



国家电网公司
电力科技著作出版项目

电力系统安全性

POWER SYSTEM SECURITY

杨海涛 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

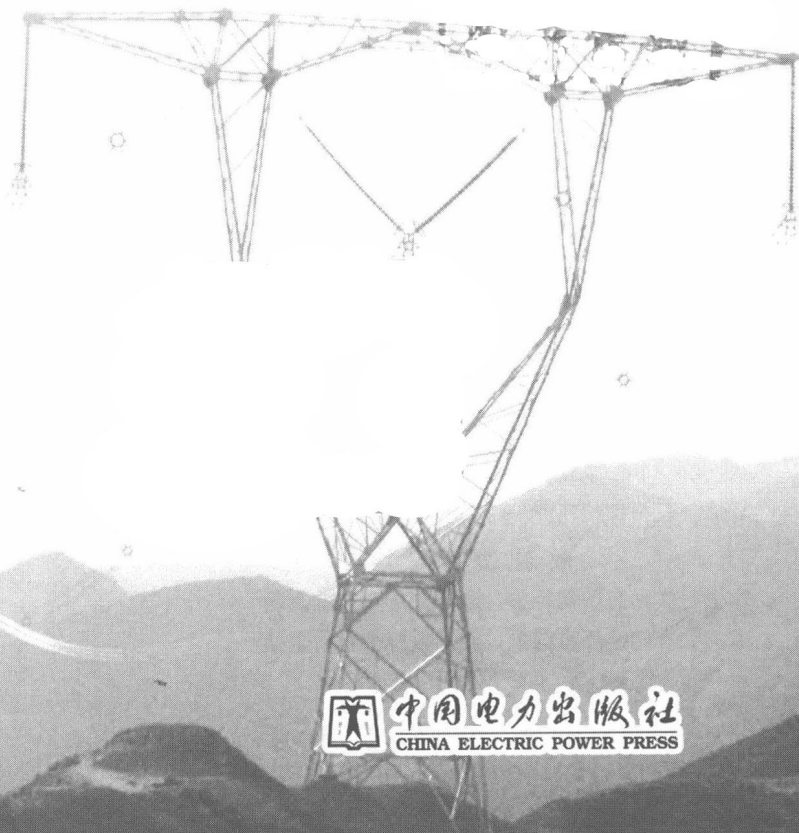
电力系统安全性

POWER SYSTEM SECURITY

杨海涛 吴国旻 宋新立 宋云亭

郑超 贺庆 王青

编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电力系统安全性是电力系统理论中亟须发展完善的重要组成部分,本书通过对电力系统安全性理论进行梳理,力求全面、系统地论述电力系统安全性理论。本书共七章,主要介绍电力系统安全性及其复杂性的基本概念,电力系统安全性评价标准,电力系统安全性分析、评估和防御技术,大规模远距离输电网不同规划网架方案的功能和安全性,以及电力系统安全的其他相关问题。

本书既包含基本术语定义、分类和归类、电压崩溃过程和机理分析等理论基础内容,也包含部分较复杂的电力系统仿真分析技术,可供从事电力系统分析和运行管理的工作者以及从事电力系统教研工作的人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统安全性 / 杨海涛主编. —北京: 中国电力出版社, 2016.6

ISBN 978-7-5123-8696-9

I. ①电… II. ①杨… III. ①电力安全 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 314616 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 6 月第一版 2016 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 355 千字

印数 0001—1000 册 定价 65.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

序

电力系统安全性理论是对电力系统受扰动后的演变过程、客观规律和风险的认知、仿真、分析、评估以及应对方法和技术的总结，是电力系统基本理论的核心部分。其中，电力系统功角稳定性和频率安全性理论相对成熟。但从多年来发生的许多大规模停电事件来看，电力系统状态恶化过程、系统电压安全性等方面的问题对停电风险一直有很大的影响，而这方面的相关理论、评估、应对的方法和技术等还不够成熟，亟须发展完善。

由于电力系统的复杂性，对其受扰动后演变的长过程进行精确的仿真是非常困难的，对上述长过程的某些阶段的仿真难免存在一定的局限性。虽然对部分工程应用而言，随着仿真技术的进步，电力系统仿真的精确度和有效性是可以接受的，并在许多方面得到实际应用，但在电力系统安全防御方面，还需进一步发展完善实时安全监控技术，与基于仿真的安全评估和预警技术形成互补。本书在论述电力系统的复杂性以及详细介绍电力系统长过程仿真和安全评估技术的新进展后，也分析了基于仿真分析的安全防御的局限性，并讨论如何进一步完善现有的安全防御体系。

