



国际电气工程先进技术译丛



可再生能源并网： 电网的间歇性、不确定性和灵活性的管理实践

**Renewable Energy Integration: Practical Management of
Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids**

[美] 劳伦斯 E. 琼斯 (Lawrence E. Jones) 主编

盛万兴 吴鸣 刘海涛 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

RENEWABLE ENERGY INTEGRATION

PRACTICAL MANAGEMENT OF
VARIABILITY, UNCERTAINTY,
AND FLEXIBILITY IN POWER GRIDS



Editor
Lawrence E. Jones, Ph.D.



国际电气工程先进技术译丛

可再生能源并网：电网的 间歇性、不确定性和 灵活性的管理实践

**Renewable Energy Integration: Practical Management of
Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids**

[美] 劳伦斯 E. 琼斯 (Lawrence E. Jones) 主编
盛万兴 吴鸣 刘海涛 李洋 季宇 于辉 李蕊 译

机械工业出版社

Renewable Energy Integration: Practical Management of Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids.

Lawrence E. Jones.

ISBN: 978-0-12-407910-6

Copyright © 2014 Lawrence E. Jones. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

Copyright © 2017 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd and China Machine Press.

All rights reserved.

Published in China by China Machine Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记图字：01-2014-8164 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

可再生能源并网：电网的间歇性、不确定性和灵活性的管理实践/（美）劳伦斯·E. 琼斯（Lawrence E. Jones）主编；盛万兴等译. —北京：机械工业出版社，2017.3

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Renewable Energy Integration: Practical Management of Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids

ISBN 978-7-111-56796-7

I. ①可… II. ①劳…②盛… III. ①再生能源—应用—电网—电力工程—工程管理 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 103924 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 朱 林

责任校对：刘 岚 封面设计：马精明

责任印制：李 昂

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2017 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 26.75 印张 · 539 千字

0 001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-56796-7

定价：99.00 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

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com



随着对可再生能源利用率的不断增加,无论在技术层面还是在政策层面,电网的重塑和发展都面临着许多挑战。Lawrence E. Jones 博士综合国际知名骨干研究人员和从业人员的独特观点,重点关注电网具体的战略实践,并将相关理论在实际中应用,并促进配套政策框架的制定。本书综合考虑了大量可再生能源包括风能、太阳能、波浪能和潮汐能的并网问题,研究如何确保可再生能源发电渗透率低或高的电网运营商在同行中取得利润均衡。

本书分为政策与法规,间歇性能源的建模,电力系统和市场运作中的间歇性能源,可再生能源预测,可再生能源并网,系统灵活性,需求侧响应和分布式能源,孤岛电力系统中的间歇性能源,太阳能、潮汐能和波浪能并网以及可再生能源并网实践和突破性技术共 10 个部分,共 35 章内容。各章内容均与间歇性、不确定性和灵活性的可再生能源并网管理实践相关。

本书可以帮助决策者进行政策制定以及电力公司管理人员进行技术应用,对相关高校研究学者、工程技术人员也是一本有益的参考书。

译者序

可再生能源的使用对于全球清洁可持续的发展有着重要作用。近年来，电力系统中可再生能源的比例不断增加，电网中关于可再生能源并网后的间歇性、灵活性及不确定性的管理受到越来越多学者的关注。研究可再生能源并网挑战和解决方案以及政策支持与监管、电力市场运营都有着十分重要的意义。

与传统电力系统相比，含可再生能源尤其是高比例可再生能源并网的电力系统有着间歇性、灵活性及不确定性，这就要求必须有一套适用于可再生能源高渗透率的分析方法和理论体系。本书以此为出发点，首先介绍了全球各个区域可再生能源并网的现状，使读者对整体的政策、技术层面有基本了解；其次对含可再生能源并网的电力系统进行建模，介绍了多个典型案例，反映了可再生能源并网的具体挑战；然后介绍了现有的可再生能源的相关预测和运行控制技术及实际运行案例；最后详细阐述了基于大电网、孤岛、储能、态势感知、动态容量、同步向量及大数据等技术来解决可再生能源并网的实际问题。

目前，国内关于可再生能源并网的相关知识与背景缺乏系统的介绍，由 Lawrence E. Jones 博士所编著的这本《Renewable Energy Intergration: Practical Management of Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids》汇集了目前与可再生能源并网有关的各个领域的专家学者关于政策、技术、市场的最新研究成果。

本书可作为相关专业的研究人员、工程技术人员、管理人员以及研究生的参考资料。

全书的翻译工作主要由中国电力科学研究院配电研究所分布式发电和微网团队的科研人员完成，主要有盛万兴、吴鸣、刘海涛、李洋、季宇、于辉、李蕊。梁惠施、吕志鹏、孙丽敬、张海、郑楠、宋振浩、寇凌峰、徐毅虎、南加州大学杨正、华北电力大学赵小茵、东南大学顾伟、柳伟、聂颖慧辅助校对。

本书翻译过程中，团队成功申报国家重点研发计划 1.3 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及示范应用（2016YFB0900400），研究内容和成果相互验证，在此对项目的支持表示感谢！

