



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

电力传输系统和智能电网

Electrical Transmission Systems and Smart
Grids: Selected Entries from the Encyclopedia of
Sustainability Science and Technology

[美] 米洛斯拉夫 M. 贝戈维奇 (Miroslav M. Begovic) 主编

邢作霞 李媛 于红梅 宋艳 等译



Miroslav M. Begovic *Editor*

Electrical
Transmission
Systems and
Smart Grids

Selected Entries from the Encyclopedia
of Sustainability Science and Technology

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

 Springer

关于本书

输电网是巨大的人造工程，仅美国就有长达30万km的输电网，有多达500家电力公司为其供电。在21世纪初，电力输送和控制技术经历了翻天覆地的变化，与20世纪电网的渐进性发展形成鲜明对比。新能源技术（主要指可再生能源）的快速发展，用于系统监测、规划、控制保护的信息加工技术的重大进步，配电网的巨变，以及终端用户应用（主要指高级测量和需求响应控制）的重大改变，都对现代综合电力基础设施——智能电网——的建立打下了坚实的基础。本书技术前沿，为跨能源技术、工程和城市规划重点课题选择提供了详细的介绍。全球专家讨论了电能源基础设施及现代世界更广泛的关键基础设施一体化及其各种相关性。专门章节涉及具体的主题，从地下输配、能源和水的相互依存关系到它们对城市地区的影响。覆盖范围还包括作为变革催化剂的新的政策措施所起的关键作用。



