

丁道齐 编著

# 复杂大电网 安全性分析

## 智能电网的概念与实现

中国电力出版社  
www.cepp.com.cn



# 复杂大电网 安全性分析

——智能电网的概念与实现

---

---

丁道齐 编著



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

现代大电网连锁性大面积停电事故通常是复杂性网络固有的自组织临界性特征的动力学行为引发的一系列的、复杂的、不可预测的和无序的混沌状态的暴发。传统的电力系统安全性理论已经无法解释这种连锁性大停电事故发生的机理,更不能给出防止和抑制这类事故发生的全面解决方案。本书结合国外大电网频繁发生的连锁性大停电事故和正在进行的中国特高压电网和“三华”同步电网的建设实际,从物理概念出发,比较系统地介绍跨学科特色的、具有复杂网络特征的电力系统的安全性问题。

本书主要内容包括:现代化电力系统总体概念、处于风险中的美国电网、建设21世纪现代化电网的战略、应用复杂系统理论研究广义电力系统的安全性、掌握连锁性事故动态特征与降低事故发生风险、电力基础设施的脆弱性评估、降低电力系统物理脆弱性建设抗灾型电网、电力系统的风险分析与治理、电力系统的生存性分析及评估、ICS/MCS的安全性及其对3S电网的影响、智能电网的概念和实现、智能电网的核心——微型电网、中国3S系统安全性研究的现状和目标、对中国3S电网安全性战略的思考。

本书适合从事电网调度、电网自动化和电力信息通信运行管理人员、电网规划设计人员、电力工业各级领导和安全管理人员、从事电网自动化和信息通信研发的科研院所和高等院校研究人员以及理工科大学相关专业的研究生阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

复杂大电网安全性分析:智能电网的概念与实现/丁道齐编著. —北京:中国电力出版社,2010

ISBN 978-7-5083-9823-5

I. ①复… II. ①丁… III. ①智能控制—电力系统—研究  
IV. ①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第226839号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2010年2月第一版 2010年2月北京第一次印刷

700毫米×1000毫米 B5开本 30.75印张 577千字 1彩页

印数0001—3000册 定价78.00元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
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

## 前 言

传统的电力系统安全性研究，主要是针对电网发生故障而且一般是单一故障情况下的电力系统的动态特性，包括系统的功角稳定性、电压稳定性、频率稳定性、设备过负荷的热稳定性等。这类传统的安全性的研究，是基于传统的可靠性理论和还原论的基础之上，并假设事件的发生基本上都是确定性的或可以预测的。而现代大电网连锁性大面积停电事故则通常是复杂性网络固有的自组织临界性特征的动力学行为引发的一系列的、复杂的、不可预测的和无序的混沌状态的暴发。传统的电力系统安全性理论已经无法解释这种连锁性大停电事故发生的机理，更不能给出防止和抑制这类事故发生的全面解决方案。

近年来，以研究复杂系统和复杂性为主要对象的复杂性科学，为研究和认识这种复杂的、不可预测的和无序的连锁性大停电事故发生的机理提供了十分有效的途径。

复杂性科学是用以研究复杂系统和复杂性的一门方兴未艾的交叉学科。虽然它还处于萌芽时期，但已被一些科学家誉为“21 世纪的科学”。

复杂性科学研究的复杂系统涉及的范围很广，包括自然、工程、生物、经济、管理、政治与社会等各个方面：它探索的复杂现象从一个细胞呈现出来的生命现象，到股票市场的涨落、城市交通的管理、自然灾害的预测，乃至社会的兴衰等，目前，关于复杂性的研究受到了世界各国科学家们的广泛关注。概括起来，复杂系统都有一些共同的特点，就是在变化无常的活动背后，呈现出某种捉摸不定的秩序，其中演化、涌现、自组织、自适应、自相似被认为是复杂系统的共同特征。

学者们指出，对整个科学的发展来讲，对于复杂系统的精确、更完整的描述，是科学最大的挑战。

进入 21 世纪以来，国内外很多学者将复杂系统理论应用于复杂大电网安全性的研究与实践，已经取得很多具有十分重要意义的成果。

本书是作者学习复杂性科学和复杂性电力系统动态行为相关文献的摘编和学习过程中积累的一些资讯、数据和心得体会的汇集。书中汲取了大量国内外现有文献的精华。现将它们整理成册，目的在于进行更深入的学习和交流。目前中国