本书的公式表达、图形及文字符号均遵照原书，未按我国标准进行修改。

由于时间和水平有限，书中难免存在错误和纰漏，恳请各位读者批评指正。

译者
2017 年 6 月

引言

不断变化的全球气候、清洁能源和水资源的获得、粮食安全和人口增长都是面对世界这个相互依存的复杂网络的挑战。首先，全球气候变化可能是人类和地球未来面临的最紧迫的威胁。如2014年气候变化报告显示：政府间气候变化专门委员会（IPCC）关于气候变化的影响、适应和脆弱性的结论，以及2014年美国国家气候评估表明，气候变化是真实的且有关影响已开始在世界不同地方发挥作用。这种人为现象所产生的明显自然和经济影响可能与每个人都相关。如果不采取积极的措施减轻不利后果并调整我们对新环境的应对措施，这些影响将会在未来的几十年里进一步加剧。

应对气候变化的一种方式是世界通过增加可再生能源的使用量向低碳能源未来转变。在世界各地，各国政府正在加强努力，促进增加对风能、太阳能和其他形式低碳能源的投资。因此，世界各地风力发电和光伏发电量正在迅速增长。可再生能源成功并网采用的私营部门投资激励政策和监管机制之间有很强的相关性。因此，企业还需要在根本上适应安德鲁·温斯顿（Andrew Winston）在他的著作《The Big Pivot》中列出的可行战略。然而，随着可再生能源渗透率的增加，大家持续关注的一个问题是如何将这些非常规的间歇性能源从容地并网，并使其最终出现在新兴电网和电力市场中。

我对可再生能源的兴趣始于孩童时期，我在赤道以北约6°的西非国家利比里亚长大。我迷上了太阳和辐射的作用。1998年，我在瑞典斯德哥尔摩瑞典皇家理工学院（KTH）攻读博士学位，在撰写博士论文的过程中，这种兴趣更多地转向了风能。2000年，我在瑞典皇家理工学院（KTH）与人合伙创办了海上风力发电厂并网和输电网风电消纳的国际研讨会（International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms）。我曾与世界各地的专家合作研究过可再生能源并网专题。2010年11月，我有幸作为首席调查员，参与美国能源部能源效率和可再生能源局出资的2010~2011年可再生能源并网全球调查。调查针对18个国家33家电力系统运营商的运营政策、最佳实践、优秀实例、经验教训和决策支持工具，研究涵盖的电网分布在不同的地区，具有不同的气候和天气模式。不论在监管电力市场还是在开放电力市场中，许多接受调查的公共事业在不同的监管框架下运行。调查结果发表在《可靠电网运营控制中心并网间歇性能源的战略和决策支持体系》一文中。

编写本书的想法始于2011年我与Elsevier出版社的一位高级策划编辑蒂芙尼·盖斯博瑞里（Tiffany Gasbarrini）的一次简短谈话。蒂芙尼曾在美国风能协会

(AWEA) 的年度会议的上述报告中听到我的研究结果。当她表示想将我的报告出版成书时,我回复这无法实现,因为与美国能源部(DOE)的合同条款规定我不能这样做。基于对全球可再生能源并网的巨大兴趣,她问我是否愿意考虑为这个主题写一本全新的书。起初我拒绝了。然而,她很坚持并在一年多的时间内多次提出请求。最后,在获得我家人的同意后(尽管他们知道这需要占用周末时间),我同意担任主编,从而开始为编写现在这本开创性著作的旅程做准备。在编写本书的过程中,最宝贵的经验之一就是与来自世界各地的 59 位知名专家合作并共同创作。

在过去的十年中,众多研究结果表明,可再生能源并网是一个跨学科问题。因此,从一开始就很明确,本书的出版是为帮助促进在世界范围内供应更多可再生能源电能目标的实现,因此它必须涵盖一系列广泛的主题,并包括从世界各地邀稿作者的对各种电力系统的宝贵经验与大量工作中精心挑选而出的材料。

可再生能源并网没有放之四海而皆准的解决方案,可以适用于所有的电力系统。本书是一次独特的尝试,对可再生能源并网电力市场所需的繁杂工作进行了一次精炼研究。针对全球电力系统运营商和电力市场制定实施的最佳实践中所产生的挑战和解决方案,本书提供了国际知名骨干研究人员和从业人员的相关独特观点。本书重点关注战略的具体实践,提供了基于理论的在现实世界应用,并促进配套政策框架的制定。它综合考虑了大量风能、太阳能、波浪能和潮汐能的并网问题,从而确保可再生能源发电渗透率低或高的电网运营商在同行中达到利润均衡。

正如本书副标题所强调的,可再生能源电力并网和电力市场具有 3 个基本属性,分别是间歇性、不确定性和灵活性。同样,本书的内容还包括对所有这 3 个方面的应对方法。本书写作风格也有不同,本书通过案例研究介绍系统,并就通常相关的主题说明邀稿作者的认知如何不同。不确定性是写作过程中一直存在的,在收到邀稿作者的各个初稿之前,我完全不知道会收到什么内容。与可再生能源发电并网类似,作为主编,最初我所能做的就是基于我对作者作品和专业知识的过往了解,尽力预测我可能会收到的内容。最后,我尽力将全部 35 章整合并组织成同步连贯的思想来说明若干关键连贯的主题,剩下的便交由邀稿作者自由发挥,自然结成硕果。Elsevier 出版社也给了我很多的自由空间。

