



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

智能电网 ——欧美的应用与实践

SMART GRIDS

[法] Nouredine Hadjsaïd 著
Jean-Claude Sabonnadière

李小琳 等译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



关于译者

李小琳，女，高级工程师，清华大学电力系统自动化专业毕业，研究生学历，美国麻省理工学院访问学者。现任中电国际董事长、党组书记。



国际电气工程先进技术译丛

智能电网

——欧美的应用与实践

Smart Grids

[法] Nouredine Hadjsaïd 著
Jean-Claude Sabonnadière

李小琳 等译



机械工业出版社

本书由欧洲多名在智能电网理论和实践研究上享有盛誉的知名学者共同完成，结合欧美已有的研究成果和实践经验，对智能电网整体面貌以及在智能电网实际构建过程中遇到的方方面面的问题，包括智能电网的商业模式、调度模式、能量管理、辅助决策、输配电网、智能用户、计量与信息通信等，均以精炼的语言加以描述，既有基础的理论准备，也有大量的案例分析和经验总结。

本书可以帮助所有智能电网业内相关人士、行业工作者、专家学者、在校学生、监管机构、跨行业工作者和每一个对智能电网感兴趣的人去理解它的实际运作和发展趋势。

“Smart Grids” edited by Nouredine Hadjsaïd and Jean-Claude Sabonnadière.

Copyright © ISTE Ltd 2012.

All Rights Reserved. This translation published under license.

本书中文简体字版由 Wiley-ISTE 授权机械工业出版社独家出版。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：01-2012-8716 号

图书在版编目（CIP）数据

智能电网：欧美的应用与实践 / （法）哈德赛德等著；李小琳等译。

—北京：机械工业出版社，2015.3

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Smart grids

ISBN 978-7-111-49394-5

I. ①智… II. ①哈… ②李… III. ①智能控制—电力系统—研究—欧洲 ②智能控制—电力系统—研究—美洲 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 033571 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：付承桂 责任编辑：付承桂 任鑫

责任校对：黄兴伟 封面设计：马精明

责任印制：乔宇

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·15.75 印张·303 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-49394-5

定价：68.00 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

服务咨询热线：（010）88361066

读者购书热线：（010）68326294

（010）88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

中电国际智能电网编译组

组 长 李小琳

成 员 王冬容 董 军 魏汉雨 蔡 翔

郝 炜 薛贵元 王秉晶 冯 琪

马 钰 杜月华 李 荣 蔡泓忻

王单单 冯天天

译者序

2012年的这个季节，我应 IEEE（美国电气电子工程师学会）主席 Noel Schulz 女士邀请，参加了在柏林举行的 IEEE 智能电网大会。作为大会荣誉联系主席，我在会上提出了促进交流、增强共识、加速创新、深入合作四点希望，呼吁各界代表立足当代人类和子孙后代的根本利益，以政治家的远见卓识、科学家的超前思维和企业家的实干精神，共同致力推进智能电力事业发展，让清洁能源走进千家万户。

长期以来，电力能源行业都以一种远离终端消费者的、集中的、封闭的方式运行；即使是新能源，也主要采用传统的集中、大规模发展方式，造成了大量的弃风、弃光和系统平衡、安全问题，同时，也限制了新能源发展空间。

意识到这一问题，2009年，我和我的团队提出了“让清洁能源走进千家万户”的理念。我们认为，要解决当前的能源与环境问题，必须要让传统能源清洁高效利用和大力发展新能源相结合，分布式与集中式相结合，新能源与智能电网相结合！

我们认为，未来的电力系统将是以信息通信技术与新能源技术深度融合为主要支撑，以新型能源与新型用户深度协同为主要特征的，具有高度灵活性、生态性、智能性、可靠性和经济性的绿色智能电力系统。

灵活性是指：就地取材，就地平衡，灵活多样，余缺交互。生态性是指：充分利用自然能源和自有资源，清洁能源占比远高于传统电力系统，碳足迹逐年递减。智能性是指：实现电力能源生产使用的自平衡，资源利用的自循环，电源、负荷的自协同，内外故障的自诊断、自隔离、自愈合。可靠性是指：实现电动汽车等新型互动用户和各种可再生能源的友好接入，可再生能源接纳能力和供电可靠性远优于传统电力系统。经济性是指：确保在现有投资水平、不增加能源使用成本的前提下，实现以上全部特性。