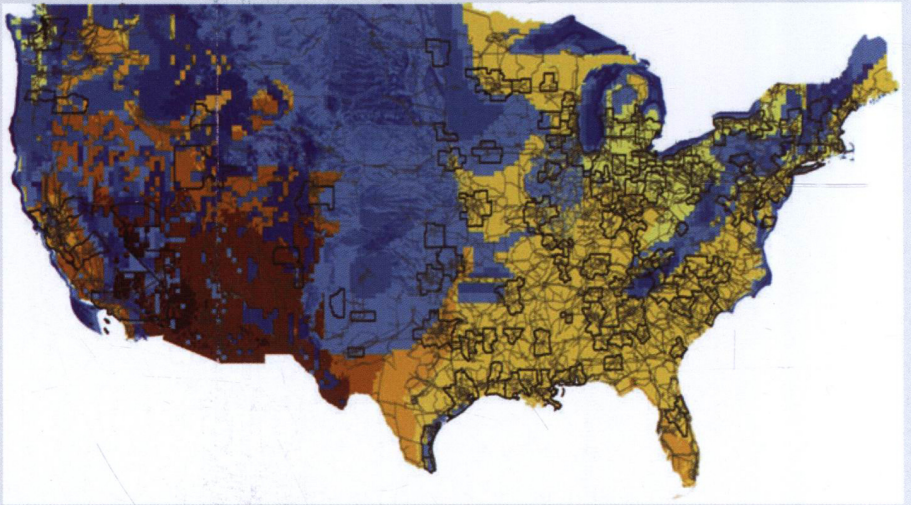


图 6.2

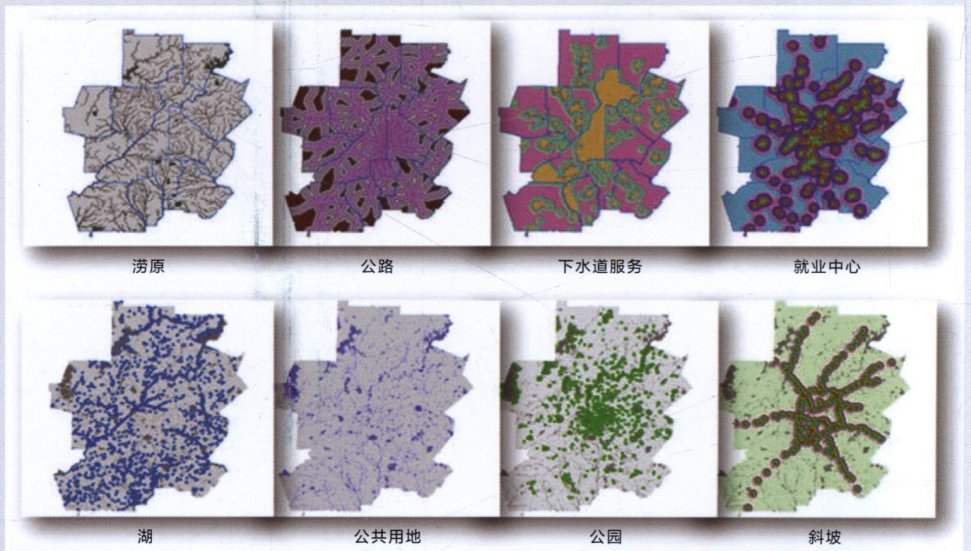


图 8.11

国际电气工程先进技术译丛

电力传输系统和 智能电网

[美] 米洛斯拉夫 M. 贝戈维奇 (Miroslav M. Begovic) 主编
邢作霞 李媛 于红梅 宋艳 等 译



机械工业出版社

本书主要针对智能电网、分布式发电以及可再生能源并网发电的相关技术进行了介绍,具体包括电力传输系统、智能电网、分布式发电、变电站特点,可再生能源发电系统稳定性特点,分布式发电智能监控、量测、自我恢复和保护,无功和潮流控制,输配电中的电缆材料及应用,以及未来城市发展智能电网的趋势和政策。

本书推荐从事智能电网和分布式发电的科研工作者、相关领域工程技术人员进行阅读,可以作为智能电网方向相关专业高校师生的专业课教材使用。

Translation from English language edition:

Electrical Transmission Systems and Smart Grids: Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology

by Miroslav M. Begovic

Copyright © 2013 Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书中文简体字版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2013-6568号。

图书在版编目(CIP)数据

电力传输系统和智能电网/(美)米洛斯拉夫·M.贝戈维奇(Miroslav M. Begovic)主编;邢作霞等译. —北京:机械工业出版社,2016.12

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Electrical Transmission Systems and Smart Grids

ISBN 978-7-111-55112-6

I. ①电… II. ①米…②邢… III. ①输电-电力工程-研究②智能控制-电网-研究 IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第246266号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:顾谦 责任编辑:顾谦

责任校对:肖琳 封面设计:马精明

责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2017年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·16.75印张·316千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-55112-6

定价:79.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

本书英文原版书是“Encyclopedia of Sustainability Science and Technology (ESST)”（可持续发展科学与技术百科全书）丛书中的一本，本书介绍了电力传输系统是最大的人造工程系统之一：例如，在美国，输电网线路覆盖30多万千米，由500家企业（电力公司）承担。传输和控制技术在21世纪初实现了一次重大的突破。新能源（可再生能源）发电技术的迅猛增长使应用到系统监控、策划、运作、控制和保护的信息处理显著发展。配电网发生了根本性的变化，并在用户终端进行切换（高级计量和控制需求响应），由此结合产生通常被称为智能电网的现代集成电力基础设施。本书共分9章：第1章 电力传输系统与智能电网简介；第2章 配电系统、变电站和集成分布式发电；第3章 可再生能源并网发电；第4章 停电：风险、成因及防范措施；第5章 广域监测、保护和控制；第6章 智能电网分布式控制；第7章 地下电缆系统；第8章 能源与水利的相互依赖性以及对城市地区的影响；第9章 可持续发展智能电网及政策框架的出现。每章涉及具体的主题，从地下输配电、能源和水的相互依存关系到它们对城市地区的影响。覆盖范围还包括作为变革催化剂的新的政策措施所起的关键作用。本书对选择新能源技术、工程和城市规划重点课题提供了一个详细的介绍。