章节概述

您手上拿的(并且希望阅读的)这本书是将最初看来互相脱节的章节整合而成的一本书,由 10 个相互关联的部分组成,包括 35 个仔细斟酌的连贯章节,全都与间歇性、不确定性和灵活性的管理实践相关。

第 1 部分“政策与法规”包括 3 章,研究政策和监管问题以及可再生能源在欧盟、美国和非洲的未来前景。第 1~3 章:海伦娜·林德奎斯特(Helena Lindquist)撰写的“重塑欧洲电力格局之路——挑战与开拓者”;史蒂文·范恩(Steven Fine)和基兰·库马拉斯瓦米(Kiran Kumaraswamy)撰写的“消纳更高渗

透率的间歇性能源的政策：美国前景和展望”；以及 Ijeoma Onyeji 撰写的“非洲可再生能源的应用与并网”，回顾了不同地区可再生能源的发展。章节作者提供了消纳更高可再生能源渗透率方法的建议。

现在，在欧盟和美国的部分地区，可再生能源发电量的占比已达两位数。本书前两章的内容可以鼓励读者对于一些特定的政策以刺激制度加深理解。这些政策不仅催化鼓励了私营成分的投资进驻，而且在这些政策的管辖及实施范围内，减少甚至打通了运行电力与间歇性发电的壁垒。

拥有巨大的可再生能源储量且大部分未得到开发的非洲，开始对使用太阳能、地热能、风能和其他可再生能源形式来解决电力供应匮乏这一棘手问题有更大的兴趣。Onyeji 对大陆可再生能源的前景、潜在挑战和开发清洁能源的机遇进行了深入讨论。无论是并网还是离网系统，适当的长期政策、充足的基础设施投资和人力资源对非洲国家利用可再生能源至关重要。

第2部分“间歇性能源的建模”讨论了在电力系统中，并网可再生能源发电重要的第一步。可再生能源建模必须说明在新的空间和时间维度中出现的行为。建模还必须考虑资源可用性、经济可行性和其他电网相关问题。

在第4章“含间歇性能源的电力系统多维度、多规模建模和算法：挑战和机遇”中，圣地亚哥·格里哈尔瓦（Santiago Grijalva）审查了相关的空间、时间和场景维度。他讨论了多维度、多规模分析的3个关键领域的先进技术：建模和分析、优化和控制以及数据管理和可视化。对可再生能源渗透率高的电网的设计、调度、运行和管理拟定并网多维度、多维度框架。

在第5章“北欧电力市场风电并网的经验”的案例中，安德斯·普雷德普·霍姆勒（Anders Plejdrup Houmøller）介绍了北欧地区并网可再生能源的经验。丹麦、芬兰、挪威和瑞典这4个国家有4个独立但完全联网的电力系统和一个共同电力市场。丹麦拥有大量风力发电能源，因此本章主要关注丹麦。因为丹麦想在2050年实现100%无碳能源的目标，因此预计丹麦在未来十年的风能增长势头不会衰减。

第6章“案例研究——可再生能源并网：灵活性需求、潜在的过量发电和频率响应挑战”中，马克·罗斯莱德（Mark Rothleder）和克莱德·卢唐（Clyde Loutan）提供了对加州独立系统运营商（ISO）的分析概述，以便更好地理解能源整合相关的挑战。进行此类研究的基础取决于是否正确地建立可再生资源模型。研究建议包括发电机组需要灵活的组件；负荷转移和储能技术很有必要，以便减轻潜在过量发电条件；惯性响应是异步电源维护电网可靠性的特性。

第3部分“电力系统和市场运作中的间歇性能源”研究了间歇性发电对电力系统和市场的影响。电力系统和电力市场的运行总发电量和负荷必须瞬时连续平衡，才可使电力市场和电力系统可靠运行。间歇性能源（VER）并网越来越多地为电力系统和市场运作带来了新的挑战。

在第7章“间歇性能源对电力系统备用所产生影响的分析”中，布伦丹·柯

比 (Brendan Kirby)、埃里克·埃拉 (Erik Ela) 和迈克尔·米利根 (Michael Milligan) 讨论了不同的备用类型和需求, 并讨论了如何确定影响。此外, 对确定所需额外备用的任务进行了深入说明。作者明确说明, 任务由于备用的非线性特性和数据与经验的缺乏而变得更为复杂。

在第8章“间歇性能源并网的市場管理解决方案进展”中, Xing Wang 提供了电力批发市场和市場管理系统的概况。管理 VER (间歇性能源) 并网带来的运行不确定性, 及相关的市場设计和市場分析工具均有改进。本章重点关注市場改进的两个此类领域。首先, 它探讨了建立实时爬坡服务市場的可行性, 此类市場的平衡运行作为资源建立了正确的市場激励机制, 以提供足够的爬坡能量来补充 VER (间歇性能源) 间歇性产生的不足。其次, 它研究了如何使用超前机组组合的稳健优化功能来管理短期 VER (间歇性能源) 的不确定性。