绿色智能电力系统将可以广泛复制推广到新型城镇化和工业化建设当中，形成成千上万充满活力的新型绿色智能“能源细胞”，有效解决能源安全问题和因过量使用高碳化石能源造成的环境污染问题，减少能源的大规模长途输送，以及在输送转换环节中的损耗，为“美丽中国”、小康社会和城镇化建设提供安全、可靠、清洁、经济的电力能源支撑。

与此同时，互联网信息技术和云计算技术的发展，也将让能源具有更多的“智慧”。从城市建筑到交通工具，乃至到每一个家庭、每一个人，都将变成能源的管理者和创造者，进而完全达到绿色和生态的城市建设目标，实现人与自然、社会与环境、科技与生态的完美融合与和谐发展。

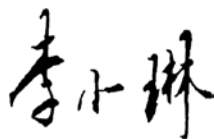
千里之行，始于足下。绘就智能电网的美丽蓝图，需要我们从最基础的工作开

VI 智能电网——欧美的应用与实践

始，沿着正确的方向埋头努力。智能电网并不是一个横空出世的全新事物，而是以现有输配电网和信息通信技术深入融合为基础，不断创新、改进、提升的产物。

它山之石，可以攻玉。在这几年与国外同行的沟通交流中，深刻认识到他们在智能电网相关理论研究和实践探索上，都已做了大量有益的工作，很多方面走在了我们前面。选取欧美智能电网的经典书籍引入中国，希望能为我国关心、支持、参与新能源和智能电网事业的人们提供一些借鉴和参考。

本书由中电国际智能电网编译组翻译，编译组成员由中电国际、华北电力大学和中科院的有关同志组成。本书多位作者为法国专家，其法式英语为翻译工作造成了一定的困难，同时，由于译者水平有限，翻译过程中难免存在诸多错误和疏漏，敬请国内专家同行批评指正！

Handwritten signature in black ink, reading '李小琳' (Li Xiaolin).

2014年12月

原书前言

在过去的—个世纪，城市能源的供应情况发生了显著的变化。19世纪期间，城市中主要能源资源是煤炭。燃气被当作二次能源，产自于煤炭并经由燃气管网运输分配，作为石油的竞争对手，它的主要应用之一是照明。

在20世纪之交，电力作为一种二次能源开始普及。照明再次成为一个主要的竞争领域，在这个领域中，电力的主要优势是自动化和用户友好性。为了平衡需求，其他方面的应用（如动力装备、家用电器等）被逐步引入。为了进一步平衡需求、提高可靠性，同时为了减少系统备用容量，建立了小型的地区电网互联，并经进一步发展，形成了我们现在所看到的电力系统。在欧洲大陆，各城市内部径向分布的电网为低压电网，通常为三相230/240V。在节点处，低压电网通过变压器与一个中压电源相连（大约为10kV）。中压电网常常设计成网状，但往往在非网状态下运行。通过互为备用的网状输电网及其中的高压变电站为城市提供电能，同时实现跨国连接。

在许多欧洲城市，燃气管网后来被改造成天然气输送管网用于供暖，而另一些国家则选择了将其改造成为供热管网。

在能源领域中，电力和天然气市场的自由化趋势，以及来自环境可持续的能源供应的驱动下，温室气体减排、可再生能源资源应用的增加，正在激发不同利益相关者的兴趣。在未来几年内，能源需求将根据用户需要而做出更多的调整。用户感兴趣的并不是能源本身的调整，而是所谓的能源服务，即照明、运输、加热/制冷、信息和通信技术（ICTS）、家电等。除了服务质量和降低成本，能源的全面互联、能源“按需供应”、面向服务的投资组合和灵活的合约管理也将在满足用户期望上发挥主导作用。

本书的目的是描述使所有能源服务变得可持续的未来电力网。有几个章节涉及了电力系统的原理，除了关注输配电网的电力原理外，也对新型能源需求，特别是控制和系统交互的各个方面进行了关注。

电网是指覆盖所有线路和设备的系统，它承担着向消费者供应能源和向各种发电技术提供接入的角色。随着时间的推移，分布式发电将获得越来越多的关注，它将成为城市能源系统的一个组成部分，为消费者和能源供应商提供安全、实惠、清洁、可靠、灵活和便捷的能源服务。促进并推广分布式发电技术将有益于能源消费者、整个能源系统以及环境，这一切都是通过优化从能源供应商到大量使用智能电网基础设施的智能用户之间的价值链来实现的。