为了向国内读者及时提供高质量的译本，邢作霞、李媛、于红梅、宋艳等组成了一个翻译小组，利用工作之余的时间努力攻关。邢作霞、李媛、于红梅、宋艳完成了其中的大部分翻译工作，邢作霞是本次翻译活动的倡议者和联络人。另外，郑伟、董丽萍、陈雷、马世平、马坪、赵盈洁、王海鑫、王鸿毅、芦彦东、董佳仪、赵凯、祁东亮、杨松迪、周瑞卿、董焕宝也参与了部分内容的翻译。

本书在翻译过程中，由于中西方文字表述的差异，原书中的一些内容可能使读者感到困惑，另外还有不少地方表述得很模糊。对于这些，我们都尽可能地加了译者注。

感谢机械工业出版社的顾谦编辑，他在本书编辑过程中所表现出来的热心、耐心和敬业精神令我们十分感动！

译者

目 录

译者序

第 1 章 电力传输系统与智能电网简介	1
第 2 章 配电系统、变电站和集成分布式发电	4
2.1 简介	4
2.2 配电系统	5
2.2.1 配电设备	6
2.2.2 自动化方案: FDIR	8
2.2.3 通信系统概述	12
2.2.4 自动化功能	15
2.2.5 自动化方案: 电压/无功控制 (VVC) 系统	21
2.2.6 注意事项	23
2.3 变电站	26
2.3.1 变电站的作用和类型	26
2.3.2 变电站组成	26
2.3.3 变电站设计注意事项	36
2.3.4 变电站标准化建设	37
2.3.5 变电站外观建设	39
2.3.6 保护及自动化	40
2.4 高渗透分布式发电及其对系统设计和运行中的影响	44
2.4.1 现代电力企业前景	44
2.4.2 “智能电网”的发展	45
2.4.3 分布式发电技术前景	47
2.4.4 需求响应设计和操作难题	47
2.4.5 需求响应一体化与“穿透功率”级别	48
2.4.6 分布式发电对电压调节的影响	49
2.4.7 分布式发电对电能质量的影响	50
2.4.8 分布式发电对铁磁谐振的影响	52
2.4.9 分布式发电对系统保护的影响	52
2.5 未来方向	54
参考文献	55
参考书	55

第3章 可再生能源并网发电	56
3.1 简介	56
3.2 电力系统背景	57
3.3 可再生能源特征	60
3.4 发电机建模与互连	63
3.4.1 故障穿越	63
3.4.2 频率控制	64
3.4.3 电压控制	64
3.4.4 无功功率	64
3.4.5 互连队列进程	64
3.5 运营影响	64
3.5.1 调控	65
3.5.2 负荷跟踪	65
3.5.3 风电出力不确定性损失	65
3.5.4 热电机组循环	66
3.6 市场因素	67
3.6.1 平衡区域合作	67
3.6.2 储备分享	68
3.6.3 调度间隔	68
3.6.4 辅助服务市场	68
3.6.5 容量市场	69
3.6.6 节点边际价格	69
3.7 输电规划	70
3.8 实现更大的可再生能源穿透率	70
3.8.1 波动性发电预测	71
3.8.2 随机规划和操作工具	71
3.8.3 加快市场发展	72
3.8.4 需求响应	72
3.8.5 电力存储	73
3.8.6 可再生能源发电削减	75
3.8.7 新负载	75
3.8.8 柔性发电	75
3.9 未来方向	76
参考文献	77
参考书	78
第4章 停电：风险、成因及防范措施	79
4.1 简介	80

