多科研人员在这方面作了大量的研究工作。理论方面研究主要集中在 SOC 的数学性质、有限尺度效应以及和其他复杂性理论,如混沌边缘之间的辩证关系等。例如, Bak 等详细研究了 SOC 的有关性质,指出 $1/f$ 噪声的根源是自组织临界性,并利用“沙堆模型”系统地阐述了自组织临界性的基本原理^[29,32,33]。Dhar 详细推导了 SOC 的有关数学性质,计算出了在临界态可能存在的状态数^[34,35]。但实际上用数学理论来推导 SOC 的解析性质是非常困难的,很多科学家作了大量研究均以失败告终,因此至今尚

缺乏统一的数学描述。

在应用方面,物理学、生物学、经济学、地质学、计算机等各个领域的科学家将 SOC 概念引入到他们各自的工作领域,纷纷提出了各种 SOC 模型来解释各种复杂的自然现象和工程现象,得到了许多令人关注的结果。例如,IBM 公司的 Glenn A. Held 及其同事设计了一套精巧的沙堆模型物理实验装置,采用粒径 1~1.25mm 的均匀沙粒研究真实沙堆模型中的自组织临界现象^[36];Frette 研究了大米堆中的 SOC 现象^[37];Field 等发现超导中的电磁漩涡具有 SOC 现象^[38];Bak 和 Tang 研究了地震中幂律分布,指出地震是一种 SOC 现象^[39];Johanson 等研究了山体滑坡和泥石流中的 SOC 现象^[40];Biham 等在 1992 年研究了交通中的 SOC 现象,并提出了二维交通流元胞自动机模型(BML 模型)^[41];Malamud、Morein 和 Turcotte 等利用美国真实森林火灾数据,与森林火灾模型的计算结果进行了对照,结果发现真实的森林火灾表现出较好的“频率-面积(尺度)”幂律关系,具有 SOC 特性^[42];Johansen 等研究了传染病播中的 SOC 现象^[43]等。

在国内,SOC 的研究起步于地学领域的应用,并取得了一定的成绩。例如,於崇文院士以完整和独立的命题提出了“固体地球系统的复杂性与自组织临界性”^[44~46];谢和平院士提出了“分形岩石力学”^[47];罗德军、王裕宜等研究了泥石流暴发的 SOC 现象^[48,49];欧敏研究了滑坡过程中的 SOC 现象^[50];谢之康、黄光球等研究了煤矿井下火灾、水灾蔓延过程中的 SOC 现象^[51~53];宋卫国等利用自组织临界理论对我国森林火灾现象进行了深入的研究^[54~56];朱晓华等利用自组织临界理论研究了我国自然灾害的统计特征^[57~59]等。

1.3 电力系统的复杂性特点

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、具有进化和涌现性等几个方面,尤其是复杂系统在演化过程中表现出自组织临界性是其固有特征。自组织临界性是指一类开放的、动力学的、远离平衡态的、由多个单元组成的复杂系统能够通过一个漫长的自组织过程演化到一个临界态,处于临界态的一个微小的局域扰动可能会通过类似“多米诺效应”的机制被放大,其效应可能会延伸到整个系统,形成一个大的“雪崩”。临界性的特征为,处于临界态的系统中会出现各种大小的“雪崩”事件,小事件可能引起连锁反应事故,并对系统中部分组元产生影响。遍及整体的连锁反应是系统动态行为的本质。现代电力系统也呈现出了以上系统复杂性的特征^[11~13],主要表现在以下几个方面:

1) 系统中基本单元或子系统的数量巨大

在电力系统中,各种一次、二次设备种类繁多,数量巨大,成千上万台设备分

布在辽阔的地理区域之内。现在电网的规模发展越来越大,资源优化配置的范围也随着电网规格的扩大而扩大,并且由原来的几个电力系统经由联络线相联构成联合电网。联合电网可以横跨很多国家和很大地域,如前苏联统一电力系统装机容量达 3.11 亿 kW,横跨欧亚大陆,与东欧同步联网共 4.6 亿 kW。美国北部与加拿大通过交流及直流输电线相联形成北美大联合电网,总装机容量达 9.5 亿 kW,电力设备资产超过了 1 万亿美元,230kV 及以上电压等级的输电线路超过 32 万 km,有接近 3500 个电力公司组织,服务的用户超过 1 亿个,人口达 2.83 亿。西欧大陆原来 14 个国家 3.0 亿 kW 构成一同步电网,现在已扩大到中欧及东欧地区共有 20 多个国家参加的同步联合电网。

2) 整个系统之间的层次很多

整个电力系统按不同的分类方法可分为不同的子系统。每个子系统中包含有多个下一级子系统,这些子系统又含有多个不同的分支。例如,从电力系统的构成方式上可分为一次系统和二次系统,而一次系统则由多个发电电源和几层输电网络组成,而输电网络通常又分为输电系统和配电系统两个层次。又如在电力系统的调度和管理也是分层结构。

3) 各个子系统种类繁多且子系统之间存在多种形式和多种层次的交互作用

电力系统各子系统通过电气、机械、信息、测量控制等相互联系并作用,如大电网的稳定破坏、电压崩溃、系统瓦解等事故就是电力系统中各个子系统之间存在多种形式和多种层次交互作用的结果。这些事故的发生与否,取决于电网结构备用容量、继电保护、安全自动装置及调度运行等。