从 1965~2012 年发生的大量停电事件看，大规模停电事件发生率过高的主要原因是：在电力系统断断续续出现“ $N-k$ ”相继故障的过程中，因安全监控系统存在缺陷，没有及时发现系统的关键脆弱点，从而未能采取相应的应急补救措施；而更进一步的原因则是电力系统安全性理论尤其是电压安全性理论存在不足。因此，本书侧重分析了电力系统状态逐步恶化过程的关键影响因素，从各种元件的特性以及相互影响过程讨论大规模电压崩溃的机理，讨论如何设置和完善安全监控系统，如何在电网状态恶化之初及时发现问题并采取措施，以降低由相继故障发展成大规模停电的风险。本书通过现场试验结果

和实际大停电事件录波曲线，观察电力系统电压崩溃现象，然后基于实际的物理现象和公认的物理基本原理，检验和分析关于电力系统电压崩溃现象的机理解释，力求完善现有的机理解释。

随着我国许多地区煤炭资源的枯竭和大规模新能源基地的建设，我国国民经济和人民生活对远距离大容量输电和大范围汇集及分配电力的功能需求日益增加；同时，风能、光伏等间歇性新能源在电力系统中所占比例也在持续地提高。上述情况使得电力系统的规模和复杂程度均在增加，电力系统安全正面临前所未有的新挑战，电力系统安全性理论和相关技术亟须进一步发展完善。愿本书的出版发行，能在电力系统安全性理论和技术发展过程中起到承前启后的作用，并期待同行学者们进一步修正、改进和发展完善电力系统安全性理论和技术。

中国工程院院士



2016年4月15日

前 言

2003~2012 年, 北美互联电网、欧洲大陆互联电网、俄罗斯电网、印度尼西亚电网、巴西电网和印度电网相继发生了特大规模停电事件。在此期间, 我国电网也发生过较大规模的停电事件, 例如 2005 年 9 月 26 日我国海南电网发生了全网崩溃型的大停电, 2006 年 7 月 1 日我国华中电网发生了影响范围较大的失稳和停电事件。大停电事件影响到上千万甚至上亿人的工作和生活, 使国民经济遭受巨大损失。电力系统大停电还会增大核电站发生核事故的风险, 有可能给世界带来灾难。因此, 近年来电力系统的安全性备受各界的关注。

近年来, 我国交、直流特高压大电网的规划建设也涉及特大规模电力系统的安全问题, 该问题备受政府、国内外相关专家和学者的关注。大家对一些基本问题的认识仍然存在较大的分歧, 其原因之一是电力系统安全性的基础理论存在不足。

影响电力系统安全性的首要因素是电力系统的稳定性。在电网形成的早期, 电网结构比较薄弱, 这一时期较大的停电事件通常是由功角失稳导致的。局部电压失稳问题则主要出现在放射型结构的配电系统中。但后来在电网结构加强以及相邻地区电网互联形成大规模电力系统后, 许多大规模停电事件却不是由功角失稳或个别负荷节点电压失稳引发的。这些大规模停电事件通常会经历一个长过程, 这一长过程含有系统状态逐步恶化、连锁反应导致系统瓦解崩溃的过程, 涉及的系统安全性问题并不局限于系统暂态稳定性、动态稳定性以及负荷节点电压稳定性所涵盖的内容。电力系统可看作开放的复杂巨系统中的一个子系统, 而复杂巨系统所含子系统的种类多、相互关系复杂, 其中的各个子系统对外开放, 从属于更大的系统, 呈多层次结构。上述复杂系统的变化具有混沌性、不确定性、突变性和开放性, 通过仿真模拟很难精确地还原、预测和评