第9章“得克萨斯州电力可靠性委员会案例研究: 在电力市場中并网可再生能源发电的备用管理”中, 约翰·杜马斯 (John Dumas) 和大卫·马吉奥 (David Maggio) 介绍了得克萨斯州电力可靠性委员会 (ERCOT) 的一个案例研究。作为一家独立的系统运营商, ERCOT 负责确保电力供需的平衡。在过去几年中, 这一功能已因可再生能源 (特别是风能) 装置增加所带来的额外不确定性和间歇性变得更为复杂。本章讨论了许多 ERCOT 及其市場参与者为解决和减少这些问题而采取的行动。特别重点放在 ERCOT 风电的发展上, 包括风电输出爬坡事件概率预测工具的使用和确定维持系统可靠性要求所需辅助服务最低水平的方法。

在第10章“案例研究: 印度泰米尔纳德邦的风电并网与电力市場”中, 阿尼什·德 (Anish De) 和普尼特·其卡拉 (Puneet Chitkara) 讨论了泰米尔纳德邦风电场案例研究的结果, 来确定该邦中的间歇性可再生能源 (VRE) 管理微观实践。在过去的几年中, 印度的可再生能源规模快速增长。与其他印度各邦相比, 泰米尔纳德邦在运行 VRE 电力系统方面拥有相当丰富的经验。这项研究分析了风电并网的邦内影响, 并探讨了商业机制, 如旨在鼓励使用可再生能源并网的电价补贴和其他监管和政策措施。

第4部分“可再生能源预测”介绍了通过预测间歇性电源输出来管理不确定性, 对更多风能、太阳能和其他形式间歇性能源发电的电力系统运行中的作用进行了预测。本部分讨论了最先进的预测技术和尖端预测科学以及将预测信息整合至电力公司控制中心中的方法。

在第11章“电网中的可再生能源预测”中, 奥顿·巴特路德 (Audun Botterud) 讨论了系统运营商、可再生能源电力发电商和其他电力市場参与者对可再生能源预测的潜在应用, 然后对风力发电和光伏发电预测方法进行了简要概述。作者认为, 对预测不确定性的准确估计具有重大意义, 有助于更好地在电网运营中处理可再生能源。结论着重指出, 改善预测系统及相应决策支持工具是解决方案的关键, 可以创建一个清洁、可靠、经济高效和由可再生资源供电的未来电网。

在第12章“风力发电和光伏发电概率预测”中，卢卡·德尔·莫纳奇（Luca Delle Monache）和斯特凡诺·亚历山德里尼（Stefano Alessandrini）回顾了支持风力发电和光伏发电的概率电力预测的几种尖端科学技术，并展示了验证和评估此类预测的方法。确定性预测能为传统运行模式中的决策制定提供有用的信息。然而，在用于应对运行不确定性增加的新电网制度下，确定性方法有基本的评估约束。举例来说，预测只代表从因初始条件不完善和模型缺陷而引起的连续可能状态中选择出的一种可能未来状态。对这一连续体的精确认知对决策制定更加有用。

在第13章“在电力公司控制中心纳入预测的不确定性”中，尤里 V. 马卡罗夫（Yuri V. Makarov）、帕维尔 V. 艾廷歌夫（Pavel V. Etingov）和 J. 马（J. Ma）研究了不同的不确定性和间歇性来源，阐明了整体系统不确定性模型，并提出了可能的计划，以便在规划和运行中将确定性方法转变为概率方法。间歇性发电输出和系统负荷的预测过程中出现的不确定性没有充分反映在用于输电系统管理、发电组合、调度和市场运作的现有工业级工具中。电网运营中使用基于不确定性的工具现在已有实例。

第5部分“可再生能源并网”介绍了电网物理连接可再生能源发电厂相关的突出问题。

在第14章“利用全球电网管理可再生能源”中，Spyros Chatzivasileiadis、达米安·恩斯特（Damien Ernst）和戈兰·安德森（Göran Andersson）介绍了全球电网的概念，即所有的区域电力系统向一个横跨全球的电力输电系统供电。全球电网将作为主干网，帮助将“绿色”电力传输给负荷中心。本章阐述了可能会逐渐引起全球互联电网发展的4个阶段。可在所有阶段应用定量分析，这表明全球电网在技术上可行且具有经济竞争力。欧洲和美国的实际价格数据用于确定洲际电力贸易的潜力，表明此类互联可以产生可观的利润。

第15章“电网间歇性和分布式资源的管理实践”由卡尔·巴克（Carl Barker）撰写，讨论了使用高压直流（HVDC）技术来传输电力。巴克回顾了最新的 HVDC 技术，也称为电压源换流器（VSC）。在2000年引入的电压源换流器（VSC）技术进一步提高了直流输电的灵活性，因此直流输电网在陆地和海上均具有发展前景。未来，这些直流输电网可以代替交流输电或者直接作为主干网来增强现有的交流电网。这个新的基础设施可能对未来的电力系统至关重要，有助于适应可再生能源使用量的增加趋势，如第14章中讨论的全球电网。