4) 电力系统与外界环境也存在相互作用关系

由于负荷增长与社会经济发展有密切的关系,电网在扩建、规划时,体现出与社会经济密切的相互作用机制:一方面,人类的各项活动直接或间接地影响了电力系统演化、形成与发展;另一方面,电力系统也直接或间接地影响社会经济的发展。电力系统是与人类生活、经济活动联系密切的系统,具有广泛的开放性。其开放性不仅促进了其随时间的发展与演化,同时也使得其演化过程具有高度的复杂性和自组织特性。电网在扩建、规划时,电力设计工程师总是在规定的安全前提下追求最优、最经济的扩建方案。这就是电网演化的主导自组织过程。通过自组织过程自发地演化到一种临界状态,在此状态下微小的扰动有可能引发连锁反应并导致灾变。在灾变发生后,电力系统通过自动装置和调度或扩建恢复到稳定运行状态。这过程均表明电力系统与外界有相互作用关系。

5) 电力系统具有进化和涌现性

在过去一百多年的时间里,电力系统是在不断发展的。电网日益扩大,电网最高运行电压不断提高,投入电力系统运行的发电机组容量不断增大,尤其是近几十年来,由于科学的迅速发展和现代化技术成果不断引入,电力工业,特别是先

进的计算机和网络技术、信息处理和通信技术、电力电子技术、人工智能技术及非线性系统和控制理论等在电力系统中的应用,使电力系统成为具有进化和涌现性的高度集成的系统,整个系统的安全性和稳定性在不断完善和提高。当今电力系统的监测与控制越来越依赖于信息和通信系统的可靠运行,一个关键通信或信息系统发生故障可能会引起整个系统瘫痪,进而失去可控性和可观测性。由于远方大容量电厂及新技术引入电力系统,以及因电网扩大及联系紧密带来的事故影响范围扩大和短路电流水平日趋增长等情况,使整个电力系统不但出现了一些新的问题,一些过去没有被强调的问题也突出了出来。

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,外界扰动有可能导致大停电事故的发生。因此,应用复杂性科学的自组织临界相关理论和方法对电力系统的大停电事故进行探讨具有重要的理论和现实意义。

在电力系统停电事故的研究中,国外学者 Carreras、Newman、Dobson 等对 1984~1999 年的美国电力系统大停电事故数据进行了统计分析^[60,61],结果表明,大停电规模与概率间满足幂律(power law)关系——这种关系被认为是自组织临界特性的数学表征。相关学者还开发了一些仿真电力系统这一演化过程的模型,如 OPA 模型^[60]、Hidden Failure 模型^[62,63]、HOT(highly optimized tolerance)模型^[64]等。学者们试图利用它们模拟电力系统的自组织临界演化过程,分析影响这一过程的各种因素,研究这一过程中有可能存在的规律性。

目前针对我国电网进行停电事故自组织临界性研究的相关报导还比较少,相关的研究还处于起步阶段,许多学者都在致力于这方面的研究工作。那么,我国的电网是否也具有自组织临界性这一特性呢?电网的 SOC 特性对研究停电过程演化又有哪些指导意义呢?这正是本书研究和探讨的主要内容。

1.4 本书章节设置及其说明

结合电力系统本身的特性以及 973 计划项目“提高大型互联电网运行可靠性的基础理论研究”的研究目标,本书基于复杂性理论,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自组织临界性特征研究,并建立了相关的仿真模型,探索了复杂性理论在电力系统运行中的应用。

本书共 6 章:

第 1 章绪论,主要介绍电力系统的复杂性特征及复杂性科学的建立发展与现状。

第 2 章主要介绍电力系统的自组织临界性,包括自组织临界性的定义及其典型模型——沙堆模型介绍,电力系统大停电的自组织临界性特征,我国电网大停

电事故的统计及其自组织临界性分析。

第3章主要介绍电力系统停电事故 SOC 的模型与仿真,包括电力系统停电事故 SOC 常用的 OPA 模型、Hidden Failure 模型、Cascade 模型简介。根据 OPA 模型存在的问题,给出了 SOC-Power Failure 模型定义,并基于 SOC-Power Failure 模型进行了电力系统停电事故 SOC 分析。本章还将元胞自动机理论应用到电力系统领域,提出并建立了用元胞自动机来模拟电网故障演化的 CA-Power Failure 模型,定义了 CA-Power Failure 模型中元胞、元胞空间、规则和邻居等的构成方法。利用 CA-Power Failure 模型仿真研究了电网故障的传播演化过程;并对电网故障的自组织临界性进行了验证。在利用提出的模型进行仿真的基础上,对电力系统进入自组织临界状态的标志进行了探讨。

第4章主要介绍我国电网复杂网络特征与自组织临界特性的关系,包括典型复杂网络如小世界网络、无标度网络简介,利用复杂网络理论对我国几个大区电网在两个不同时间断面的网络特征数据进行了统计计算,通过仿真分析了电网网络结构参数对自组织临界特性的影响。

第5章主要介绍基于自组织临界性的电网停电事故风险定量评估方法,包括极值分析理论简介,电网事故极值分布的推导,并结合实际的电网资料提出了停电事故风险的定量评估方法。

第6章主要介绍降低大停电期望值的控制规则研究,包括期望值控制的数学基础简介,沙堆模型中的期望值控制,电力系统中的期望值控制及均衡性控制等。