

高比例可再生能源并网 与电力转型

释放电力系统灵活性

中国可再生能源电力并网研究协作组
国家可再生能源中心

组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

高比例可再生能源并网 与电力转型

释放电力系统灵活性

中国可再生能源电力并网研究协作组
国家可再生能源中心

组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着波动性可再生能源发电和分布式电源的发展,传统电力系统转型和电力市场体系变革已经是全球面临的共同挑战。本书基于国际能源形势、电力市场影响、风光水电新能源的热点问题,收集整理了国内外有关研究成果。主要内容包括美欧可再生能源发电并网与电力市场演进;促进系统灵活性和可再生能源消纳的现代电力市场体系;改进电力批发市场设计,适应可再生能源;高比例风电和其他间歇性可再生能源对加州电力系统运行的影响;可再生能源管理与评估电力系统转型需求;可再生能源并网:加州、德国和丹麦的案例及启示;中美新能源运行问题比较研究;中国弃风弃水弃光的原因分析及建议;促进中国风光消纳的思路;用于大规模风电输送的先进灵活输电技术和研究;风电容量可信度研究及其在电力系统规划与运行中的应用;高渗透率分布式光伏发电接入低压电网的规划方法和运行技术研究;提高燃煤电厂弹性:从基荷电力到调峰电力;中国常规火电和热电联产机组调节灵活性及激励政策;储能技术在可再生能源并网中的应用及政策。

本书内容涉及国内外电力市场设计、风电、火电、热电联产、储能等方面的灵活性研究与可再生能源并网消纳实践,可供高比例可再生能源发展和电力转型、电力市场设计的研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高比例可再生能源并网与电力转型 释放电力系统灵活性 / 中国可再生能源电力并网研究协作组, 国家可再生能源中心组编. —北京: 中国电力出版社, 2017.7

ISBN 978-7-5198-0878-5

I. ①高… II. ①中… ②国… III. ①再生能源—电力—研究 IV. ①TM619

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 156842 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 王春娟 (010-63412350) 盛兆亮

责任校对: 闫秀英

装帧设计: 赵姗姗

责任印制: 邹树群

印 刷: 北京九天众诚印刷有限公司

版 次: 2017 年 7 月第一版

印 次: 2017 年 7 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 16 开本

印 张: 14

字 数: 304 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 63.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

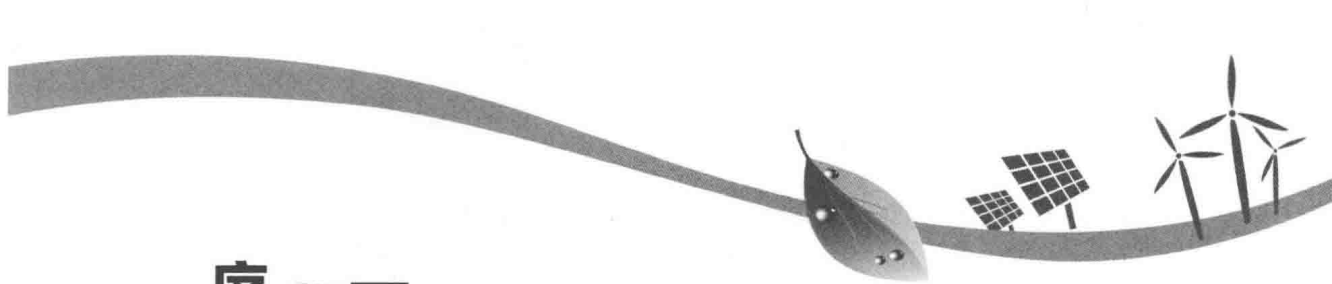
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

编辑委员会

主 编 王斯永 赵勇强
副主编 戴慧珠 杨校生
参 编 王红芳 刘 坚

指导和支持单位

指导单位	国家能源局新能源司
秘书处挂靠单位	国家可再生能源中心
支持单位	能源基金会
CVIG 发起单位	国家可再生能源中心 电力规划设计总院 中国电力科学研究院 国网能源研究院 国网北京经济技术研究院 水电水利规划设计总院 中国风能协会 清华大学 华北电力大学 中国科学院电工研究所 龙源电力集团股份有限公司 华能新能源股份有限公司
国际合作伙伴	美国国家可再生能源实验室 (NREL) 丹麦能源署 (DEA) 德国国际合作公司 (GIZ) 美国通用电气公司 (GE) ABB 集团 (ABB) 丹麦国家电网公司 (Energinet.dk) 美国波动性电源并网组织 (UVIG)