估其过程及后果，因此需要进一步完善原有的安全理论和安全防御方法以及探讨新的理论方法。

从 20 世纪 40 年代苏联学者马尔柯维奇提出电压稳定概念及判据至今，对电力系统电压稳定理论的研究已有 70 多年的历史，但学术界对电力系统电压崩溃的机理未达成一致的认知。早期的电压失稳问题一般主要出现在放射型结构配电系统的负荷节点上，因此电力系统电压稳定理论以负荷节点电压失稳临界点为理论基础，主要关注负荷节点运行点的平衡稳定问题。后来发生的大停电事件中出现了大规模系统电压崩溃现象，不少人仍认为这是由某些负荷节点失去了稳定的平衡点引发的，因此大多数电压稳定计算主要关注各个负荷节点的电压稳定裕度。然而，从电力系统电压崩溃的记录曲线看，电力系统电压崩溃过程一般并没有呈现电压失稳临界点特征。电力系统现场试验结果和电力系统大停电过程表明，部分用电者在电压降低时会自动跳闸，从而使负荷节点电压下降过程被中止和逆转，具有自愈特性。上述过程并没有进一步推动电力系统的电压崩溃，相反暂时缓解了系统的危机。再者，对于电力系统主体安全而言，上述个别节点的电压急降和回升只不过是零星的局部问题，并不是导致其后电力系统大规模电压崩溃的原因。那么，电力系统大规模电压崩溃究竟是如何发生和扩展的呢？其电压安全防御的重点应该放在什么地方呢？这些问题是本书要重点讨论的内容。

近年来，电力系统安全防御领域在基于电网预想故障仿真的在线预警分析方面已取得很大的进展。但从实际发生的大停电事件发展过程看，当电网进入危急状态时，基于电网在线仿真计算分析的安全防御系统在应急响应和实时控制方面仍存在不足。另外，远距离、大规模输电系统的形成和间歇性电源入网渗透率的提高，也使电力系统安全面临新的挑战。因此，电力系统安全防御的理论和方法也有待进一步发展和完善。

在电力系统安全性评估方面，国内外普遍采用技术条款和事件校核的方法评价输电网规划方案的可靠性，其中安全性一般采用确定性事件校核准则，即采用规定的扰动故障集校核输电方案的系统安全性。确定性事件校核准则的缺陷是没有定量表述不同输电方案发生事件的概率及其经济性后果。而停电风险评估能够为安全性和经济性之间提供联系，因此应在电力系统规划中推广应用，以弥补上述不足。

在上述背景下，本书对电力系统安全性理论进行梳理，力求全面、系统地论述电力系统安全性理论。本书通过分析国内外电力系统大停电事件发生、发展的过程，基于作者在电力系统规划、运行、安全分析和评估、事故仿真、工程应用等方面多年的技术积累，结合国内外电力系统安全性理论、安全标准及相关复杂系统理论，全面阐述电力系统安全性

评价体系、电力系统复杂性理论、电压安全性理论、大规模停电的机理、频率安全性、大停电过程仿真方法、安全性评估方法、大电网结构安全特性、交直流混联大同步电网的安全性、大电网安全防御对策和技术等内容。本书可供电力系统专业学生和从事电力系统分析、运行管理的工作者阅读，对从事电力系统教研工作的人员也有一定的参考价值。

本书由中国电力科学研究院系统所的相关专家编写，其中：电力系统安全性概论，安全性评价体系，大停电事件一览表，大停电机理分析，电力系统电压安全性理论，全过程安全风险评估方法，电网规模、结构与安全性，电力系统安全防御体系存在的问题及改进方案，电力系统安全其他相关问题等内容由杨海涛撰写；电力系统长过程继电保护和安全稳定控制建模与仿真技术由吴国旻撰写；电力系统长过程动态仿真方法和仿真软件介绍由宋新立撰写；电力系统静态安全性和暂态稳定性概率评估方法由宋云亭撰写；交直流混联大同步电网的安全性由郑超撰写；电力系统自组织临界特性由贺庆撰写；提高电网安全水平的部分措施由杨海涛、王青和吴国旻撰写。全书由杨海涛担任主编并负责统稿工作。

本书在频率安全性方面，引用了中国电力科学研究院孙华东、刘明松和山东大学张恒旭、侯智圆等人完成的研究报告《大型互联电网旋转备用优化布局原则及实施方案研究》的部分内容。此外，本书经中国科学院院士周孝信、中国电力科学研究院胡学浩教授和哈尔滨工业大学于继来教授等学者的推荐，获得了国家电网公司电力科技专著出版项目资金资助。中国工程院院士、天津大学教授余贻鑫审阅了本书的部分章节，并针对一些问题提出了修改建议。在此，谨向上述所有学者表示衷心的感谢。