VI 电力传输系统和智能电网

4.2 电网发展史	81
4.3 抑制电网大面积停电的挑战	82
4.4 历史事件	83
4.5 断电前的状态与断电风险	85
4.6 停电的征兆	87
4.7 电力系统建模与分析	89
4.8 扰动如何演变为停电	89
4.9 停电预防	92
4.10 系统完整性保护方案	95
4.11 系统恢复	97
4.12 未来方向	98
4.13 小结	100
参考文献	102
参考书	102
第5章 广域监测、保护和控制	103
5.1 电力系统监控	108
5.1.1 事件重建	108
5.1.2 状态估计	109
5.1.3 仅有相量测量装置的估量设备	111
5.1.4 用于所有相量测量装置的仪表互感器校验	112
5.1.5 接口	113
5.2 保护	114
5.2.1 自适应安全性/可靠性	114
5.2.2 继电器阻抗的监测方法	116
5.2.3 自适应失步	116
5.2.4 备份区管理	118
5.2.5 自适应失磁	118
5.2.6 智能孤岛效应	119
5.2.7 智能负荷投切	120
5.3 电力系统的控制	121
5.3.1 持续振荡的控制	121
5.3.2 强振荡的控制	122
5.3.3 补救控制系统	123
5.3.4 系统恢复	123
5.4 未来方向	123
参考文献	124
参考书	126

第 6 章 智能电网分布式控制	127
6.1 简介	127
6.2 新兴的挑战	128
6.2.1 负荷的增长	128
6.2.2 允许城市发电和输电的挑战	128
6.2.3 可再生能源发电的政策推动	129
6.2.4 新能源汽车的政策推动	131
6.2.5 电网和其他商品传输网络的区别	131
6.2.6 新兴经济体的可靠性挑战	132
6.3 分布式控制技术	132
6.3.1 最优潮流	132
6.3.2 无功控制	134
6.3.3 潮流控制	134
6.4 现有分布式控制技术	136
6.4.1 无功控制	136
6.4.2 潮流控制	140
6.5 新兴技术	148
6.5.1 弱电交流变换器 (TACC)	148
6.6 作为能源市场推动力的潮流控制	152
6.7 小结和未来方向	153
参考文献	153
第 7 章 地下电缆系统	156
7.1 简介	159
7.2 电缆系统结构	160
7.3 中压、高压和超高压电缆系统	160
7.3.1 电应力	161
7.4 电缆的应用	164
7.5 交流和直流输电	164
7.6 电缆类型	165
7.7 电缆组件	167
7.7.1 导体	167
7.7.2 半导体	168
7.7.3 绝缘	168
7.7.4 金属护套	169
7.7.5 外护套层 (外套)	169
7.8 电缆制造	170

VIII 电力传输系统和智能电网

7.8.1 制造阶段	170
7.8.2 挤出电缆制造方法	171
7.9 故障处理	171
7.9.1 外部缺陷	174
7.9.2 湿老化:水树	177
7.10 干老化:热老化	179
7.11 未来方向	179
7.12 了解电缆系统的寿命	181
7.13 针对老化问题提高电缆性能	181
7.14 可回收/恢复的电缆设计	182
7.15 增加使用加长链接	183
7.15.1 海底电缆系统	183
7.15.2 高效直流输电	184
7.15.3 电缆系统的诊断趋势	185
7.15.4 发展智能电网的影响	188
7.15.5 高温超导体 (HTS)	188
7.15.6 气体绝缘线 (GIL)	189
参考文献	189
第8章 能源与水利的相互依赖性以及对城市地区的影响	191
8.1 简介	193
8.2 方法学	194
8.2.1 弹性	194
8.2.2 寿命周期评估	194
8.2.3 物质流分析	195
8.2.4 工业生态学	196
8.2.5 城市可持续发展	196
8.3 目前的基础设施	197
8.4 水与能源之间的联系	197
8.5 水和能量之间的外在联系	200
8.5.1 交通能源	200
8.5.2 交通运输、土地使用、能源	201
8.5.3 水上运输	203
8.5.4 密度的复合动力	203
8.5.5 就业机会、生活质量和税收收入	204
8.6 步入一个更加可持续发展的未来	204
8.6.1 水	204
8.6.2 能源	206