智能电网的发展目标是制造一套标准化和模块化的“即插即用”接口模块，从

而可以降低用电成本，节省材料的使用等。考虑到能源系统严格的环境约束和市场模式，这将降低整个电力传输链的成本。这些即插即用的互动模块都非常环保（例如易于回收/再利用），对公众的负面影响几乎没有（它们是无毒性的，没有干扰，产生的电磁场处于可接受水平等）。这些模块在很大程度上能够按照个性化需求定制。通过标准化、模块化和可编程功能，使规模化的产业经济成为可能，将带来更低的制造成本、更少的库存费用以及易于扩展和维护的用户系统。智能电网能够使欧洲在世界市场中获得竞争优势。假如满足了最低限度的技术要求，使得网络运营商通过先进的智能技术最大限度地提高效率、灵活性和可靠性，那么智能电网就可以以相对较低的成本为用户提供可选择的、优质的能源供应。

可再生能源发电的不确定性，如风电和光伏，会对电力系统的运行产生相当大的影响，主要指安全界限及因此而产生的运营成本。这显然需要在所有电压等级对集中发电和分布式发电进行综合控制。考虑到必要的技术进步和财政激励，目前基于集中控制的运营方式需要向分散控制转变。信息和通信领域的技术发展（电信、分布式控制、先进的预测技术、在线安全评估等），可以显著地促进这一发展过程。电网接口的开发必须包括这些要素，并与从“用户整合”和“有效需求侧管理”的观点出发而得出的结果相一致。我们需要分析配电管理系统可能的协同作用和电网储能的影响研究（高峰负荷、电能质量、可再生能源的渗透）。

一般而言，配电系统分析的仿真工具和方法已经比较先进，并用于在离线环境中研究其运营和发展。有时这些工具被升级和定制用于在线环境，目的是进行发电调度，系统状态评估和安全性分析。这些仿真和分析软件是面向由集中控制发电厂和单向电力流动构成的常规发电。

大量的微型发电机和分布式发电输出的不确定性 [归因于可再生能源资源 (RES) 获得的间歇性，或分布式发电运行对于其他服务的依赖性，比如供热需求驱动了热电联产 (CHP)]，还有潮流的变化——尤其是在配电网方面，都是还无法通过目前广泛应用的方法和仿真工具有效加以解决的问题。而且，分布式发电通常是通过电力电子接口连接到网络的，为了实现频率和电压控制，开发出了新的、基于电力电子技术和各种类型存储设备的先进控制器，这些都旨在支持配电网。在电力电子转换器换向过程的仿真以及先进的数字控制方面都还存在局限性。最后，这些模型很大程度上忽视了数据交换和电网运营的通信需求。

为了预测技术难题和障碍，确定解决方案并支持新的投资决策，分布式电网运营商 (DNO) 需要新的方法和相应的计算工具来正确地研究分布式发电与电网一体化的各个方面，新问题要求新的数学方法的发展。为了未来电力网络的运营和发展，研究必须涵盖有关仿真和分析所需要的一系列课题。这些研究应该通过与主要利益相关者的讨论加以确认，每个参与者的作用和不同参与者之间的关系需要明确，很多问题需要得到揭示，例如制造商的作用是什么？什么类型的数据/信息需要在制造商和分布式电网运营商之间交换？什么数据需要为了进行电网控制而在线传输？

怎样传输？

可应用的分散式网络控制划分为多个层次，即从完全分散式控制到逐级控制。通过使用这种分布式控制策略，较低层级的控制能够独立运行并脱离较高级别的控制，从而形成孤岛运行，并能以当地系统所需要的可接受的电能质量，维持当地电力供需平衡。这样的控制独立性使得一部分电网可在两种模式下运行：独立运行（孤岛运行）或联网运行。在接入分布式电源的部分电网中，这种可能性增加了供电的可靠性，因为它们内部的电源可以在公共电网中断期间供应内部需求。另一方面，在应用联网模式的正常情况下，为了获得最大的系统经济效益，可以使用和共享系统资源（包括微网资源）来满足系统的需求。

未来的有源网络将有效地将中小型电源与用户需求联系起来，从而实现最优实时调度，为此所需要的控制水平明显高于目前的输配电系统。功率检测、电压控制及保护需要具有成本优势的技术和新的通信系统。该通信系统必须安装与目前相比更多的传感器和传动装置，当然在配电系统中也是如此。为了管理有源网络，网络计算的设想被创造了出来，以确保能够普遍地访问计算资源。智能电网基础设施使得需求和供应更加灵活，同时为电网低成本的优化运营提供了新的工具。智能基础设施实现了网络和信息资源资源共享，包括辅助服务、供需平衡服务、可看作虚拟电厂的微电网等。它为包括输电系统运营商和分布式电网运营商在内的所有电网用户创造了一个框架。