作 者

2016 年 4 月

目 录

序 前 言

第 1 章 电力系统安全性概论	1
1.1 电力系统安全性定义	1
1.2 电力系统安全的复杂性	3
1.2.1 复杂系统的概念	3
1.2.2 电力系统崩溃临界态	9
1.3 电力系统大停电事件概述	10
第 2 章 电力系统安全性评价体系	13
2.1 电力系统可靠性分类	13
2.1.1 发电系统充裕性	13
2.1.2 输电系统充裕性	15
2.1.3 电力系统稳定性	16
2.1.4 电力系统电压安全性	18
2.1.5 电力系统频率安全性	29
2.1.6 充裕性、稳定性与安全性的关系	36
2.2 电力系统安全性相关标准简介	37
2.2.1 国外电力系统安全性相关标准简介	37
2.2.2 国内电力系统安全性相关标准简介	47
2.2.3 系统安全性标准比较	53
2.3 电力系统安全性概率性评价指标	55
2.3.1 电力系统规划相关安全性概率评价指标	55

2.3.2	电网运行相关安全性评价指标	56
第 3 章	电力系统停电事件分析	60
3.1	电力系统大停电事件统计	60
3.1.1	停电规模与概率分布	60
3.1.2	大停电事件一览表	62
3.2	电力系统大规模停电的机理	62
3.2.1	电力系统自组织临界特性	62
3.2.2	电力系统电压崩溃过程和机理	72
3.2.3	电力系统大停电主要影响因素	76
3.3	电力系统大停电过程仿真方法	79
3.3.1	电力系统长过程动态仿真方法	79
3.3.2	电力系统长过程仿真模型	89
3.3.3	电力系统长过程仿真软件	133
第 4 章	电力系统安全性评估	143
4.1	电力系统安全性评估概述	143
4.2	电力系统规划方案安全性评估方法	144
4.2.1	静态安全性评估方法	144
4.2.2	暂态稳定性概率评估方法	148
4.2.3	全过程安全风险评估方法	151
4.3	电力系统运行安全性评估方法	159
第 5 章	电网规模、结构与安全性	163
5.1	小型同步电网的安全性	163
5.2	大规模同步电网的安全性	165
5.3	交直流混联大同步电网的安全性	169
5.3.1	交直流混联大同步电网安全性关键问题	169
5.3.2	直流参与稳定控制主要技术	171
5.3.3	影响特高压直流送端电网电压安全的主要因素	178
5.4	多直流馈入独立受端电网的安全性	191
第 6 章	大电网安全防御	196
6.1	电网安全防御体系概述	196
6.1.1	电网安全保护监控系统的组成和功能分类	196
6.1.2	电网在线安全预警分析系统概述	197
6.2	现有安全防御体系存在的问题	199
6.2.1	电力系统安全稳定三道防线存在的问题	199

6.2.2	电网在线安全预警分析系统存在的问题	200
6.3	提高电网安全水平的部分措施	201
6.3.1	规划阶段提高电网安全水平的对策	201
6.3.2	电力系统安全稳定三道防线增强措施	202
6.3.3	电力系统在线安全监控增强措施	203
6.3.4	抑制低频振荡控制措施的配置	203
6.3.5	低频保护和低频减负荷的协调配合	206
6.3.6	高频切机、高频保护和发电机组 OPC 的协调配合	207
6.3.7	过励磁限制、过励磁保护、转子过负荷保护和低压减负荷的 协调配合	208
6.3.8	进相能力、低励磁限制和失磁保护的协调配合	209
6.3.9	过励磁能力、伏赫兹限制和过励磁保护的协调配合	210
6.4	电网运行安全防御系统功能结构	211
6.4.1	电网运行安全防御系统功能新需求分析	211
6.4.2	电网运行安全防御系统的扩展方案	212
第 7 章	电力系统安全其他相关问题	218
7.1	继电保护和安全稳定控制系统隐性故障问题	218
7.2	自然灾害问题	219
7.3	电力基础设施安全问题	220
7.4	黑启动问题	222
附录	1965~2012 年大停电事件一览表	225
索引		232