8.7 未来方向	214
参考文献	215
参考书	217
第9章 可持续发展智能电网及政策框架的出现	218
9.1 简介	220
9.1.1 智能电网部署障碍	221
9.1.2 智能电网推动	222
9.2 促进智能电网发展的各种政策	224
9.2.1 净计量	225
9.2.2 并网规范	225
9.2.3 智能计量指标	226
9.2.4 需求响应和动态定价	226
9.2.5 可再生能源补贴和规则	227
9.2.6 其他	228
9.3 美国的小型电网政策：联邦效应	229
9.3.1 智能电网的立法和政策背景	229
9.3.2 政府部门的作用	230
9.4 美国智能电网政策：国家和地方的努力	231
9.4.1 加利福尼亚州	232
9.4.2 佐治亚州	235
9.4.3 纽约州	236
9.4.4 德克萨斯州	239
9.5 欧盟智能电网政策	240
9.5.1 智能电网的立法和政策背景	241
9.5.2 智能电网标准	242
9.5.3 政府机构和组织	242
9.5.4 筹资机制	242
9.5.5 意大利和英国的智能电网政策	243
9.6 其他国家的智能电网政策	245
9.6.1 日本	245
9.6.2 韩国	246
9.6.3 中国	247
9.7 国际合作	248
9.8 未来方向	249
9.9 小结	250
参考文献	251
参考书	257

第 1 章 电力传输系统与智能电网简介

Miroslav M. Begovic

电力传输是电力能源中最根本的组成部分，它将电从发电厂输送到居民区、工厂、商业中心以及大型综合联营中心等用户手中。在美国，有五百多家电力设备公司，电网线长达 30 多万 km，可以说，电网是人类最大的工程。

现代电力系统的发展使得电力生产者和使用者的差距越来越小，因为很多用户有自己小巧、轻便的经济适用型发电机，完全可以自给自足，比如安装在居民屋顶的光伏发电机和住宅附近的风力发电机。这些发电机得以广泛应用的原因有很多（如几乎不需要维护、降低电力成本、利用可再生能源发电、减少因长距离大功率电力输送而造成的电力拥堵、减少电力输送损失、政府的法规政策和经济诱因、减少碳足迹、提高可再生能源的可持续利用等。）人们对电能的需求不仅要求电力部门负责好居民区的这些供电设备，还要通过各种方式与其他基础设施联合（如水利、天然气、交通、信息等）。这些基础设施之间互相依存，而要高效、可靠的运作需要相互理解、支持和周密计划（参见“能源与水利的相互依赖性以及对城市地区的影响”章）。

在电流穿越波导管（导体）时，导体的电阻会导致电流耗散。高压架空导线不需要绝缘，导体材料几乎都是铝合金制成，通常是几股，并用钢链加强机械强度。在以前，铜是作导体材料的最佳选择，但是质量轻便、价格低廉且导电性与铜相差无几的铝现已成为电网传输中的新宠。在电力传输中大功率、高压输电会造成相当大的损耗，而高压输电最好是较小电流（这种较小电流在导体传输中的损耗与电流二次方成正比，即输电线电压提高一倍会减少 75% 的电能损耗）。运行电压等级作为能量吞吐量的一个功能特点，有必要将最初的直流传输过渡到交流传输（托马斯·爱迪生提出）。在 19 世纪 80 年代，为了把尼亚加拉瀑布电厂所生产的电顺利输送出去，Nikola Tesla 和 George Westinghouse 两人最先运用直流变交流，现今这种逆变已被广泛应用。今天，操作交流传输电压最高可达 500kV 甚至 800kV，讽刺的是，大功率传输需要 800kV 以上电压时，要通过直流传输并使用超高压直流变电站来实现。因为高架输电线路的电感在极高电压时会严重影响电能的有效传输。

