

低碳智库译丛



“十三五”国家重点图书出版规划项目



THE POWER OF TRANSFORMATION

Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems

International Energy Agency

电力转型

风能、太阳能和灵活电力系统的经济性

国际能源署 著

王帅 译

张有生 审校

FE 东北财经大学出版社
Dongbei University of Finance & Economics Press

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位



“十三五”国家重点图书出版规划项目



THE POWER OF TRANSFORMATION
Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems

International Energy Agency

电力转型
藏书章

风能、太阳能和灵活电力系统的经济性

国际能源署 著

FE 东北财经大学出版社
Donghai University of Finance & Economics Press

大连

辽宁省版权局著作权合同登记号：06-2016-262

Copyright© 2014 OECD/IEA, 9 rue de la Federation, 75739 Paris Cedex 15, France

No reproduction, translation or other use of this publication, or any portion thereof, may be made without prior written permission. Applications should be sent to: rights@iea.org.

Chinese translation of the text of "The Power of Transformation" © OECD/IEA, 2014.

The Chinese translation of the "The Power of Transformation" has been translated from its English text which is the official version of this publication. While the IEA is the author of the original English version of this publication, the IEA takes no responsibility for the accuracy or completeness of this translation. This publication has been translated under the sole responsibility of Dongbei University of Finance and Economics Press.

图书在版编目 (CIP) 数据

电力转型：风能、太阳能和灵活电力系统的经济性 / 国际能源署著；王帅译. —大连：东北财经大学出版社，2018.1

(低碳智库译丛)

ISBN 978-7-5654-3040-4

I. 电… II. ①国… ②王… III. 再生能源—研究 IV. TK01

中国版本图书馆CIP数据核字 (2018) 第000124号

东北财经大学出版社出版发行

大连市黑石礁尖山街217号 邮政编码 116025

网 址: <http://www.dufep.cn>

读者信箱: dufep@dufe.edu.cn

大连永盛印业有限公司印刷

幅面尺寸: 170mm×240mm 字数: 286千字 印张: 20.75

2018年1月第1版

2018年1月第1次印刷

责任编辑: 李 季 刘东威 孟 鑫 责任校对: 清 灵

封面设计: 冀贵收 版式设计: 钟福建

定价: 59.00元

教学支持 售后服务 联系电话: (0411) 84710309

版权所有 侵权必究 举报电话: (0411) 84710523

如有印装质量问题, 请联系营销部: (0411) 84710711

“低碳智库译丛”编委会

“低碳智库译丛”总序

主 任

何建坤

委 员

于宏源 王有强 史 丹 刘燕华 齐 晔 齐绍洲 齐建国

吴力波 邹 骥 张有生 张希良 张彦通 周大地 范 英

胡 敏 蒲宇飞 潘家华

气候变化是当前人类面临的重大威胁，危及地球生态安全和人类生存与发展。采取应对气候变化的智慧行动可以推动创新、促进经济增长并带来诸如可持续发展、增强能源安全、改善公共健康和提高生活质量等广泛效益，增强国家安全和国际安全。全球已开展了应对气候变化的合作进程，并确立了未来控制地表温升不超过 2°C 的目标。其核心对策是控制和减少温室气体排放，其中主要是化石能源消费的 CO_2 排放。这既引起新的国际治理制度的建立和发展，也极大推动了世界范围内能源体系的革命性变革和经济社会发展方式的转变，低碳发展已成为世界潮流。

自工业革命以来，发达国家无节制地廉价消耗全球有限的化石能源等矿产资源，完成了工业化和现代化进程。在创造其当今经济社会高度发达的“工业文明”的同时，也造成世界范围内化石能源和金属矿产资源日趋紧缺，并引发了以气候变化为代表的全球生态危机，付出了严重的资源和环境代价。在全球应对气候变化减缓碳排放背景下，世界范围内正在掀起能源体系变革和转型的浪潮。当前以化石能源为支柱的传统高碳能源体系，将逐渐被以新能源和可再生能源为主体的新型低碳能源体系所取代。人类社会的经济发展不能再依赖地球有限的矿物资源，也不能再过度侵占和损害地球的环境空间，要使人类社会形态由当前不可持续的工业文明向人与自然相和谐、经济社会与资源环境相协调和可持续发展的生态文明的社会形态过渡。

应对气候变化，建设生态文明，需要发展理念和消费观念的创新：要由片面追求经济产出和生产效率为核心的工业文明发展理念转变到人与自然、经济与环境、人与社会和谐和可持续发展的生态文明的发展理念；由