电力系统安全性概论

1.1

电力系统安全性定义

电力系统安全泛指电力系统防避和抵御自然和人类活动的扰动破坏而维持其向用户供电的能力，其影响因素涉及用电负荷、发电、输电、一次设备、二次设备和系统结构，包括规划、设计、建设、运行、管理、保护、通信、监控、防灾和灾变后恢复等诸多环节。由于涉及面太大，各环节涉及的问题也很复杂，因此需将其中部分环节的问题归入某些学科专题处理，例如将部分系统安全问题分别归入电力系统过电压和绝缘配合、通信和计算机网络等学科进行专题研究。

本书论述的电力系统安全性特指电力系统受扰动后避免因失去稳定或因状态恶化而发生停电事件的性能，可看成是上述广义的电力系统安全的核心内容，其量化指标为电力系统安全度。IEEE/CIGRE 联合工作组将其定义为对系统经受住随时可能发生的扰动而不中断为用户服务的能力的风险性量度，即停电风险越小则系统的安全性越好。安全性也称为动态可靠性，即在动态条件下电力系统经受住突然扰动并不间断向用户提供电力的能力。

IEEE/CIGRE^①联合工作组进一步补充说明电力系统安全度取决于系统的鲁棒性（robustness）、系统运行方式、发生故障的概率和故障后果四个要素，其中故障后果隐含在“风险”这一术语中。而电力系统的鲁棒性由发电机的转动惯量、机群之间电气联系的紧密程度、网架强度、负荷特性以及节点电压支撑强度等与电网稳定性密切相关的因素决定。

DL/T 1234—2013《电力系统安全稳定计算技术规范》则将电力系统安全性定义为电力系统在运行中承受扰动（例如突然失去电力系统的元件或短路故障等）的能力。它通过以下两个特性表征：

- （1）电力系统能承受住故障扰动引起的暂态过程并过渡到一个可接受的运行工况；

① IEEE：电气和电子工程师协会，其英文全称是 Institute of Electrical and Electronics Engineers。

CIGRE：国际大电网会议，其英文全称是 International Council on Large Electric Systems。



(2) 在新的工况下, 各种约束条件得到满足。

上述的承受扰动的能力未包含发生故障的概率和故障后果, 只包含了系统的稳定性能以及附加的故障后确保可持续运行的约束条件。而其中的两个特性表征则相当于用以判断电力系统遭受某一或某组故障扰动后的状态是否安全的判据。

本书采用 IEEE/CIGRE 联合工作组对电力系统安全性的定义, 在此对电力系统可靠性、充裕性、安全性及其相互关系表述如下:

可靠性 (reliability) 通用的定义是: 一个设施或系统在规定的条件下, 在既定的时间内实现其所需功能的能力。电力系统可靠性是指按可接受的电能质量标准和所需数量向电力用户连续发送和供应电力的性能。该性能的好坏通常用停电概率、停电事件发生频率、停电风险之类的指标衡量, 例如在所考察的时间段内电力系统削减其电力供应的概率越小, 则从这一角度看其可靠性越好。电力系统可靠性进一步划分为充裕性和安全性。

电力系统充裕性 (adequacy) 是指系统稳态条件下其发电、输电和供电能力满足用户需求的性能。其量化指标为电力系统充裕度, 是计及电力设备容量、电压上下限约束以及设备停运等因素, 对系统各种稳态情况下满足用户电力、电量需求的能力的总体量度。电力系统充裕度是用以评价电力系统执行任务能力冗余配置是否合理的一组指标, 其指标的制定和计算分析的目的在于将电力系统发电、输电、配电设施的冗余配置安排在合适的范围内, 既可避免因设施的冗余配置过多而导致电力系统建设成本过高, 又可避免因配置不足而导致单位时间内对用户停、限电过多而损失过大。计算充裕度指标时, 通常只考虑系统元件处于可用、完全不可用或不完全可用等静止状态对系统的影响, 而不考虑其故障对系统暂态稳定的影响。

电力系统安全性 (security) 是指电力系统在受到扰动的情况下避免因失去稳定或因状态逐步恶化而发生停电事件的性能。该性能的好坏可用停电风险衡量, 停电风险越小则系统的安全性越好, 相应地可靠性也越好。所谓“受到扰动的情况下”表示考虑了系统的暂态和动态过程。