传输电压通常设为 110kV 及以上，像 66kV 和 33kV 这样的较低压通常称为副变电压，低于 33kV 的电压通常用作配电。配电网的设计需要考虑其传统作用，作为一项基础设施，它必须把大量电能输送到用户手里，如此分散的输电需

要配电网在一个小容量（低电压）范围内运行，并且能覆盖地广人稀的区域（如农村地区）或者面积小但人口密集地区（如人口越来越多的现代都市），就像心血管系统里的毛细血管那样遍布全身。传统设计正朝着径向配电网络方向发展，其中包括变电站供电的支路，变电站将这些支路与大型电力传输网络相连接。电量流动的单向性和简易的配电硬件使得这种简单的布局得以实现。配电系统连接用户端和（分布式）发电端，同时要求在配电等级上提高互连的标准，针对不同需求采取不同的设计方案。部分现代配电网络很可能正在向微网过渡（即更网络化、更灵活自主的控制配电网络，或作为与电网连接的基础设备，进行电能的分配）。

变电站的结构和功能也在迅速发展，变电站是电网基础设施中重要的一环并且功能颇多（重新配置拓扑结构、维修时隔离设备、监控各个系统参数和电变量并将其传送给控制中心或其他地方、启动控制程序或继电保护方案）。变电站自动化是现代（智能）电网发展中最迅速的部分，并且为了在输电和配电两方面对电力系统实现更加灵活有效的监测、控制及保护，这种发展势头还将继续保持（参见“配电系统、变电站和集成分布式发电”章）。

尤其在发达国家，配电网主要采用地下电缆而非架空线。这种解决方案有很多好处（可靠、美观、不易损坏等）但也有弊端（成本高、因潮湿和被雷电击中产生的电磁脉冲造成易老化、缺少有效诊断程序去评估运行状态，缺少有效维护以保证电缆寿命、维护费用高等）。然而，地下配电（有些地方称地下输电）在电力系统中的重要性和花费逐步增加，并在管理和维护方面也做了相当大的投入。

分布式发电（DG）可以看做是小规模、分散式、去中心化、就地利用的电能网络。目前，分布式发电容量通常在几千瓦到几百兆瓦范围内。随着更多的DG渗透到电力系统中，人们为了分析研究DG对各类微网和配电网的影响，精准高效的系统分析算法也更彰显其重要性。因为DG对配电系统的运行、保护及控制等方面产生诸多不利影响，所以电力公司不愿意将用户自有的小型发电机连接到他们的配电网中。电力公司往往把非公用发电进行广泛的技术层面分析，但政府鼓励建DG且支持并网尽可能简易、透明。不过，小型发电的利好特点，尤其是使用可再生能源发电，将使其分布越发广泛，也越来越受欢迎。甚至现在就有很多国家（爱尔兰、西班牙、丹麦等）采用大量可再生能源发电。目前，从装机容量角度看，风力发电是发展最快的一种新型发电技术，而且可再生能源发电量（包括水力发电）已经远远超过核能发电（2011年美国），此时很多规划、管理、操控以及保护新电网方面的工程挑战也随之涌来，所以一场大变革已经迫在眉睫（参见“可再生能源并网发电”章）。随着一些国家正逐渐从传统的核能发电向可持续能源发电的转变，这种变革显得越发重要。

在输配电中最受制约的一点就是电能无法存储，所以只要有需求就必须马上发电，很少有例外。目前最大难题是储能还无法规模化、高效化（抽水储能技

术相对成熟)。在此期间,大批小容量储能技术得到开发和推进(超导磁体储能、飞轮储能、电池储能等),主要是为了给重要(但相对小型的)负荷持续供电,但很少能超过与大型电网连接的效果。当储能技术发展到可以商业化、规模化时,可能对电力系统带来革命性的影响,从而对其生产经营理念和运行管理模式产生巨大改变。