关于电力系统复杂性和复杂性电力系统安全性问题仍只在部分高等院校和研究所的一些学者之中讨论，远未深入到电力系统生产管理、运行部门，更未达到成熟的程度。因此撰写这种资料汇集并具讨论性质的图书，也许会有助于中国推动和深化关于电力系统复杂性和复杂性电力系统安全性问题的讨论。

近年来国内外很多高水平专家在关于具有复杂网络特性的电力系统安全性问题方面的研究，已取得许多开创性的成果和丰富的实践经验。作者将这些成果和经验吸纳于本书之中（只是很小部分），不仅供本人学习借鉴，更希望在推动中国建立大电力系统安全防御体系方面出一点力所能及的力量。

作者认为，关于电力系统复杂性和复杂性电力系统安全性问题的解决，最终还要依赖于智能电网的实现，为此本书对智能电网的概念和实现作了详细的论述。作者期望从这种讨论中得到响应和指导，这也是作者撰写本书的目的。

本书力求从物理概念出发，比较系统地介绍跨学科特色的、具有复杂网络特征的电力系统的安全性问题。书中结合国外大电网频繁发生的连锁性大停电事故和正在进行的中国特高压电网和“三华”同步电网的建设实际，比较系统地分析了具有复杂网络特征的电力系统的安全性问题。

作为从1962年开始一直在电力系统调度部门从事电力系统运行、电力系统自动化和电力系统通信业务管理和主管的电力工作者，我希望这本书的读者对象是：

1. 对中国所有从事于电网运行、电网自动化和电网通信的同事和朋友，我希望他们能尽快阅读到这本书，从中了解我们日夜关切的电力系统现在已不再是那么简单好调理了，现在它已从传统的电力系统演变成一个我称之为“三网融合”为一的广义复杂系统了，简称“3S”（即电力系统 EPS+信息通信系统 ICS+监测控制系统 MCS）系统，以提醒这些同事和朋友，面对当前信息通信技术和电网自动化尚不能满足现代电网安全性要求，尤其是不能满足应对连锁性大停电事故要求的条件下，我们应该怎样做才能让电网运行的风险更小些。

2. 对从事电网规划和设计的人员，我希望本书能提供一个虽不全面、但比较简洁地了解现代电网发展演化中的问题的机会，特别是了解现代电网演变成广义电力系统后所具有的复杂网络特征，即演化、涌现、自组织、临界性、自适应、自相似。这里既包括灾难式的突现，也包括创新式的涌现（emerge）。了解这些可能有助于扩大规划设计的视野，既掌握和协调好系统内部各组成部分的相互关系，更充分把握好3S电网中EPS、ICS和MCS三个子系统之间的相互作用和影响，这对现代3S大系统的规划设计人员无疑是一个新的挑战，接受并赢得这个挑战，才能处理好大电力系统的安全性、可靠性、复杂性、脆弱性、鲁棒性与生存性的关系。

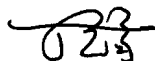
3. 对电力系统各级领导和从事电力系统管理的相关人员来说，这本书也为他们了解现代大电网发展中的新问题——交互式复杂性大电力系统的动力学行

为——提供世界上最新的研究资讯和应对措施。当你阅读了这些后，也许会对电网安全性有一个全新的认识，而电网的安全性管理正是从事电力系统管理的各级领导和相关人员的崇高职责。由于复杂大电网的无标度特征和自组织临界性，发生大停电事故具有必然性，因此，作者认为，在应对复杂大电网运行的安全管理指导方针上，将从长期以来一直单纯强调执行的“预防为主”“消灭事故”的安全生产方针即时地转变为“降低安全风险，重在生存性管理”的安全生产方针，才是提高现代复杂大电网安全性的科学的、全面的、有效的正确途径。

4. 对于电力系统自动化和信息通信技术研究的相关研究院、所和大中专高等院校的研究人员，我希望阅读这本书后能更全面地面对一体化的3S电网，深刻理解ICS、MCS与EPS的共存性和相互依赖性，从而更好地研发出适应3S电网需求的新技术和新设备。