IEEE、CIGRE 和 NERC^①虽提及电力系统安全性与稳定性的差别, 但均未明确阐明两者之间的从属关系。

本书在此将两者的关系表述为电力系统安全性由电力系统稳定性及系统状态演变过程综合特性组成。其中, 电力系统稳定性的核心问题是受扰动后发电机及电动机的电磁转矩与其机械转矩能否重新平衡; 而系统状态及演变过程综合特性包括电力系统电压、电流和频率持续状态的安全性和连锁反应过程、突发事件的发生率、事件过程特性、事件后果特性及应对处理。其中的电压和频率过高、过低以及引起的连锁反应等问题则分别归类为电力系统电压安全性和频率安全性问题进行讨论。电力系统安全性与可靠性、稳定性之间的从属关系如图 1-1 所示。

① NERC: 北美电力可靠性公司, 其英文全称是 North American Reliability Corporation。

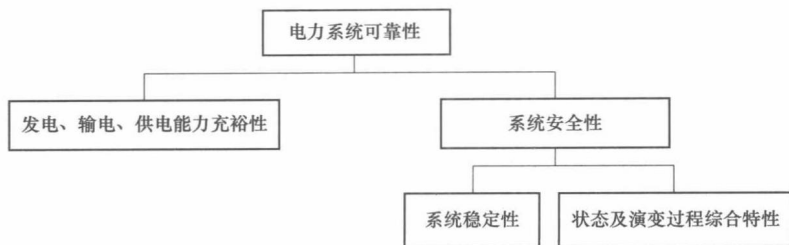


图 1-1 电力系统安全性与可靠性、稳定性的从属关系

1.2 电力系统安全的复杂性

1.2.1 复杂系统的概念

现实中的系统有的非常复杂，难以建立数学模型对其进行精确的仿真分析，有的则比较简单，可用数学模型进行模拟，并且可通过数学分析得出准确的预测或确定正确的决策。譬如，由象棋对弈的两人所构成的博弈系统看似简单但其实相当复杂，人的状态有时会不稳定，易受各种复杂因素的影响，如：有时会受环境、身体状态及情绪的影响，或因一时糊涂、一念之差之类的随机性、突变性、不确定因素导致形势急转直下，上述情况难以通过建立数学模型对其进行精确的仿真分析。但如果弈棋的双方均为计算机软件，所构成的博弈系统则是由一些数据库、逻辑推理定式和计算过程所构成的数据分析系统，属于简单系统。

又如人类战争，这是一个开放的复杂系统，天时、地利、人和等都是影响战争过程和战争结果的重要的复杂因素。战争的发展变化，有时会受到人心、人情、人性等复杂感情因素的影响，一些偶然而又复杂的因素，如人的情感变化，可能导致一支军队的倒戈，一个微小的疏忽，可能导致全盘皆输。当一场激战正在进行中，试图通过沙盘推演或数字仿真系统来实时作决策并指挥战斗很可能是不可靠的。

关于复杂性科学的研究一般认为是由 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）等人的支持下，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，在桑塔费（Santa Fe）成立了一个研究所，这就是著名的桑塔费研究所（Santa Fe Institute, SFI），并将研究复杂系统的这一学科称为复杂性科学。

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）、耗散结构（dissipative structures）、遗传算法（genetic algorithms）、混沌（chaos）、灾变（catastrophe）、自组织临界性（self organized criticality, SOC）、分形（fractals）和元胞自动机（cellular automata, CA）等。这些理论和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。

电力系统的安全性也牵涉到系统的复杂性，其中关联最密切的有开放的复杂巨系统、自组织临界性和复杂网络等概念。

1.2.1.1 开放的复杂巨系统

我国著名科学家钱学森在 20 世纪 80 年代指出系统是“由相互作用和相互依赖的若干

组成部分结合成的具有特定功能的有机整体，而且这个‘系统’本身又是它所隶属的一个更大的系统的组成部分”，并提出了具有子系统种类多、有层次结构、相互之间关系复杂以及对外开放等特征的开放的复杂巨系统的概念。基于上述概念以及基于对电力系统停电事件的统计分析，可以将电力系统看作是复杂巨系统中的一个子系统。