因为缺少有效的储能装置的选择,为了保证发电与需求间的实时平衡,先进的监测、控制、保护设施必不可少。如果电力的发电端和消耗端不平衡,或者系统中复杂的电压控制设备受到超负荷冲击,或运行中遇到不可预见的中断(如设备主要部件故障),电厂和输电线的关闭将会导致大面积停电。有时这种停电仅仅是因为初始扰动传播导致系统设备超载,从而导致级联设备停运,而这种初始扰动的影响在开始时非常微小。这一系列事故将产生无法想象的后果,即使大型计算机也很难预警。一个不可控制的扰动可能逐步被放大到使系统崩溃从而造成不可预见的后果。在大电网领域,某些地区的“蝴蝶效应”确实会给其他地区造成“风暴性”灾难(参见“停电:风险、成因及防范措施”章)。

为了减少断电产生的风险,各地区、国家、洲际网络间紧密互连,为电力输送提供多种渠道。为确保充足的备用容量和多方供电渠道,从而减少大规模网络瘫痪带来的严重后果,电力公司花费了大量精力。为了避免众多无法预见的危险,事前良好的协调计划(要慢,基于协调发电和控制系统的优化算法)和提前防范措施(要快,应急控制与保护)可以有效避免断电并减少系统恢复所耗时间与财力(参见“智能电网分布式控制”章)。特别需要注意的是系统对极端事件的应对能力,那些看起来不可能发生的连锁反应极有可能给消费者和电力公司造成巨大损失。

以上描述的是一般智能电网的功能特点和解决方案。高级电网管理和控制保护逐步采用新型技术的做法说明传统电网正向智能电网有效过渡,对此,不同学者有不同看法,但总体归结如下:

- 具有从重大损失和巨大干扰中修复的能力(自愈力);
- 具有让消费者参与能源管理和需求响应的机会(让电力公司和消费者通过智能电表提供的额外支持和信息进行操作);
- 具有回应、应对、加强自身反抗来自于自然界和网络攻击的能力;
- 具有将来为现代化设备提供高质电力的能力;
- 具有容纳所有的发电设备和储能设备的能力;
- 具有让新产品、服务和市场顺利实施的可能;
- 具有优化资产和高效运营的能力。

向智能电网的过渡阶段有时可能明显地受效益和成本所影响,有些可能受管理和政府政策所驱使(参见“可持续发展智能电网及政策框架的出现”章)。

第 2 章 配电系统、变电站和集成分布式发电

John D. McDonald、Baratosz Wojszczyk、Byron Flynn 和 Ilia Voloh

术语表

需求响应	允许针对客户需求侧进行管理，响应供电情况
分布式发电	电能从很多分散的区域连接到电网，比如风电场和太阳能发电板
配电网	可以直接为居民、商户和工厂供电的部分
配电管理系统	一种智能电网自动化技术，可以提供分布式电网的实时情况及远程操控电网设备
变电站	向电网输电的变电所
配电系统	变电站与客户连接的系统
可再生能源	来自自然界的能量，并由自然界不断补充，例如阳光、风、雨、潮汐、生物质燃料以及地热
智能电网	现代化输电系统，可自监视、保护、自动优化相关部件的运行

主题定义

本章介绍了配电系统的重要组件：配电网、变电站、相关的电力设备和控制设备以及如何将这些自动的配电管理系统、设施、控制并入上述系统，建立一个可以处理整合大量利用可再生能源发电的分布式发电的“智能电网”。

2.1 简介

发电站（DG）或者分布式发电并非一个新的产业概念。早在 1882 年，托马斯·爱迪生建立了他的第一个商业电站“珍珠街”。珍珠街电站可以给下曼哈顿城里的 59 家商户提供 110V 的直流电。到了 1887 年，美国已有 121 家爱迪生电站给用户 提供直流电。这些早期的电厂利用煤或水进行发电。当人们认识到交变电流可以通过升降压的方式降低输电成本和减少功率损耗进行远距离输电时，集