本书各章之间文字叙述有些重复，这是为了保持每章都有相对的独立性，让读者可以按照自己的兴趣，不按章节顺序进行阅读，这也许正是本书的一个特点吧。

鉴于编著者对复杂性大电网安全性问题认识尚不够深入，而且3S系统，尤其是ICS/MCS技术发展迅速，有些在线控制理论和实践尚处于发展阶段，书中对引用文献的评述以及所提观点和立论若有不当之处，望读者和专家学者不吝赐教。



2009年12月

# 目 录

前言

绪言 处于风险中的电力系统 ..... 1

## 第一篇 现代化电力系统发展概述

<b>第一章 现代化电力系统总体概念</b> .....	12
第一节 电力系统现代化发展的历程 .....	12
第二节 狭义和广义的电力系统概念 .....	13
第三节 广义电力系统安全性面临的挑战 .....	22
第四节 SPID 的智能自适应多代理系统 MAS .....	28

<b>第二章 处于风险中的美国电网</b> .....	34
第一节 美国电网概况 .....	35
第二节 美国电力工业管理体制改革中颁布的法案 .....	44
第三节 竞争的电力市场条件下的电网可靠性和安全性 .....	48
第四节 近年来美国电网的安全性令人担忧 .....	54

<b>第三章 建设 21 世纪现代化电网的战略</b> .....	60
第一节 美国政府关于建设 21 世纪现代化电网的战略决策 .....	61
第二节 GRID 2030: 21 世纪电网现代化的纲领 .....	65
第三节 《2005 美国能源政策法案》是美国实现 21 世纪电网 现代化的法律保障 .....	79
第四节 IECSA: 未来智能电网的体系结构 .....	86

## 第二篇 研究广义电力系统安全性的相关理论及方法

<b>第四章 应用复杂系统理论研究广义电力系统的安全性</b> .....	106
第一节 复杂网络的研究为电力系统安全性研究提供了新的方向 .....	106
第二节 研究电网安全的两种方法：还原论和系统论 .....	110
第三节 网络复杂性概述 .....	113
第四节 有关表述复杂网络统计特性的基本参数 .....	115
第五节 复杂网络的无标度特性 .....	118
第六节 复杂网络的小世界效应 .....	121
第七节 电力系统停电事故概率的幂律分布 .....	123
第八节 具有无标度特性的电网的鲁棒性和脆弱性 .....	125
第九节 自组织临界性是发生连锁性大停电事故的内在驱动力 .....	127
第十节 复杂网络理论在电力系统应用的展望 .....	133
<b>第五章 掌握连锁性事故动态特征与降低事故发生的风险</b> .....	136
第一节 电力系统连锁性事故发生的机理概述 .....	136
第二节 连锁性停电事故发生、发展的过程和特点 .....	138
第三节 控制连锁性事故扩大的难点 .....	144
第四节 基于 SOC 理论的连锁性事故分析模型概述 .....	145
第五节 关于降低连锁性事故发生的风险研究现状 .....	156
第六节 减轻连锁性大停电事故损失的基本措施 .....	161
<b>第六章 电力基础设施的脆弱性评估</b> .....	166
第一节 国际上对电力基础设施脆弱性研究概述 .....	166
第二节 电力系统脆弱性评估的相关定义及概念 .....	171
第三节 电力基础设施的脆弱性评估的阶段划分和内容 .....	183
第四节 电力基础设施脆弱性评估框架和方法 .....	193
第五节 电力基础设施脆弱性评估的实践 .....	199



<b>第七章 降低电力系统物理脆弱性建设抗灾型电网</b> .....	205
第一节 自然灾害对电力系统的危害 .....	205
第二节 人为攻击对电力系统的破坏 .....	217
第三节 合理的电网/电源结构是建设健壮鲁棒抗灾型 电网的基础 .....	219
第四节 降低电力系统物理脆弱性的管理策略 .....	231

<b>第八章 电力系统的风险分析与治理</b> .....	234
第一节 关于风险评估和管理的相关概念 .....	234
第二节 处于风险之中的电力基础设施 .....	239
第三节 电力系统风险分析的各种方法 .....	245
第四节 电力基础设施的风险管理和治理 .....	267