如图 1-2 所示，电力系统是开放的复杂巨系统中的一个子系统。电力系统连接广大的地域和空间，系统中的间歇性电源会受到气象环境的影响，系统中负荷的变化，既可能受到外部自然环境复杂因素的影响，又可能受到经济泡沫、经济衰退之类的人类社会复杂因素的影响。由于受到上述的外界影响，电力系统状态变化过程具有混沌特性、不确定性、突变性和开放性，自组织演变过程较长，从而使得仿真模拟难以对其演变过程进行精确的预测和评估。但基于不同的目的或需要，人们仍会采用不同的方法对系统进行不同精度的计算分析。或从认知和指导应用的角度，采用非还原论方法侧重研究大系统的整体演变规律，或对系统的某一方面或过程进行粗略的定量评估，为规划、设计、运行等提供决策依据。后者一般需根据特定条件下的系统情况，考虑当前的仿真能力，对系统进行适当的简化。随着气象和间歇性电源出力等复杂性因素对系统影响日益突出，以及仿真模拟方法和手段在不断探索中得以补充完善和改进，现今有必要、也初步具备条件，使电网停电风险定量评估结果的数量级与历史统计结果的数量级接近，使事件过程仿真与实际发生的部分过程大致吻合，使仿真结果更具应用价值。

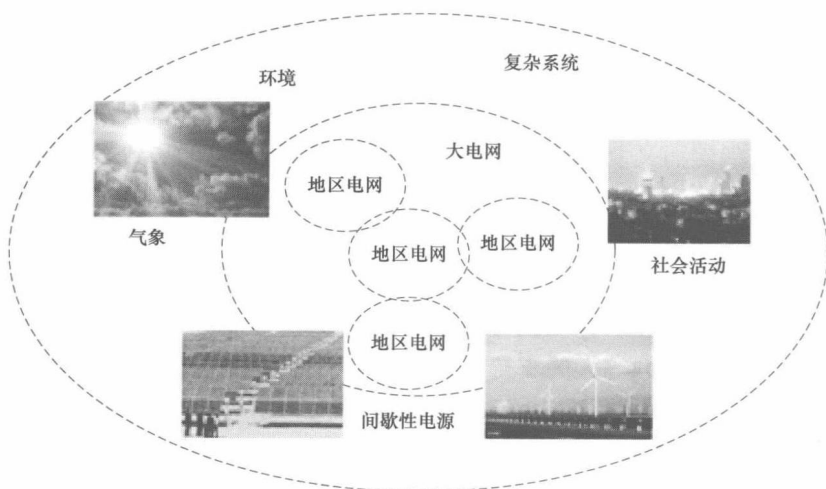


图 1-2 从属于开放的复杂巨系统的电力系统示意图

从国内外大停电事件发生和发展的过程看，典型的大停电事件与电网故障前的状态紧密相关。例如，北美 8·14 大停电事件发生前，由于天气炎热，空调负荷增多，导致系统负荷较重，使电网进入易发生连锁故障的危险状态，大停电事件过程如图 1-3 所示。其连锁反应可分成两种情况：一种情况是 1 条线路接地短路跳开后，其后的多条线路跳开的时间间隔较长，前后事件之间不具有强关联关系，后一事件是否发生以及在何处发生，还与负荷转移、气候、输电走廊环境、发电、用电等情况和是否存在其他隐患有关系，具有开放的复杂巨系统的一些特性，这一过程在仿真中难以准确模拟，需做简化处理。例如，在

电网规划安全性仿真计算中有时粗略地采用增大元件的故障率来近似模拟事件间隔中部分元件由负荷加重以及气候、环境等因素诱发新一轮故障的可能性。另一种情况是前后事件之间具有强关联关系，前一事件发生后，在很短时间内，其他条件尚未发生较大变化的情况下，由电网自身的特性和功率转移直接导致后一事件发生，这一过程可采用改进的仿真工具进行模拟。



图 1-3 北美 8·14 大停电事件过程

电力系统是一类空间上延展的耗散动力系统，兼具时间和空间自由度。它是一个动态发展的、非线性的、开放的系统，具有不确定性和社会经济性等特征。电力系统的复杂性主要表现在以下 5 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，并且由原来的多个电力系统经由联络线相连构成更大的电力系统。互联电力系统可以横跨多个国家和较大地域，如前苏联统一电力系统装机容量达 311GW，横跨欧亚大陆，与东欧同步联网后的系统装机容量达 460GW。美国北部与加拿大通过交流及直流输电线联网形成北美大联合电网，总装机容量达 950GW，电力设备资产超过 1 万亿美元，230kV 及以上电压等级的输电线路超过 32 万 km，有近 3500 个电力公司组织，其服务的用户超过 1 亿，人口达 2.83 亿。原西欧大陆 14 个国家构成 300GW 的同步电网，现已扩大到中欧及东欧地区共 20 多个国家。