序

改革开放三十多年以来，中国能源建设取得重大成就，支撑了经济社会的大踏步进步。但是，以煤炭为主的中国能源消费结构也导致面临日益严峻的资源环境压力。中国政府日益重视能源绿色转型，大力推动能源生产和消费革命。2006年，中国开始施行《可再生能源法》，水电、风电、太阳能、生物质能、地热能等逐步加快发展。2016年年底，非化石能源占一次能源消费总量的比重达到13.3%，比上年提高1.3个百分点，加速推动了中国能源体系向清洁低碳方向转变，促进了经济社会可持续发展。

电力是现代经济社会的命脉，也是可再生能源利用的主要领域和未来能源体系的核心。近十多年来，中国加大力度支持发展清洁低碳电力。截至2016年年底，全国发电装机容量16.5亿kW，非化石能源装机占比从2010年的27%提高到2016年的36%；其中可再生能源发电总装机达到5.7亿kW，其中风电、太阳能发电装机分别达到1.48亿kW和7740万kW，全部可再生能源发电量约占全社会用电量的25%。以风电和太阳能发电为代表的新能源发电成本快速下降，在电力供应的比例超过了5%，在部分地区已成为主力电源。

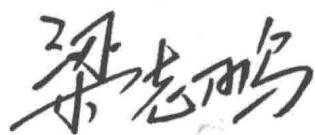
电力系统转型是保障可再生能源发电持续发展的基础条件和必然要求。我国电网技术装备和安全运行水平处于世界前列，特高压输电技术开始应用，智能电网和微电网等新技术示范规模不断扩大；大部分煤电厂开展了超低排放改造，还有一部分煤电机组启动了灵活性改造。在市场体制机制上，2015年以来中国启动新一轮电力体制改革，针对可再生能源推出了优先发电制度，制定了可再生能源全额保障性收购办法，在全国范围推进输配电价改革，以直接交易为主的市场化交易规模逐步扩大，电力交易现货市场筹备工作也在抓紧推进。

但是，由于我国能源转型发展和电力市场化改革进程不协调、适应可再生能源的电力运行机制和市场体系仍然缺失，也暴露出很多问题，部分地区弃风、弃光、弃水问题十分严重，“三北”地区风电消纳困难，跨省跨区特高压通道输送消纳可再生能源电力的效率偏低，电力市场在配置资源中发挥决定性作用的体制机制尚未建立，对未来高比例可再生能源电力并网消纳的技术、管理和市场体系还缺乏系统认识和可行的解决方案。

高比例可再生能源发展是实现应对全球气候变化目标的共同趋势，如何保障可再生能源并网消纳也是包括欧美领先国家和广大发展中国家共同面临的挑战。以美国、丹麦、德国为代表的领先国家在可再生能源并网方面取得较为丰富的经验。2009年以来，在中美可再生能源伙伴关系框架下，在中国国家能源局指导和在能源基金会支持下，国家可再生能源中心学习借鉴美国波动性电源并网组织（UVIG）的经验，牵头国内有关机构组建了“中国可再生能源电力并网研究协作组（CVIG）”，为企业、机构和专家学者提供一

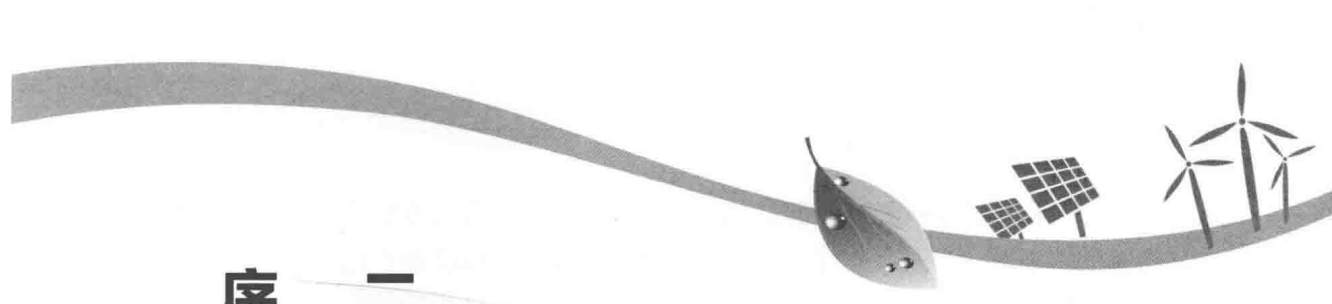
个平等开放的研究交流平台。2014 年正式成立以来，CVIG 邀请来自中国、美国、丹麦、德国、UVIG、国际能源署（IEA）的数十位国内外专家进行了二十多次专题报告和研讨会，就促进可再生能源并网的先进技术、工程实践、体制机制和政策措施进行了广泛的讨论，已成为国内开展新能源电力系统交流合作的重要平台。