在第16章“可再生能源并网——印度管理实践”中，苏希尔·库马尔·苏尼（Sushil Kumar Soonee）和维诺德·库马尔·阿格拉瓦尔（Vinod Kumar Agrawal）给出了一些案例研究。对于印度从政策监管、实施到电网互联，可再生能源并网都是一个重点领域。本章探讨了印度政策和监管措施、输电规划以及电力系统运营商对印度可再生能源并网的看法。本章还讨论了印度的可再生能源证书（REC）机制的相关经验。

第6部分“系统灵活性”阐述了电网在消纳负荷、应对发电间歇性和不确定性及在不同的时间维度中维持给定可接受性能水平的能力的相关问题。间歇性发电渗透率的增加会增加净负荷的间歇性，从而增加在电网中提供额外灵活性的需求。电网运营商需要灵活性资源的组合，包括供给方、输出方和需求方。灵活的需求确定之后，如何建模并确定在特定水平下间歇性发电容量所需的系统灵活性水平，将成为大量研究和讨论的主题。

在第17章“长期能源系统规划：解释短期间歇性和灵活性”中，曼努埃尔·韦尔施（Manuel Welsch）、迪米特里斯·万迪斯（Dimitris Mentis）和马克·豪厄尔斯（Mark Howells）介绍了通过供求双方运用备用和储能方案为电力系统提供灵活性的方法。他们回顾了若干种建模方法，并提出长期模型在时间分辨力和确保电力系统可靠性的度量标准方面的局限性。作者还仔细考虑了选定的建模方法，解决了评估运行问题所需的短时间维度，并根据这些模型计算得出与投资决定的长期规划愿景之间的差距。

在第18章“电力系统灵活性”中，安德烈亚斯·乌尔宾（Andreas Ulbig）和戈兰·安德森（Göran Andersson）分析了电力系统中运行灵活性的作用及其应用对电网中并网高渗透率可再生能源产生的价值。本章介绍了一种技术上可行且用于评估运行灵活性的新方法和实例。一个重要的研究课题是如何量化特定电力系统的灵活性。作者确定了电力系统运行灵活性所必要的度量标准，即功率爬坡率、发电机的供电能力和耗能能力以及负荷和储能设备。

在第19章“丹麦案例：充分利用含高渗透率风电的能源系统灵活性能源优势”中，淑娜·斯特罗姆（Sune Strøm）和安德斯N. 安德森（Anders N. Andersen）解释了风力机和分布式热电联产（CHP）电厂为何能够有效平衡电力系统。世界上其他电网有不同组合的负荷、发电机和互联的电力系统，这个丹麦案例研究挑战了间歇性发电影响电网运营的传统思维。在适当条件下，风力发电可以促进电力系统的运行灵活性。

第7部分“需求侧响应和分布式能源”探讨了需求侧响应（DR）和分布式能源（DER）的应用，以帮助电网消纳高渗透率可再生能源。

在第20章“间歇性可再生能源并网后的需求侧响应（DR）：西北部视角”中，黛安·布罗德（Diane Broad）和肯·杰贡（Ken Dragoon）提供了对美国太平洋西北地区中需求侧响应的一项研究。此区域有大量的水力能源，正在经历间歇性可再生能源发电快速增长，类似情况也在世界的许多其他地区出现。目前灵活性已逼近极限，该地区已采取一系列需求侧响应试验项目，来展示负荷上升和下降的能力，以帮助消纳新的可再生能源。尽管试验项目成功展示了需求如何以低成本的方式实现可再生能源并网，但若想实现广泛的商业应用，还需要进一步的市场开发 and 政策制定。

在第21章“案例分析：电力市场中的需求侧响应和替代技术”中，安德鲁·

奥特 (Andrew Ott) 讨论了 PJM 互联电网公司 (PJM) 的电力批发市场如何发展, 以促进现有发电资源、新发电资源、需求侧响应和替代技术之间的公开竞争, 以便提供服务来支持可靠的电网运营。PJM 适应了市场规则和程序以消纳小容量替代性资源, 同时维持并提高电网运营的严格可靠性标准。但供电组合的运行往往并没有那么灵活, 伴随着智能电网技术的开发、储能技术取得的突破、微电网应用、分布式发电资源和智能计量基础设施的建设都有可能使电力传输、配送和消费比之前更加灵活。远期容量市场和电网服务市场中的竞争性市场信号已经吸引了对需求侧响应和替代技术的大量投资, 从而为电网运营商提供了可靠性服务。本章讨论了发展趋势和市场机制, 通过这些机制系统, 市场运营商能够管理和利用这种改变来维持大容量电力系统的可靠性。

在第 22 章“分布式能源对传统电力公司商业模式的启示”中, 菲雷顿 P. 萧山西 (Fereidoon P. Sioshansi) 探讨了屋顶太阳能光伏发电、热电联产 (CHP)、燃料电池以及它们的组合对分布式自发电的影响的增加。他还考察了提高能源效率和投资需求的影响, 如清洁能源 (ZNE) 对公共事业的经营模式的影响。