为了开拓利用分布式发电的优势（包括可再生能源），有必要遵循一种“系统方法”：分布式发电不会以一个独立的模式接入电网，而是将会完全融入电网。正如已有的高压电网的情况，中低压电网将转而变得“活跃”。通过分布式发电产生的能量将被相应地调度，分布式发电商将不得不为电网提供辅助服务，并且将会成为正式的市场参与者。

现有电网中的大多数设备均拥有大约 40 年的设计寿命，在这期间，它允许预期中的负荷增加，但是，即将达到其设计寿命的材料的比例正在增加。同时，电力负荷属性的变化超过原先的计划和设计，电力需求自 20 世纪 60 年代以来翻了一番，电力峰荷及其对应时段也在改变并且将持续改变，且发展方向不定。

大量重大投资都要求对基础设施进行起码的更新，最有效的方式是在计划和执行此更新时，将创新技术和方案应用进去。设计更大电网容量和功能的方法也将考虑到不确定性管理和目前还无法预料的未来变化。

传统的可靠性模式，还有资本密集型电厂和电网设备过长的投资回收期（大于 30 年）阻碍了资产的管理。伴随长周期投资的复苏而存在的潜在不确定性，要求提高对电网的自然生命周期及其现有组件的认识。任何对未来电网的考虑也会考虑到未来安装/更新资产的预期寿命，以及全部利益相关者对那些资产在由安装到报废过程中所期望的性能表现（例如，可靠性、安保性、可用性、可访问性、灵活性、适应性、安全性、环境影响、美感影响、运行影响、性能和寿命费用）。

集中式结构的网络控制系统的传统设计不同于解耦的电力系统和分散控制的模式。在分散和竞争的环境中，系统经常接近于极限运行，因此，所有系统资源和服务应精确管理以确保高水平的可靠性。从防御和修复的角度来看，主要目标是建立一个“自愈”网络，其具有高度分散的预防控制和网络自动恢复的断电管理。因此，主要的目标和任务应该是为电网运营实现可升级的、灵活的数据采集和监控系统（SCADA）（为了 DSO 水平的低电压和客户定制的自动化应用而采用的 SCADA）。

作为关于智能电网的 FP7 技术平台的主席，我热情推荐您拥有此书。它是智能电网领域的一本精炼的专著，由许多对未来电网各个方面均进行过高层次研究的知名学者共同完成。我相信这将成为科技界重要的资源。

Ronnie BELMANS 教授
智能电网技术论坛主席
2010 年 3 月于欧盟

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 智能电网：动力、风险和前景	1
1.1 概述	1
1.2 为电力系统服务的信息和通信技术	4
1.3 先进技术的引入	5
1.4 欧洲能源的前景	7
1.5 向以电力为能量载体转变	12
1.6 智能电网发展的主要原因	12
1.7 智能电网的定义	13
1.8 智能电网的目标	14
1.8.1 输电网特性	14
1.8.2 配电网特性	15
1.8.3 配电网的必然趋势：智能电网	15
1.9 社会经济与环境目标	15
1.10 智能电网中的利益相关者	16
1.11 智能电网的科学研究	17
1.11.1 创新概念的发展实例	17
1.11.2 科学、技术、商业和社会的挑战	21
1.12 发展智能电网所需的能力准备	23
1.13 结论	23
1.14 参考文献	24
第 2 章 从智能电网到智能用户	26
2.1 主要趋势	26
2.1.1 危机	26
2.1.2 环境意识	27
2.1.3 新技术	27
2.2 个体与能源关系的演变	28

2.2.1	对能源的关切	28
2.2.2	透明的必要性	29
2.2.3	责任	29
2.3	能源公司的历史模式	30
2.3.1	自然垄断中的传统运营商	30
2.3.2	以技术知识为重点	30
2.3.3	未开发的客户关系	31
2.4	消费者理解的智能电网	32
2.4.1	第一步：数据革命	32
2.4.2	第二步：智能生态系统的建立	34
2.4.3	消费者的反对	35
2.5	商业模式	36
2.5.1	世界各国对商业模式的探讨	36
2.5.2	政府对有效监管模式的研究	38
2.5.3	新型利益相关者的机遇	39
2.6	参考文献	41
第 3 章	输电网：智能电网的利益相关者	42
3.1	变化的能源环境：可再生能源的发展	42
3.2	变化的能源环境：新型消费模式	45
3.3	新的挑战	50
3.4	输电网的发展	52
3.5	结论	55
3.6	参考文献	56
第 4 章	智能电网与能量管理系统	57
4.1	引言	57
4.2	分布式发电资源管理	58
4.2.1	分布式可再生能源发电的特征	58
4.2.2	将可再生能源整合到管理过程中	59
4.3	需求响应	62
4.4	储能技术、微电网及电动汽车的发展	64
4.4.1	新的储能方式	65
4.4.2	微电网	65
4.4.3	电动汽车	65
4.5	高压直流输电连接管理	66