通过深入的研究交流，各方已逐步形成共识，释放和提高电力系统灵活性是实现高比例可再生能源并网的必然要求，也是未来电力系统变革和电力市场体系建设的重大要求。CVIG 组织有关专家撰写文章，并选编了国内外的有关研究成果，编写了《高比例可再生能源与电力转型 释放电力系统灵活性》。这本书汇集了国内外行业专家的知识 and 智慧，收集了国际上成功的经验案例，也总结了各方面的教训。希望通过此书促进各方不断交流和合作，使灵活性成为未来电力转型的关键词，共同推动解决可再生能源并网方面的挑战，促进尽早实现能源革命。



国家能源局新能源和可再生能源司副司长

2017 年 6 月



序 二

进入 21 世纪以来，中国可再生能源发展迅猛，特别是水电、风电和太阳能发电都进入大规模发展阶段。截至 2016 年年底，非化石能源占一次能源消费总量的比重达到 13.3%，推动了中国能源体系向低碳清洁能源方向转变，促进了经济社会环境的可持续发展。但是清洁能源快速发展的同时，部分地区弃风、弃光、弃水问题突出，“三北”地区风电、光伏消纳困难，主力电源火电和输电系统仍然延续运行方式，电力市场在促进电力系统运行方式转变和可再生能源优先消纳方面的关键作用尚未发挥，促进高比例可再生能源发展的新型电力系统和市场体系还缺乏系统解决方案。

尽管发展并非坦途，但是中国政府日益明确推进能源绿色低碳转型、推动能源生产和消费革命的战略方向，不断探索推进能源和电力体制改革创新。特别是 2015 年以来中国启动了新一轮电力体制改革，要求全面实施国家能源战略，加快构建有效竞争的市场结构和市场体系，要求在发电侧和售电侧开展有效竞争，培育独立的市场主体，着力构建主体多元、竞争有序的电力交易格局，形成适应市场要求的电价机制，使市场在资源配置中起决定性作用，推动电力行业发展方式转变和能源结构优化，提高发展质量和效率，提高可再生能源发电和分布式能源系统发电在电力供应中的比例。

近期，许多省（区）已经推进电力体制改革试点，输配电价改革实现省级电网全覆盖，以直接交易为主的市场化交易规模明显扩大，一批省区正在抓紧推进现货市场的筹备建设工作。在火电灵活性改造方面，2016 年 6 月，国家能源局正式启动了火电灵活性改造示范试点项目，通过增加储热装置“热电解耦”、对热电/纯凝机组本体进行深度改造等举措提升了机组的调峰能力，最小技术出力降到 30% 以下额定容量，火电机组的灵活性获得大幅提高，促进火电从基荷电源转为灵活电源甚至备用电源，从而提高系统调节能力。在电力调度交易方面，中国通过电网技术、调度方式和交易机制的创新，挖掘互联电网灵活调节潜力，探索适应风电、光电等间歇性电源大规模发展的友好型电网，打造可靠灵活、经济高效的能源电力资源配置平台。