<b>第九章 电力系统的生存性分析及评估</b> .....	278
第一节 关于生存性的相关概念 .....	279
第二节 系统生存性分析方法 .....	290
第三节 电力系统生存性的有效管理 .....	298
第四节 3S 生存性需要深入研究的几个问题 .....	302

<b>第十章 ICS/MCS 的安全性及其对 3S 电网的影响</b> .....	306
第一节 ICS/MCS 在 3S 系统中的地位和作用 .....	306
第二节 ICS/MCS 对电力系统重大事故的影响和经验教训 .....	312
第三节 ICS/MCS 的安全风险 .....	320
第四节 风险对 ICS/MCS 安全的影响和应对风险威胁的策略 .....	329

### **第三篇 提高大电网生存性的根本战略——智能电网**

<b>第十一章 智能电网——降低复杂大电网安全风险，提高大电网 生存性的根本战略</b> .....	336
第一节 智能电网发展的背景及发展优势 .....	337
第二节 有关智能电网的相关概念 .....	340

第三节	国内外智能电网发展的简况 .....	353
第四节	国际智能电网研发工作进展概况 .....	372
第五节	ICT 的应用是构建智能电网的必备基础 .....	381
第六节	研发中的困难和尚待解决的问题 .....	387

<b>第十二章</b>	<b>智能电网的核心——微型电网 .....</b>	<b>392</b>
第一节	微型电网产生的背景 .....	392
第二节	微型电网的相关概念 .....	397
第三节	国外微型电网研发的概况 .....	402
第四节	微型电网在中国的应用前景 .....	414
第五节	微型电网在中国的研究方向与面临的挑战 .....	420

## **第四篇 具有复杂网络特性的电力系统安全性讨论**

<b>第十三章</b>	<b>封面故事的启迪 .....</b>	<b>426</b>
-------------	----------------------	------------

<b>第十四章</b>	<b>中国 3S 系统安全性研究的现状和目标 .....</b>	<b>435</b>
-------------	----------------------------------	------------

<b>第十五章</b>	<b>对中国 3S 电网安全性战略的思考 .....</b>	<b>439</b>
-------------	--------------------------------	------------

<b>结 语</b>	.....	464
------------	-------	-----

<b>参考文献</b>	.....	467
-------------	-------	-----

## 绪 言

### 处于风险中的电力系统

墨菲 (Edward Murphy Jr.) 上尉是美国爱德华兹空军基地 (Edwards Air Force Base) 的工程师。1949 年, 他和他的上司斯塔普 (John Paul Stapp) 少校, 在一次火箭减速超重试验中, 因仪器失灵发生了事故。墨菲发现, 测量仪表被一个技术人员装反了。由此, 他得出的教训是: 如果做某项工作有多种方法, 而其中有一种方法将导致事故, 那么一定还会有人按这种方法去做。在事后的一次记者招待会上, 斯塔普将其称为“墨菲法则 (Murphy's Law)”, 并以极为简洁的方式作了重新表述: 凡事可能出岔子, 就一定会有出岔子。墨菲法则在技术界不胫而走, 因为它道出了一个铁的事实: 技术风险能够由可能性变为突发性的事实。它的适用范围非常广泛, 它揭示了一种独特的社会及自然现象。它的极端表述是: 如果坏事有可能发生, 不管这种可能性有多小, 它总会发生, 并造成最大可能的破坏。

无论电力系统怎样发展, 墨菲法则同样适用于电力系统。

—

电力系统的安全性有两方面的含义, 在英语中有“Secure grid”与“Safety grid”之分。

“Secure grid”是指电网容忍对其实施的物理攻击和网络攻击不会造成大停电事故的能力或者不会导致为恢复电网投入大量的资金。这种电网的安全性称为“Security”。

“Safety grid”是指电网的运行对公众和环境无害, 或者在电网运行和维护期间对工作人员不会造成伤害。这种电网的安全性称为“Safety”。

简单说来, “Security”是指电网自身的安全性, 例如在发生故障情况下, 系统能保持稳定运行和正常供电的风险程度就是“Security”安全性; 而“Safety”是指电网对外部环境和人员是否会造成不利影响的安全, 例如电网的电磁干扰对环境和生命的影响问题, 就是“Safety”安全性的表现。