过度追求物质享受的福利最大化的消费理念转变为更加注重精神文明和精神文明的健康、适度的消费理念；不再片面地追求 GDP 增长的数量、个人财富的积累和物质享受，而是全面权衡协调经济发展、社会进步和环境保护，注重经济和社会发展的质量和效益。经济发展不再盲目向自然界摄取资源、排放废物，而要寻求人与自然和谐相处的舒适的生活环境，使良好的生态环境成为最普惠的公共物品和最公平的社会福祉。高水平的生活质量需要大家共同拥有、共同体验，这将促进社会公共财富的积累和共享，促进世界各国和社会各阶层的合作与共赢。因此，传统工业文明的发展理论和评价方法学已不能适应生态文明建设的发展理念和目标，需要发展以生态文明为指导的发展理论和评价方法学。

政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告在进一步强化人为活动的温室气体排放是引起当前气候变化的主要原因这一科学结论的同时，给出全球实现控制温升不超过 2 度目标的排放路径。未来全球需要大幅度减排，各国经济社会持续发展都将面临碳排放空间不足的挑战。因此，地球环境容量空间作为紧缺公共资源的属性日趋凸现，碳排放空间将成为比劳动力和资本更为紧缺的资源和生产要素。提高有限碳排放空间利用的经济产出价值就成为突破资源环境制约、实现人与自然和谐发展的根本途径。广泛发展的碳税和碳市场机制下的“碳价”将占用环境容量的价值显性化、货币化，将占用环境空间的社会成本内部化。“碳价”信号将引导社会资金投向节能和新能源技术，促进能源体系变革和经济社会低碳转型。能源和气候经济学的发展越来越关注“碳生产率”的研究，努力提高能源消费中单位碳排放即占用单位环境容量的产出效益。到 2050 年世界 GDP 将增加到 2010 年的 3 倍左右，而碳排放则需要减少约 50%，因此碳生产率需要提高 6 倍左右，年提高率需达 4.5% 以上，远高于工业革命以来劳动生产率和资本产出率提高的速度。这需要创新的能源经济学和气候经济学理论来引导能源的革命性变革和经济发展方式的变革，从而实现低碳经济的发展路径。

经济发展、社会进步、环境保护是可持续发展的三大支柱，三者互相依存。当前应对气候变化的关键在于如何平衡促进经济社会持续发展与管

理气候风险的关系。气候变化使人类面临不可逆转的生态灾难的风险，而这种风险的概率和后果以及当前适应和减缓行动的效果都有较大的不确定性。国际社会对于减排目标的确立和国际制度的建设是在科学不确定情况下的政治决策，因此需要系统研究当前减缓气候变化成本与其长期效益之间的权衡和分析方法；研究权衡气候变化的影响和损害、适应的成本和效果、减缓的投入和发展损失之间关系的评价方法和模型手段；研究不同发展阶段国家的碳排放规律及减缓的潜力、成本与实施路径；研究全球如何公平地分配未来的碳排放空间，权衡“代际”公平和“国别”公平，从而研究和探索经济社会发展与管控气候变化风险的双赢策略。这些既是当前应对气候变化的国际和国别行动需要解决的实际问题，也是国际科学研究的重要学术前沿和方向。

当前，国际学术界出现新气候经济的研究动向，不仅关注气候变化的影响与损失、减排成本与收益等传统经济学概念，更关注控制气候风险的同时实现经济持久增长，把应对气候变化转化为新的发展机遇；在国际治理制度层面，不仅关注不同国家间责任和义务的公平分担，更关注实现世界发展机遇共享，促进各国合作共赢。理论和方法学研究在微观层面将从单纯项目技术经济评价扩展到全生命周期的资源、环境协同效益分析，在宏观战略层面将研究实现高效、安全、清洁、低碳新型能源体系变革目标下先进技术发展路线图及相应模型体系和评价方法，在国际层面将研究在“碳价”机制下扩展先进能源技术合作和技术转移的双赢机制和分析方法学。

我国自改革开放以来，经济发展取得举世瞩目的成就。但快速增长的能源消费不仅使我国当前的CO₂排放已占世界1/4以上，也是造成国内资源趋紧、环境污染严重、自然生态退化严峻形势的主要原因。因此，推动能源革命，实现低碳发展，既是我国实现经济社会与资源环境协调和可持续发展的迫切需要，也是应对全球气候变化、减缓CO₂排放的战略选择，两者目标、措施一致，具有显著的协同效应。我国统筹国内国际两个大局，积极推动生态文明建设，把实现绿色发展、循环发展、低碳发展作为基本途径。自“十一五”以来制定实施并不断强化积极的节能和CO₂减排