在第 23 章“储能和电网灵活性需求”中, 大卫·莫勒 (David Mohler) 和丹尼尔·桑德 (Daniel Sowder) 就储能帮助配电网实现可再生能源并网的方式提供了案例分析。随着相关技术变得更具成本竞争力, 储能在发电和能源消耗未同时发生时, 被认为是能够变革整个电力行业的一种资源配置方式。换句话说, 即使是在发电和能源消耗未同时发生时, 储能设备也能够帮助供需达到平衡。作者研究了跨时间灵活移动能源的能力, 并将其作为一种工具, 应用于电网许多不同的实践案例中, 并列出了几个说明示例。

第 8 部分“孤岛电力系统中的间歇性能源”探讨了并网孤岛电力系统中间歇性可再生能源的相关问题和解决方案。大部分孤岛电力系统均已有高度发展的可再生能源, 但由于地理位置偏远, 这些系统通常与其他系统无法互联。因此当处理可再生资源的间歇性时, 它们呈现出一系列独特的挑战。

在第 24 章“孤岛可再生能源并网”中, 美喜·布鲁斯·土田 (Toshiki Bruce Tsuchida) 总结了具有可再生能源并网倾向的岛屿发展进程与遇到的问题, 这些岛屿已规划并实施并网达到 30% 以上的渗透率的可再生能源, 而这一渗透率高于世界上任何互联系统。从长远规划到短期运行所面临的挑战, 都需要孤岛系统运营商融合现有技术并进一步探索创新技术方案。在解决可再生能源并网时, 这些孤岛系统所面临的挑战融合了被认为是互联电网议题中的单独议题, 从智能电网和分布式发电到气候政策、系统弹性和储能技术。这是历史第一次, 孤岛系统作为创新技术的试验台, 并可能引领大规模互联系统的未来。

在第 25 章“通过微型水力发电在配电网运营中实现计划性孤岛”中, 格劳克·纳里·塔兰托 (Glaucio Nery Taranto) 和塔蒂亚娜 M. L. 阿西斯 (Tatiana M. L. Assis) 介绍了巴西“通过微型水力发电在配电网运营中实现计划性孤岛”的案例。

丰富的大流域资源使得巴西成为世界水电中心。根据官方数据统计,巴西水力发电的装机容量为巴西年度电能需求的 70% 以上,在雨水丰富的年份中,装机容量可以占到 90% 以上。巴西的南部地区高度工业化,工业运行主要以水电为主,但目前正面临着水电装机容量衰竭的问题,并正在通过利用小水电站探索其他可再生能源。由于巴西大部分地区都是丘陵地形,且在巴西政府的激励措施下,许多装机容量几兆瓦的小水电站用于为农村地区的小城镇供电,而这在本质上就是孤岛电力系统。本章重点介绍了一个现实中某小水电站的研究案例,该小水电站位于巴西里约热内卢州东南部区域,并连接至一个 25 kV 的农村配电线路中。

第 9 部分“太阳能、潮汐能和波浪能并网”章节探讨了新兴低碳技术的并网。目前,风力发电和光伏发电占据间歇性可再生能源的大部分,技术进步也促进大规模的太阳能、波浪能和潮汐能电厂的并网,并在大规模电力系统中大规模调度太阳能光伏发电。

在第 26 章“大规模光伏电站的经济利益和可靠性效益”中,乌迪·赫尔曼(Udi Helman)研究了公用设施和区域能源规划者所使用的经济价值评估方法,以确定增加可再生能源的净成本。净成本方程等于可再生能源发电厂的承包费或能源的估算平准化成本+其传输成本+并网成本-其能源效益-辅助服务效益-容量效益。赫尔曼(Helman)综述了大量太阳能资源净成本方程组成的研究文献,这些组成部分既与单个项目水平相关,也与扩展可再生能源投资组合相关;还讨论了运行限制和储能的使用,以应对光伏电站的不断增长。

在第 27 章“波浪能和潮汐能并网的最先进技术水平和未来展望”中,蒂莫西 R. 莫顿(Timothy R. Mundon)和亚雷特·戈德史密斯(Jarett Goldsmith)分别讨论了波浪能和潮汐能的以下几个方面,包括每种资源的主要特征以及发电所涉及的基本原则。他们强调了资源的间歇性,并解释了我们如何使用现代化工具来预测电力和能源输出,从而在电网中成功实现这些资源的并网。

在第 28 章“德国在新世纪的可再生能源之路”中,马蒂亚斯·穆勒·米恩纳克(Matthias Müller-Mienack)展示了一个德国案例研究,重点关注了并网可再生能源所面临的挑战和德国输电系统运营商(TSO)正在探索的解决方案。本章讨论了 50.2 Hz 频率所带来的问题及其对电网运营所带来的潜在风险以及新光伏设备的设计标准。

最后,第 10 部分“可再生能源并网实践和突破性技术”展示了新的方法和说明实例,介绍了用于间歇性可再生能源并网的控制系统、测量和传感设备、可视化的工具、决策支持系统原理、数据挖掘和分析工具以及高性能计算的应用进展。