本书主要讨论电网自身的安全性 (Security)。

二

同传统的电力系统安全性问题相比, 现代电力系统的安全性问题已经发生了本质上的差异, 拥有了新的内涵。

电力系统的安全性是指在发生故障情况下, 系统能保持稳定运行和正常供电

◆

的风险程度。

传统的电力系统安全性主要是在电网发生故障情况下，而且一般是针对单一故障的情况下，研究电力系统本身的动态特性，包括系统的功角稳定性、电压稳定性、频率稳定性、过负荷的热稳定性等。这类传统的安全性的研究，是基于传统的可靠性理论和还原论的基础之上，并假设事件的发生基本上都是确定性的或可以预测的。而现代大电网连锁性大面积停电事故则通常是复杂性网络固有的自组织临界性特征的动力学行为引发的一系列的、复杂的、不可预测的和无序的混沌状态的暴发。传统的电力系统安全性理论已经无法解释这种连锁性大停电事故发生的机理，更不能给出防止和抑制这类事故发生的全面解决方案。

随着现代大电网和信息通信技术的发展，只需要简单的继电保护和安全自动装置以及必要的基本通信手段支撑的传统的电力系统已经发展成为由现代广域电力系统、现代信息通信系统和先进的监测控制系统等三大系统融合成的复杂的交互式大电力系统。在这个大系统中，无论是电力系统本身，还是信息通信系统或监控系统中的任何一个元部件发生故障，都可能导致灾难性的大停电事故的发生。

2003年8月14日美加大停电蔓延和扩大的基本原因之一就是监控系统中EMS发生故障，电网调度人员失去对电力系统的可观测性和可控性，进而导致整个系统陷于瘫痪瓦解。因此，必须对现代电力系统安全性的概念加以拓展和深入研究，并采取相应的对策。

从传统意义上讲，大电网比小电网具有很多明显的优越性，发展大电网的好处主要体现在经济和供电可靠性两方面。在经济方面，大电网可以在最大的地理环境内获得最好的能源利用，发挥大电网互联的错峰调峰、水火互济、跨流域补偿调节、互为备用和调节余缺等联网效益，实现网间功率交换，在更大范围内优化能源配置方式；同时，在供电可靠性方面，大电网承受扰动的能力比小电网显著加强，大电网因事故导致大停电的概率明显比小电网低。

但是大电网一旦发生事故，尤其是连锁性大停电事故，将会导致系统瓦解，造成巨大的损失，而且这类事故近年，特别是20世纪90年代以来时有发生。为此，研究电力系统安全性的学者们面临两个问题的挑战：

- (1) 这类大停电事故，尤其是连锁性大停电事故究竟是怎样发生的？
- (2) 电网（主要指同步连接的电网）的规模是否愈大愈好，有没有限度？

最近国外一些学者提出了电力系统具有复杂性（Complexity）网络特征和电力系统脆弱性（Vulnerability）的概念，指出系统的复杂性和脆弱性与系统安全性水平密切相关，并以此作为电力系统动态安全评估的一种新的框架。

随着全球经济的不断增长，大电网向着远距离、超高压甚至特高压（中国正在建设的世界上尚无成功运行先例的交流1000kV特高压输电线路）方向发展，网络规模日益庞大，结构日益复杂，大电网的复杂性网络特征日益显露，大电力

系统脆弱性分布更加广泛。在电力系统取得联网效益的同时，由于电力系统本质上的复杂性行为而导致的概率特征，风险不但已无法避免，而且还在不断增大。大电网的脆弱性问题更为突出，不得不承受着发生多重故障或连锁性故障所引起的大面积停电事故的更大潜在风险。

事实上，从某种意义上来说，现代大电力系统运行，围绕着安全性问题走着并将继续走着一条充满矛盾而且尴尬的发展之路。

目前研究具有复杂性网络特征的电力系统安全性理论很多，本书将给予适当介绍。其中有1999年美国学者卡尔森（Jean Carlson）和多伊尔（John Doyle）提出的高度最优化容限（Highly Optimized Tolerance）理论，简称HOT理论。该理论给复杂电力系统的安全性问题提出了一种十分有趣而又深刻的论述。卡尔森和多伊尔指出，随着电力系统容量和规模的增大，为了增加电力系统的鲁棒性（Robustness），不断通过高度结构化、最优的设计来实现电网现代化，虽然仅从功能上来说，这些系统完全可以设计得更简单，但因其性能不够鲁棒（稳健），为了满足鲁棒性要求，系统变得复杂了，而复杂的系统在具有鲁棒性的同时，又增加了其脆弱性，亦即“鲁棒性造就了复杂性，复杂性造就了脆弱性，脆弱性威胁了安全性”。