4.6 电网可靠性分析	67
4.6.1 基于模型的稳定性分析	67
4.6.2 基于连续测量的分析：相量测量单元	68
4.6.3 动态极值	69
4.6.4 自愈电网	70
4.7 智能化设备管理	70
4.8 智能电网推广	72
4.8.1 试点项目的需要	72
4.8.2 电网可靠性的投资激励	73
4.8.3 可再生能源	73
4.8.4 能源效率的投资激励	73
4.8.5 成本/利润分配	73
4.8.6 新的监管框架	74
4.9 标准	74
4.9.1 智能电网案例分析	74
4.9.2 工作进展	75
4.9.3 合作	75
4.10 系统架构项目	76
4.10.1 发展前景	76
4.10.2 考虑垂直变化	78
4.10.3 开发集成工具	79
4.11 致谢	80
4.12 参考文献	80
第5章 智能电网的核心——配电系统	81
5.1 配电网简述	81
5.2 复杂化是当今电网的变化趋势	82
5.3 智能电网促进无碳能源转型	82
5.4 智能电网的组成	83
5.5 智能设备寿命	84
5.6 智能运行	84
5.7 智能电表	85
5.7.1 Linky智能电表项目	85
5.7.2 用户新服务	85
5.7.3 智能电表极大地推动电网管理现代化	86
5.8 智能服务	86

5.9 智能局部优化	87
5.9.1 分布式发电	87
5.9.2 积极的需求侧管理	88
5.9.3 分布式储能方式	88
5.9.4 新用途（包括电动汽车）	89
5.9.5 系统的局部优化	89
5.10 配电商是未来智能电网的核心	90
5.11 参考文献	90
第 6 章 配电网的规划和重组	92
6.1 引言	92
6.2 配电网的结构	93
6.2.1 高/中电压变电站	93
6.2.2 网状和环状配网	94
6.2.3 导线的种类	96
6.2.4 地理线/架空线	97
6.2.5 中低压变电站	97
6.3 配电网的规划	97
6.3.1 规划/工程的原则	98
6.3.2 电网架构必须满足的标准	99
6.3.3 案例	99
6.3.4 长期和短期的规划	102
6.3.5 接入分布式电源对中压电网结构的影响	106
6.3.6 提高分布式电源渗透率	111
6.3.7 提议的新环形结构：混合结构	113
6.4 减少能量损失的重新配置	115
6.4.1 铜损问题	115
6.4.2 优化问题的数学公式	117
6.4.3 组合优化	120
6.4.4 寻找最优配置的不同方法	124
6.4.5 部分网状结构电网的重建	131
6.5 参考文献	132
第 7 章 能源管理及辅助决策工具	135
7.1 引言	135
7.2 电压控制	135

7.2.1	配电网电压控制简介	135
7.2.2	配电网的电压控制	136
7.2.3	含分布式发电的配电网电压控制	136
7.2.4	结论	144
7.3	保护方案	144
7.3.1	中压保护方案	145
7.3.2	中性点接地模式	147
7.3.3	故障特征	147
7.3.4	停电	148
7.3.5	分布式发电对馈线保护的影响	148
7.4	故障后重置：INTEGRAL项目的结果	151
7.4.1	INTEGRAL项目目标	151
7.4.2	示范点描述	151
7.4.3	一般自愈原则	154
7.4.4	结论	156
7.5	可靠性	159
7.5.1	蒙特卡罗模拟的基本概念	160
7.5.2	可靠性结论	165
7.6	参考文献	165
第 8 章	充电式电动汽车接入配电网	167
8.1	个人电动交通工具的变革	167
8.1.1	技术可靠性的提升	167
8.1.2	案例分析：Fluence ZE	168
8.1.3	对电网的影响如何？	168
8.1.4	需求管理与V2G	169
8.2	电动汽车作为“主动负荷”	169
8.2.1	能源服务	169
8.2.2	频率调整	170
8.2.3	负荷备用及削减	171
8.2.4	其他服务	171
8.3	经济影响	172
8.3.1	未来有利可图但又有局限性的市场	172
8.3.2	新的商业模式	172
8.3.3	市场一体化	173
8.4	环境影响	173