在第 29 章“含高渗透率间歇性发电的电力系统控制”中,克里斯托弗 L. 迪马科(Christopher L. DeMarco)和切塔尼亚 A. 布恩(Chaitanya A. Baone)仔细审视了风力发电和光伏发电对现有的一级和二级电力系统运行控制实践理念产生的挑战。作者仔细审视了可再生能源输电技术与传统能源截然不同的控制特点所带来的影响。如果可再生能源发电渗透率的增加能以互补的方式为电网带来新型控制应用

器，那么相量测量装置（PMU）增加的渗透率则会带来新型传感器技术。本章以不同的方式探讨了可再生能源的控制设计，以求回答两个突出问题：①在更多可再生能源并网的前提下，实现电网稳定和安全运行所必需的一级控制的目标；②可再生能源和储能可以提供怎样的控制措施保证在运行限制范围内实现这些目标？

在第30章“增强电力系统中的态势感知：克服可再生能源的不确定性和间歇性”中，米卡 R. 恩兹利（Mica R. Endsley）和埃里克 S. 康纳斯（Erik S. Conners）提到了为确保目前高度互联的电力系统运行的可靠性和持续性，高水平态势感知（SA）的需求正在不断增加。随着行业向更多可再生能源的并网和节能型智能电网的变革，解决间歇性发电对输配电控制中心内的运营商的态势感知（SA）所带来的复杂性和挑战正变得越来越重要。本章讨论了如何以态势感知（SA）为导向的设计克服可再生能源的不确定性和间歇性，以确保系统运营商都能通过有效和并网综合方式获得正确的信息，从而使得他们能够发展正确的思维模型，来充分认识复杂并正发生巨变的系统的状态，预测未来变化并及时做出响应。

在第31章“通过改进的可再生能源控制中心可视化工具来管理运行中出现的不确定性”中，理查德·肯迪（Richard Candy）展示了一个南非案例研究。在电力系统中安装可再生能源就等于是将很多大石头扔到一个安静的池塘中。其后果与波浪和浪涌类似，会破坏系统的和谐。为了估计可再生能源供应商的干扰性和不可预测性，需要使用其他工具，既能实现可视化并能够管理不确定性，还能减弱其对控制人员的影响。传统 SCADA 系统和报警系统根本无法处理这种情况。本章介绍了在控制中心设计和应用可视化工具的一种截然不同的方法，这种方法是将引起可再生能源和 SCADA 系统中不确定性的环境因素组合在一个通用平台上，以便向控制人员提供对这些干扰物的预测能力和全面态势感知能力。

在第32章“动态增容（DLR）：以安全、快捷、经济的方式将电力网络转换为可再生能源电力”中，彼得·谢尔（Peter Schell）介绍了动态增容（DLR）在可再生能源并网更便捷和更安全并网方面发挥的作用。他解释了 DLR 如何配合高渗透率可再生能源实现未来大规模电网的规划和运行。架空线路的载流量取决于环境条件，线路的温度越低，在超过安全运行限值的情况下可承载的电流越多。在当今的电力系统中，间歇性以及灵活性需求越来越大，可以善加利用这一取决于天气的变量，即动态容量。但 DLR 并不像看起来那么简单。本章最后综述了 DLR 实施的关键挑战和可能的解决方案。

在第33章“使用同步相量测量监测和控制可再生能源”中，路易吉·凡弗莱堤（Luigi Vanfretti）、马克西姆·鲍德特（Maxime Baudette）和奥斯汀·怀特（Austin White）概述了同步相量技术应用于开发实时 PMU 应用程序，这一应用程序可以帮助监测和控制因可再生能源与电网相互作用而产生的异常动态。本章介绍了基于 PMU 的监测和控制系统的不同案例，并讨论了开发 PMU 应用程序的软件环境，并通过使用历史数据和实验室实验来测试和验证的方法来探测次同步风电场振荡，开发实时监控工具。本章最后简述了新 PMU 应用程序的开发，这些应用程序

可以帮助监测和控制可再生能源及其与电网的相互作用。

在第34章“每时每刻都很重要：波动资源配电网的同步相量测量”中，亚历山大·冯·迈耶（Alexandra von Meier）和瑞扎·艾甘德（Reza Arghandeh）说明了直接测量电压相位角是如何使用不同有效分量（active components）来管理配电网的，例如风能和光伏发电厂。从历史上看，配电系统并不需要精细的监测机制。使用径向拓扑和单向电力潮流后，便只需要评估设计条件的包络线。但是分布式能源的增加，例如可再生能源发电、电动汽车和需求侧响应计划，产生了更多短期和不可预测的波动和干扰，并使得双向电力潮流的可能性增加。这表明，考虑到管理增强的间歇性和不确定性的挑战，需要更精细的测量并在更加灵活的电网中使用多样化能源服务。具体来说，冯·梅尔（Von Meier）和艾甘德（Arghandeh）讨论了高精度同步相量测量装置或微同步相量测量装置（ μ PMU）。这些装置为配电需求量身打造，支持从解决已知问题到揭露尚未探索的可能性一系列诊断和控制应用。