HOT系统可以有效地容忍某些被考虑到的不确定因素的攻击时，该系统称为具有鲁棒性，但它对其他未被考虑到的不确定因素却变得更加敏感。也就是说，HOT系统的鲁棒性和敏感度具有相互递换的效果。HOT系统对于考虑到的环境不确定性是非常鲁棒的，但对一些少见的或不曾预期的扰动是十分脆弱的，这种潜在的脆弱性将通过某个微不足道的初始事件引发大规模连锁性事故的发生。

### 三

近10余年来，世界上大电网频繁发生的一系列大停电事故就是大电网复杂性和脆弱性特征的实证，是对现代电网安全性的严峻挑战。

1996~2007年的12年间，国际、国内相继发生了一系列重、特大停电事故。

其中，美国突出的停电事故有：

——1996年7月2日和8月10日，美国西海岸先后发生2次大面积停电事故；

——1999年，芝加哥、纽约、特拉华州、亚特兰大、新奥尔良5个地区分别发生了大面积停电事故；

——2003年8月14日，美国东北部、中西部和加拿大东部联合电网发生历史上最大的、震惊全世界的大停电事故；

——2003年12月20日，美国加州的旧金山市大停电事故；

——2006年7月17日，美国纽约大停电事故；

——2007年6月27日，纽约大停电事故。

欧洲和亚洲部分地区也先后发生了多起大停电事故：

- 2003年8月28日，英国首都伦敦和英格兰东南部大停电事故；
- 2003年9月1日，马来西亚5个州发生大面积停电，时间持续数小时；
- 2003年9月23日，瑞典和丹麦大停电事故；
- 2003年9月28日，意大利大停电事故；
- 2004年6月29日，新加坡大停电；
- 2004年7月12日，希腊首都雅典和南部部分地区大停电事故；
- 2004年8月13日，格鲁吉亚首都第比利斯大停电事故；
- 2004年11月18日，西班牙首都马德里大停电事故；
- 2005年1月8日，瑞典西南部大停电事故；
- 2005年5月25日，莫斯科大停电事故；
- 2005年6月22日，瑞士大停电事故；
- 2006年8月14日，日本东京大停电事故；
- 2006年9月24日，巴基斯坦大停电事故；
- 2006年11月4日，欧洲法国、德国、意大利、比利时、西班牙等多个国家和地区发生特大停电事故。

中国也发生了：

- 1997年2月27日，西北大面积停电事故；
- 2005年9月26日，海南全省大停电事故；
- 2006年7月1日，华中河南电网大停电事故。

屡屡发生的大停电事故，已经给社会经济造成严重的影响和损失。

仅以美国、加拿大2003年8月14日特大停电事故为例，根据2004年4月5日美加两国组成的联合调查组向全球公布的《8·14美加大停电最终报告》，这次大面积停电波及美国中西部和东北部的大部分地区，以及加拿大安大略省，影响人口约5000万人，停电负荷约6180万kW，美国某些地区停电达4天，加拿大部分地区最长停电时间达一周多。美国停电损失估计约40亿~100亿美元，加拿大经济损失估计约23亿加元。265座电站、超过508台发电机组停运（包括10座核电站、19台反应堆）。停电范围24000km<sup>2</sup>，涉及美国的密歇根、俄亥俄、纽约、新泽西、马萨诸塞、康涅狄格等8个州和加拿大的安大略、魁北克省。事故还造成3人死亡，在渥太华发生23次抢劫案，12个机场关闭。

一系列的电网大面积停电事故警告我们：如今大电网的脆弱性已经是一个具有无形力量的巨大黑手，时时刻刻都在威胁着电网的安全。

#### 四

自然灾害，包括地震、飓风、龙卷风、雷暴、磁暴及冰雪灾害等，也成为激活电力系统脆弱性、引发大面积停电事故的重大威胁。

## 1. 地震 (Earthquakes)

地震引起的灾害具有突发性、灾难性和社会性等特点。其破坏程度与震级(烈度)、震区内人口密度、发展水平、地质情况、地面建筑结构以及震前预报和预防情况有关。

1976年7月28日,中国唐山发生里氏7.8级大地震。地震造成唐山电厂、陡河电厂厂房倒塌,设备损坏,烟囱断裂,变电站、输电线路被毁。损失电量约占京津唐电网当时发电量的30%。