目标及能源结构优化目标，并以此为导向，促进经济发展方式的根本性转变。我国也需要发展面向生态文明转型的创新理论和分析方法作为指导。

先进能源的技术创新是实现绿色低碳发展的重要支撑。先进能源技术越来越成为国际技术竞争的前沿和热点领域，成为世界大国战略必争的高科技产业，也将带来新的经济增长点、新的市场和新的就业机会。低碳技术和低碳发展能力正在成为一个国家的核心竞争力。因此，我国必须实施创新驱动战略，创新发展理念、发展路径和技术路线，加大先进能源技术的研发和产业化力度，打造低碳技术和产业的核心竞争力，才能从根本上在全球低碳发展潮流中占据优势，在国际谈判中占据主动和引导地位。与之相应，我国也需要在理论和方法学研究领域走在前列，在国际上发挥积极的引领作用。

应对气候变化关乎人类社会的可持续发展，全球合作行动关乎各国的发展权益和国际义务，因此相关理论、模型体系和方法学的研究非常活跃，成为相关学科的前沿和热点。由于各国研究机构背景不同，思想观念和价值取向不同，尽管所采用的方法学和分析模型大体类似，但各自对不同类型国家发展现状和规律的理解、把握和判断的差异，以及各自模型运转机理、参数选择、政策设计等主观因素的差异，特别是对责任和义务分担的“公平性”的理念和度量准则的差异，往往会使研究结果、结论和政策建议产生较大差别。当前在以发达国家研究机构为主导的研究结果和结论中，往往忽略发展中国家的发展需求，高估了发展中国家减排潜力而低估了其减排障碍和成本，从而过多地向发展中国家转移减排责任和义务。世界各国因国情不同、发展阶段不同，可持续发展优先领域和主要矛盾不同，因此各国向低碳转型的方式和路径也不同。各国在全球应对气候变化目标下实现包容式发展，都需要发展和采用各具特色的分析工具和评价方法学，进行战略研究、政策设计和效果评估，为决策和实施提供科学支撑。因此，我国也必须自主研发相应的理论框架、模型体系和分析方法学，在国际学术前沿占据一席之地，争取发挥引领作用，并以创新的理论和方法学，指导我国向绿色低碳发展转型，实现应对全球气候变化与自身可持续发展的双赢。

本译丛力图选择翻译国外最新最有代表性的学术论著，便于我国相关科技工作者和管理干部掌握国际学术动向，启发思路，开拓视野，以期对我国应对全球气候变化和国内低碳发展转型的理论研究、政策设计和战略部署有参考和借鉴作用。

何建坤

2015年4月25日

前言

可再生能源，尤其是风能和太阳能，对于实现能源供应的多元化和低碳化发挥着日益重要的作用。因此，国际能源署（International Energy Agency, IEA）所有的情景都有一个共同特征，即风能和太阳能光伏发电量在未来数十年将继续显著上升。然而，波动性可再生能源（variable renewable energy, VRE）的并网仍是政策制定者和行业面临的最紧迫挑战之一。波动性可再生能源技术能否成为安全低碳的能源系统的核心支柱？若能，成本有多高？

本书全面解答了这些问题，肯定了波动性可再生能源可发挥的核心作用，同时解释了成本如何因情况而异。这是一项开创性研究，涉及范围广，我在此仅强调两个方面：

第一，这项分析呼吁转变观念。经典观点将波动性可再生能源的并网视为将波动性可再生能源附加到现有系统中，其假设是系统其他部分不去调整适应。这种“传统”观点有可能使我们没有抓住要点。波动性可再生能源并网的挑战和机遇不仅在于波动性可再生能源技术本身，也在于系统的其他组成部分。因此，需要用全系统的方法看待并网问题。简言之，波动性可再生能源并网并不是仅仅将波动性可再生能源接入现有系统，而是要转变整个系统。

本书强调了有哪些选项可实现这一转型。使用全系统方法，与完全不含波动性可再生能源的系统相比，波动性可再生能源占比达45%的电力系统在长期并不会带来更多的额外成本。

第二，实现这一转型将是困难的，仅是因为将会产生赢家和输家。然而，这在很大程度上取决于具体环境。在用电需求不断增加的“动态”电力系统中（如在中国、印度和巴西），风能和太阳能光伏可成为具有成本

效益的满足增量需求的解决方案。它们提供了极好的机会。若妥善投资，可在部署波动性可再生能源的同时，从一开始就构建一个灵活的系统。这与“稳定”电力系统中的情况截然不同，稳定电力系统的特征是电力需求停滞不增，正如目前很多欧洲国家中出现的情况那样。在许多这样的地方，波动性可再生能源快速部署的成本问题已跃升为首要的政治议题。