最后，在第35章“大数据、数据挖掘、预测分析和高性能计算”中，菲利普·麦克（Phillippe Mack）探讨了我們如何获取并利用电力系统运行中的海量数据的价值，以便更好地实现大量间歇性可再生能源的并网。在简要介绍了“大数据”的发展历史后，他概述了电网运营数据的来源。然后讨论了各种数据挖掘技术和用于预测分析及高性能计算的工具有。本章还给出了电力系统和可再生能源并网预测分析的应用案例。

在本书的结尾，J. 查尔斯·史密斯（J. Charles Smith）提供了电网和电力市场中间歇性能源并网的未来前景。尽管没有人喜欢做预测，但史密斯却基于社会对脱碳能源未来的需求日益增加对近期趋势做出了大胆但合理的预测。此外，技术进步和不断降低的成本使得风能、太阳能和新兴的低碳能源技术有条件为世界上无止境的能源需求提供大部分电力。史密斯强调，我们不必等到所有可再生能源并网的挑战都得到解决。相反，我们必须继续沿着这条道路前行，以便利用我们知道的一切来应对未来的挑战。史密斯用歌手/词曲作者鲍勃·迪伦（Bob Dylan）的歌词“我的朋友，答案在风中飘荡”来做总结，但他随后补充说：“回头，太阳已升起！”

谁应该阅读本书

本书的目标受众包括输配电网运营商和规划者；电力、机械、电力、控制、可持续性和系统工程师；能源经济学家；政府监管部门和电力公司领导者；可再生能源技术和项目的研究人员；学生；投资者以及开发商。

如何阅读本书

本书涉及了大量可再生能源并网的理论和实践内容。它的作用更多的是作为一本参考书而不是标准教科书。因此，根据感兴趣的特定领域，鼓励读者跳读至相关章节。每章均包含相关的参考文献，可为有兴趣的读者提供更详细的信息。

关于本书的问题和反馈，您可以发送电子邮件到 editor@renewenintegrate.com。

目 录

译者序

引言

第1部分 政策与法规

第1章 重塑欧洲电力格局之路——挑战与开拓者	3
1.1 背景	3
1.2 2020 年后的欧洲	3
1.3 欧洲可再生能源并网：挑战和政策响应	4
1.3.1 区域制约	4
1.3.2 市场设计	7
1.4 3 位开拓者的故事：历史和未来	8
1.4.1 丹麦	8
1.4.2 德国	9
1.4.3 英国	9
1.5 趋势和未来展望	10
参考文献	11
第2章 消纳更高渗透率的间歇性能源的政策：美国前景和展望	12
2.1 可再生能源部署趋势	12
2.1.1 联邦政策对增长的影响：可再生能源发电 PTC	12
2.1.2 州政策对增长的影响：RPS	14
2.2 风力发电为电力系统运营和规划带来的技术挑战	14
2.3 高渗透率风能的相关经济挑战：削减成本的潜力	16
2.3.1 风能削减的后果	16
2.4 风电并网的输电规划：挑战和成功案例	17
2.4.1 政策制定可能会推动输电系统的开发，以消纳可再生能源发电	18
2.5 间歇性能源并网的联邦能源监管委员会 764 号令	22
2.6 美国可再生能源开发的未来	22
第3章 非洲可再生能源的应用与并网	23
3.1 引言	23
3.2 背景和内容	23
3.2.1 非洲的能源挑战	23
3.2.2 自然资源的可用性	24
3.3 撒哈拉以南非洲地区在全球能源转型中的地位	26
3.3.1 不断降低的技术成本	26
3.3.2 合适的选择	26

3.4 发展方向	27
3.4.1 融资	27
3.4.2 区域合作：电力市场、电网互联和电网基础设施	28
3.4.3 可再生能源扶持政策	29
3.4.4 创新商业模式	31
3.5 结论	31
参考文献	32

第2部分 间歇性能源的建模

第4章 含间歇性能源的电力系统多维度、多规模建模和算法：挑战和机遇	37
4.1 电力系统维度及规模	37
4.1.1 空间维度	37
4.1.2 时间维度	38
4.1.3 场景维度	39
4.1.4 电力系统规模	40
4.2 建模和分析	40
4.2.1 多规模和规模不变性	40
4.2.2 多规模框架	41
4.2.3 推理和系统识别	41
4.3 优化和控制	41
4.4 数据处理和可视化	43
4.4.1 多规模数据	43
4.4.2 可视化	43
4.5 并网的多维度分析平台	44
4.6 结论	45
参考文献	46
第5章 北欧电力市场风电并网的经验	48
5.1 引言	48
5.2 输电系统运营商	49
5.3 波罗的海和北欧现货市场	49
5.4 价格区间	50
5.5 日前电网阻塞管理：市场分割	51
5.5.1 日前阻塞管理：市场联合	51
5.5.2 市场联合或市场分割时电价的计算	52
5.5.3 丹麦电力市场的风电并网	53
5.6 维持供应安全：能源调节	53
5.6.1 维持供应安全：调节能力	53
5.6.2 实例：TSO 带来的 20 MW 上调能力	54
5.6.3 调节能力：丹麦经验	54
5.7 利用风力发电调节能源和供应的安全性	54
5.7.1 实例：提供下调功能的风力发电	55