1989年10月17日,美国旧金山发生里氏6.9级大地震。地震影响100万用户停电,地震发生48h后仅恢复了约1%用户的供电。有部分230kV线路倒塌。震中圣克鲁斯(Santa Cruz)区配电线路受到严重破坏。整个旧金山地区地下电缆配电线路损坏有限。PG&E的一座500kV变电站断路器和2台112MVA变压器损毁。位于震中附近的Moss Landing发电厂及高压开关站损坏严重。位于旧金山以南370km处的奥比斯波(San Luis Obispo)地区,有5个共467MW容量的小电厂损坏,但位于该地区的Diablo Canyon核电站没有受到影响。

震后美国对1971年制定的电力基础设施的抗震设计标准进行了修订,其中一个重要标准是将地震加速度由0.2gs提高到0.5gs。

2008年5月12日,中国汶川发生里氏8级大地震。地震烈度11度,破坏地域超过10万km<sup>2</sup>。离震中较近的四川、甘肃、陕西等地区的电力设施遭受到严重破坏。

统计数据表明,灾区电力负荷损失874万kW,2座500kV/330kV变电站、15座220kV变电站、210余座35kV变电站、4条500kV线路、59条220kV线路受损停运。南方电网包括500kV江城直流双极跳闸,云南昭通地区个别35kV及以下线路跳闸。

四川省电力设施遭受破坏最为严重:川西地区32座电厂与主电网解列,289座电厂与地方电网解列,停运容量总计超过843万kW。灾害还造成206座35kV及以上变电站、1264条10kV及以上线路停运。宝成铁路四川段5座电铁牵引站供电中断。

陕西省4座35kV及以上变电站、109条10kV及以上线路停运。7座电厂不同程度受损,多台发电机组停运。

甘肃省陇南地区9个县(区)停电。2座220kV以上变电站、196条10kV以上线路及3座水电站受灾停运。

## 2. 飓风 (Hurricanes)

台风和飓风都属于北半球的热带气旋。因为它们产生在不同海域,在大西洋上生成的热带气旋,称作飓风,而在太平洋上生成的热带气旋称作台风。

飓风造成的损失与暴风雨的强度、路径、登陆地区人口密度和经济发展等因素有关。

2005年8月29日,大西洋地区历史上最高级别的5级飓风“卡特里娜(Katrina)”登陆美国路易斯安那州和密西西比州,290万用户停电,直接经济损失750亿美元。

在美国由于加强了对飓风等自然灾害的预警和管理,一般人员伤亡较少,但由于区域性经济的高度发展,造成的财产损失较大。

2006年8月10号,台风“桑美”登陆中国浙江、福建沿海地区,中心风力最高达到17级,是50年来登陆中国大陆地区最大的超强台风(相当于5级飓风)。受“桑美”影响,华东电网4回500kV线路、6回220kV线路、32回110kV线路跳闸,浙江、福建各有一座220kV变电站全停。

飓风主要破坏电网的输配电线路。伴随飓风而至的暴雨冲刷了杆塔基础,引起杆塔倒塌或倾斜。飓风对电网的破坏还源于树木倒塌造成输配电线路短路故障,而为了修复这些输电设施需要花费大量人力去清除倒塌的树木、输电塔、配电杆和导线等,使恢复时间大为延长。

### 3. 龙卷风和雷暴(Tornadoes and Thunderstorms)

每年龙卷风都要给美国造成数百人死亡以及几十亿美元的财产损失。大雨、冰雹和雷暴经常伴随龙卷风轨迹出现,输电线路和变电站以及电力系统通信常因雷击造成重大事故。

龙卷风对输配电线路的破坏性要重于对变电站或者发电厂的破坏性。而雷暴产生的地域更为广大,对配电线造成毁灭性更为严重。

### 4. 地磁暴(Geomagnetic storms)

地磁暴是太阳耀斑暴发引起的强烈地磁场扰动,是全球性自然灾害。

在强烈地磁场作用下,在地球表面由东向西诱发5~10V/mile、持续时间从几分钟到几小时的地面电势ESP(Earth Surface Potential)。在高压输电系统中,由于变压器中性点直接接地,ESP会在长距离输电线路与大地形成的回路中产生地磁感应电流GIC(Geomagnetically Induced Currents)。