在一个稳定的系统中，市场不会扩大。由于总量这张“饼”不再增长，额外的可再生能源就要从现有装机容量中分得一部分。结果取决于基本的经济性，因此市场效应并不仅仅是波动性的结果。在这些市场中，系统转型的成本不只与新资产的费用相关。本书显示这些成本是可管理的。但更大的挑战也许在于管控缩减旧系统规模的相关成本。这就提出了棘手的政策问题：现有生产商需采取何种策略以适应这一转型？当基础设施在达到寿命周期之前就需要拆除时，政府将如何处理分配效应？谁为搁浅资产买单？

只有政策制定者和行业通力合作，才可能应对这些挑战。但我们不能忽视气候问题的紧迫性。若想以合理的成本实现使全球平均温升不超过2℃的长期目标，我们不能再推迟采取进一步行动。

本书是在我担任国际能源署执行干事期间完成的。

玛丽亚·范德胡芬

致 谢

本书是国际能源署波动性可再生能源并网第三阶段（GIVAR III）项目的主要成果。该项目由国际能源署可再生能源部西蒙·穆勒负责。他也是本书的主要作者。波动性可再生能源并网第三阶段项目由团队合作完成：Fernando de Sisternes 开发并实施了 IMRES 电力系统模型。Edoardo Patriarca 和 Alvaro Portellano 协调对灵活资源的分析和经济建模。Anna Göritz、Jakob Daniel Møller 和 Jakob Peter 进行了 FAST2 分析并为灵活资源的分析做出了贡献。Hannele Holttinen 在电力系统建模和电力系统运行方面为项目提供了建议。Pöyry 管理咨询（英国）有限公司贡献了西北欧案例研究的模型。新资源伙伴对批发市场设计进行了回顾。

国际能源署非常感谢项目顾问小组成员提供的指导和支持，尤其是 Enel Green Power、Gestore dei Servizi Energetici、Iberdrola、挪威石油和能源部、Red Eléctrica de España、监管协助项目、爱尔兰可持续能源局、TOTAL S.A.、美国国务院和 Vattenfall，同时非常感谢日本经济产业省对本项目的资助。^①

若没有案例研究走访过程中诸多接受我们采访的合作伙伴的贡献，本项目也无法完成。我们非常感谢他们的支持，尤其是巴西矿业和能源部、日本经济产业省及挪威石油和能源部。

我们特别要感谢与风能实施协议第 25 号课题“大规模风电并网的电力系统设计及运行”的持续、富有成效的合作，尤其要感谢其成员 Hannele Holttinen、Michael Milligan、Mark O'Malley 和 J. Charles Smith。

作者也想在此特别感谢 Lion Hirth 和 Katrin Schaber 及 Aidan Tuhoy、

① 本书反映了国际能源署(IEA)秘书处的观点，但不一定反映各国际能源署成员国的观点。对于本书内容(包括其完整性或准确性)，无论是明确的还是隐含的，国际能源署不对任何使用或依据本书的行为负责。

Eamonn Lannoye、Hugo Chandler、Vera Silva、Mike Hogan、Yann Laot、Falko Ueckert、Daniel Fürstenwerth、Manoël Rekinge、Frans van Hulle、Jonathan O' Sullivan、John McCann、Miguel de la Torre、Jorge Hidalgo López，还有来自 NREL 从事市场和政策影响分析、能源预测和建模及输电和并网小组的同事，感谢他们在讨论中的深刻见解，感谢其支持和提供同行互审。

作者还想进一步感谢可再生能源部主管 Paolo Frankl 的信任和指导；感谢能源市场及安全部主管 Keisuke Sadamori 的支持和建议；感谢可再生能源部，尤其是 Adam Brown 和 Cedric Philibert 的倾听和建议；感谢气煤和电力市场部的同事，特别是 Manual Baritaud、Laszlo Varro 和 Dennis Volk 提供了建设性意见；感谢 David Elzinga 的评论；感谢 Kieran McNamara 和 Jörg Husar 的支持；感谢 Justin French-Brooks 的细心编辑；最后要感谢 Rebecca Gaghen、Michelle Adonis、Astrid Dumond、Cheryl Haines、Angela Gosmann、Bertrand Sadin 和 Muriel Custodio 将此编辑成书。