(2) 系统结构复杂。大电力系统含有不同的子系统。每个子系统还可能包含多个下级子系统，这些下级子系统又含有多个不同的分支。如从电力系统的构成方式上可分为一次系统和二次系统，其中一次系统由复杂的电源构成和不同电压等级的多层电网组成。

(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。例如大电网的稳定破坏、电压崩溃、系统瓦解等事件就是电力系统各子系统之间存在多种形式和多种层次交互作用的结果。这些事件发生与否，既取决于电网结构的强弱，又与备用容量、继电保护、安全自动装置以及调度运行等有关。

(4) 电力系统与外界环境存在相互作用关系。由于负荷增长与社会经济发展有着密切的关系，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，它的开放性不仅促进了其随时间的发展与演化，同时也使得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追求最优、最经济

的扩建方案,设备的冗余配置是有限的。而在电网运行阶段,部分设备计划或非计划停运、负荷的非预期增长、系统故障的发生、系统状态的逐步恶化等,可能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或重新调度恢复到稳定运行状态,以及通过扩建提高系统的承载能力。上述过程是电力系统与外界相互作用的过程。

(5) 电力系统发展会导致新的安全问题出现。电力系统规模日益扩大,最高运行电压不断提高,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,以及非线性系统和控制理论等在电力系统中的应用,使电力系统成为新技术高度集成的系统。

上述情况的发展在某些方面可解决部分安全问题,可提高电力系统的使用效率,使电力投资获得更高的经济效益。但另一方面,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。此外,随着电力系统规模扩大及发电机群之间的联系趋于紧密,也使电力系统一些过去没有被强调的问题变得突出,例如短路电流水平日趋增长,事件的波及范围增大等。

1.2.1.2 自组织临界性

Bak 和 Wiesenfeld 在 1987 年发表于《物理评论快报》的文章中提出自组织临界性 (self-organized criticality, SOC) 理论,这是一个有趣且影响较大的理论。该理论认为,由大量相互作用成分组成的系统会自然地 toward 自组织临界态发展,当系统达到自组织临界态时,即使小的干扰也可能引起系统发生一系列灾变。Bak 等人用著名的“沙堆模型”(sandpile model) 形象地说明了自组织临界态的形成和特点。持续受到落沙颗粒小扰动的沙堆虽然是一个小系统,但却是一个复杂系统,难以通过对其建立数学方程组来精确分析计算或推测其变化过程。这个复杂系统的动态过程有其变化规律,当落沙颗粒堆积到一定程度后会导致崩溃,在初始阶段会出现小的崩溃,随着沙堆规模的增大,还会出现大的崩溃。出现更大崩溃的概率并不趋于 0,崩溃的规模与其出现的概率之间呈幂律分布关系。

“自组织”是指该状态的形成主要是由系统内部组织间的相互作用产生的,而不是由任何外界因素控制或主导所致。所谓“临界态”是指系统处于一种特殊敏感的状态,微小的局部变化可以不断放大、扩延至整个系统。系统事件的影响规模与其发生概率之间呈幂律分布关系,这时系统不存在特征尺度。也就是说,随着系统规模的增大,更大影响规模的事件发生概率不容忽视。一般认为如果一个系统不需要明显的外界调节,就能够表现出幂律行为,就称它体现出了自组织临界性。

电力系统中人工建立的标准规范的元件和沙堆的不规则颗粒有着本质的不同,沙堆中的颗粒并不需要进行标准化和规范化,也不需要建立针对各个沙粒的监控单元和监控系统,但电力系统元件则需要建立或必要时可以建立能够逐步改进的监控单元和监控系统。可以认为,在动模实验室内构建的小型电力系统属于一个简单系统,人们可以逐步了解该系统中每一故障的过渡过程和结果,最终这些过程和结果可以重现和预测。在计算机上构建的