1989年3月13日一阵强磁暴袭击了加拿大,导致差不多整个魁北克电网崩溃,停电长达9h。后经模拟得知,加拿大魁北克电网经受的GIC达78~234A。磁暴同时袭击了美国电网,引起继电保护误动和几台大型变压器损坏。其中位于新泽西塞勒姆(Salem)核电厂的一台升压变压器损坏,导致核电站关闭6周。

2004年7月27日和11月8日发生2次强磁暴,中国广东岭澳核电站相应地监测到了两次数值为20多A的中性点直流电流。江苏阳—淮500kV输电系统上河变电站750MVA变压器、东北赤峰—董家、北安—孙吴—黑河,西北龙羊峡—格尔木等电网变压器先后发生了噪声异常现象,经分析都是GIC导致的变压器直流偏磁所致。

### 5. 冰雪灾害(Ice-snow disaster)

2008年1~2月,中国南方部分省(自治区)遭受了80年以来最为严重的一



场冰雪灾害，电力系统部分设施遭受毁灭性打击。

以湖南省为例，据气象部门报告，全省气温在 $-1\sim-5^{\circ}\text{C}$ ，降水、降雪量丰富，相对湿度在90%以上，风速在 $5\sim 10\text{m/s}$ ，持续时间长达20余天。线路导线、绝缘子和铁塔出现厚度不小于30mm，最严重地区超过60mm的严重覆冰。在南方电网海拔400~1000m的山区，输电线路覆冰厚度最大达110mm。由于覆冰厚度大大超过规定的设计水平，造成电网设施大量垮塌，电网遭到严重破坏。

统计数据显示，冰雪灾害导致电网36740条10kV及以上电力线路、2016座35kV及以上变电站停运，310321基10kV及以上杆塔倒塌及损坏（其中110~500kV有8381基），3330多万户、约1.1亿人口停电，给社会、经济和人民生活造成了极为严重的影响。

## 五

针对系统的脆弱性实施人为攻击，对电力系统进行破坏，也成为电网安全的重大威胁。

对电力系统的人为攻击包括军事打击、恐怖活动及其他人为的破坏活动和突发公共事件。人为破坏会引发最具破坏性的大停电事故，这是因为破坏者往往将目标对准电力系统的一些关键设施。

对电力系统的攻击主要有3种类型：

(1) 对电力系统主体设施的直接攻击。恐怖分子可以同时攻击2个及以上变电站或输电线，从而引发电网大面积停电事故。

(2) 借助电力系统辅助设施进行攻击。恐怖分子可能用电力系统的辅助设施实施攻击。例如利用发电站的冷却塔散布化学或生物制品攻击人类。

(3) 以电力系统作为攻击的路径。恐怖分子可能利用电力系统的某些设施作为路径，袭击电子网络(Cyber)设施。例如骇客(Cracker)通过制造病毒、恐怖分子通过电网耦合一个电磁脉冲去破坏计算机网络、通信系统，甚至电力交易市场。

### 1. 军事打击 (Military Attacks)

在战争时期通过军事行动可对敌方基础设施进行致命性的打击。在第二次世界大战期间，德国具有一个高度集中的电力系统，一直到战争的后期也未受到破坏。德国官员惊讶地发现了盟军这一漏洞，他们说“如果同盟国先发制人，对德国的发电厂和合成燃料设备进行轰炸，那德国的经济就会受到致命打击，从而摧毁军事战斗力。”德国的这种体验，从此在未来的战争中再也没有被忽视。

1999年科索沃战争期间，北约空军启用了一种新研制的碳纤维新型炸弹(BLU-114/B石墨纤维炸弹，集束炸弹的一个变种)，对南斯拉夫联盟电力系统发动了干扰性轰炸。大量的碳纤维细丝或束，散布在电力系统上空，引起短路断电，一度造成南斯拉夫全国70%地区停电，使其机场跑道失去照明、电脑系统