任何可能的错误和遗漏都归于国际能源署。欢迎各方提问和批评指正，请将之寄至：

Simon Müller

International Energy Agency

9, rue de la Fédération

75739 Paris Cedex 15

France

Email: simon.mueller@iea.org

目 录

执行摘要 /1

第1章 引言 /14

1.1 背景 /14

1.2 环境 /15

1.3 波动性挑战 /16

1.4 灵活性 /18

1.5 案例研究地区 /19

1.6 关于本书 /21

参考文献 /23

第2章 波动性可再生能源部署的系统影响 /24

2.1 波动性可再生能源发电机组的属性 /26

2.2 电力系统的属性 /51

2.3 并网影响和系统适应 /53

参考文献 /57

第3章 案例研究地区技术灵活性评估 /60

3.1 案例研究地区和系统属性概述 /61

3.2 波动性可再生能源当前和预测的部署水平 /64

3.3 发电水平和短期预测 /66

3.4 长期预测 /68

3.5 FAST2评估 /70

参考文献 /79

第4章 成本和效益：波动性可再生能源的价值 /80

4.1 社会视角与个人视角 /81

4.2 不仅考虑发电成本 /82

4.3 并网成本和波动性可再生能源的价值 /83

4.4 波动性可再生能源价值与发电成本的比较 /102

4.5 其他效益 /103

4.6 小结 /103

参考文献 /105

第5章 系统友好型波动性可再生能源部署 /107

5.1 部署的时间和地点 /109

5.2 波动性可再生能源的系统服务能力 /112

5.3 基础设施的规模和弃风、弃光 /114

5.4 经济设计标准 /115

5.5 技术结构 /118

5.6 政策和市场考虑 /119

参考文献 /121

第6章 波动性可再生能源并网的运行措施 /123

6.1 发电厂的运行 /125

6.2 输电和联网运行 /127

6.3 平衡区域合作和一体化 /130

6.4 运行备用的定义和部署 /132

6.5 波动性可再生能源发电的可视性和可控性 /133

6.6 波动性可再生能源发电的预测 /135

6.7 运行措施的市场设计 /136

6.8 政策和市场考虑 /145

参考文献 /147

第7章 灵活性投资选项 /149

7.1 衡量灵活性资源的成本和效益 /151

7.2 电网基础设施 /157

7.3 可调度发电 /167

7.4 储能 /184

7.5 需求侧集成 /196

参考文献 /210

第8章 系统转型和市场设计 /213

8.1 波动性可再生能源的增长和系统转变 /215

8.2 灵活性投资的战略 /220

8.3 波动性可再生能源并网和系统总成本 /231

8.4 市场设计 /233

8.5 讨论 /243

参考文献 /246

第9章 结论与建议 /249

9.1 目前的经验和技術挑战 /249

9.2 波动性可再生能源并网的经济性 /251

9.3 系统转型策略 /252

9.4 催化转型 /261

9.5 未来的工作 /262

附件 /263

附件A 均化灵活性成本方法学 /263

附件B 主要的建模假设 /270

附件C FAST2的假设和案例研究属性 /286

附件D 市场设计评分 /290

附件E 缩略词、缩写和测量单位 /302

执行摘要

风电和太阳能光伏（PV）预计将为建立更安全、可持续的能源系统做出巨大贡献。然而运用这两种技术发电受可获得的风、光资源量波动的约束，这使得要始终保持电力供应和消费的必要平衡颇具挑战。因此，将波动性可再生能源（VRE）以具有成本效益的方式并网已成为能源行业的一项紧迫挑战。

基于对当前可用于波动性可再生能源并网的灵活性选项的全面评估，本书的一项主要发现，是从长期来看可在不显著增加电力系统成本的情况下实现大规模波动性可再生能源（占比高达年发电量的45%）的并网。然而，要实现具有成本效益的并网，要求对整个系统进行转型。此外，各国在实现这样的转型过程中可能需要应对各种不同的情况。

本项研究

本书深化了国际能源署（IEA）此前研究的技术分析，同时也对波动性可再生能源并网的经济方面进行了分析。本书基于在15个国家^①开展的7项案例研究。利用修订版的国际能源署灵活性评估工具（FAST2）对案例研究地区的系统灵活性进行了技术分析。运用每小时系统运行的经济模型研究高比例波动性可再生能源对系统总成本产生的影响（见专栏ES.1）。

^① 巴西、得克萨斯电力可靠性委员会（得克萨斯州，美国）、伊比利亚（葡萄牙和西班牙）、印度、意大利、日本东部（北海道、东北部和东京）和西北欧（丹麦、芬兰、法国、德国、爱尔兰、挪威、瑞典和英国）。