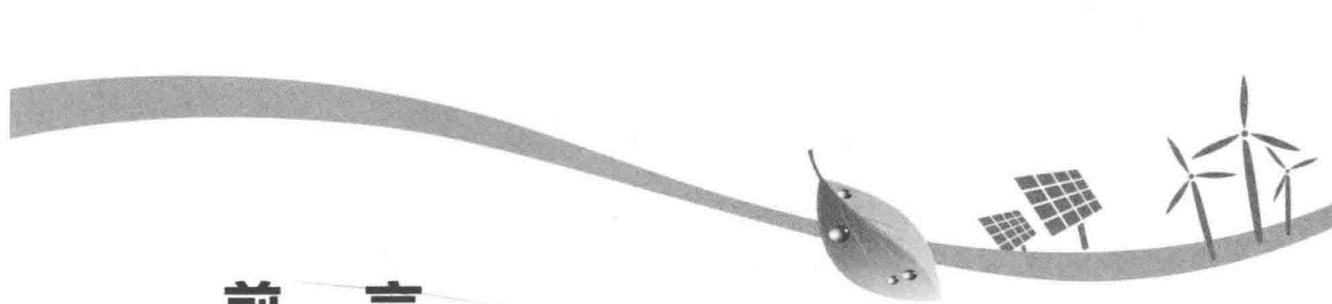
可再生能源并网是全球电力发展的共同挑战，也是国际能源合作的重要内容。按照中美可再生能源伙伴关系的工作计划，在能源基金会支持下，国家可再生能源中心通过了解、学习和借鉴美国波动性电源并网组织（UVIG）的经验，牵头组建“中国可再生能源电力并网研究协作组（CVIG）”为关注可再生能源并网和电力转型的企业、机构和专家学者提供一个平等开放的研究交流平台，举办了电力体制改革、火电灵活性改造、电网发展的系列专题报告和研讨会，探讨高比例可再生能源有效接纳的解决办法。国内外相关研究显示，灵活性已经成为未来电力转型的关键词。CVIG 选编了国内外相关成员专家的研究成果，形成了《高比例可再生能源与电力转型 释放电力系统灵活性》一书，

介绍了市场机制和技术措施等层面的相关研究，也总结了有关方面的经验教训。希望通过此书促进国内外各方面不断深化交流和合作，为探讨中国能源和电力体系转型发挥重要作用，为建设“美丽中国”长期可持续能源政策及战略分析提供参考。



国家发展和改革委员会能源研究所副所长
国家可再生能源中心主任

2017年6月



前言

近年来,全球范围内传统电力系统都面对以风力发电和太阳能发电为代表的可再生能源电力迅速发展带来的机遇与挑战。各国能源电力行业都在积极探索解决可再生能源电力并网问题的各种措施。目前在欧美的一些国家和国际组织已经形成了比较成熟、有影响力的可再生能源电力并网研究交流网络组织和平台。

为了促进以风力发电和光伏发电为代表的波动电源相关的电力系统研究信息和成果的交流,推动先进技术、工程实践、体制机制和政策措施的探讨,在国家能源局的指导下,在能源基金会支持和中美可再生能源伙伴关系项目的支撑下,借鉴美国波动性电源并网组织(Utility Variable-generation Integration Group, UVIG)的经验,由国家可再生能源中心牵头联合国内有关机构建立了中国可再生能源电力并网研究协作组(China Variable-generation Integration Group, CVIG)。CVIG 定位于有关专家、机构、企业等自愿组成的、非营利性的技术交流网络组织,致力于组织开展技术、经济和政策层面的研讨、交流,为表达专家、学者个人的观点认识和研究成果提供一个平等开放的交流平台。

自 2014 年 4 月 CVIG 正式成立以来,至 2015 年年底, CVIG 已成功召开了 6 次大中型研讨会和近 10 次小型专题报告会议,累计邀请来自国内外二十余家机构的 40 多位相关领域专家发表主题演讲,累计参会人数约 1000 人,在中国电力行业和中外可再生能源合作中产生了积极影响。

通过这些交流和讨论达成一些共识:

(1) 根据发展的进程制定并落实政策法规,是保证可再生能源电力优先健康发展,促进传统电力系统向清洁低碳、安全高效、灵活智能转型的基本保障;市场机制的建立与完善将促进电力系统资源优化配置,降低社会总成本。

(2) 随着波动电源在电力系统中比例逐渐增加,分布式电源的发展以及智能化水平的提高,传统电力系统的转型已经是全球面临的共同挑战。目前即使在欧洲和美国电力系统转型的研究依然处于探索阶段,还要开展比较长期的研究工作。因此国内需要深入系统地开展研究未来一个时期的电力系统转型路线图。

(3) 中国在资源与环境约束更加突出的形势下亟待确立可再生能源优先发展的规划理念和方法,包括电力资源配置优化、电源结构优化、电源布局优化、电网结构优化。

(4) 中国电力规划现状主要存在多个不协调的问题:电力供应与需求不协调;电力发展与生态和环境保护要求不协调;传统电源与新能源发展不协调;电源与电网建设发展不协调;不同部门机构的电力规划管理工作不协调,缺少对规划过程中各相关方之间协商协调规范的法律法规。

(5) 根据中国资源禀赋特征,利用技术手段和政策措施,充分发掘燃煤机组的技术潜力,提高电力系统灵活性,是发展中国含高比例可再生能源电源电力系统的主要技术手段之一。

(6) 中国传统电力规划方法和准则参数未能考虑波动性电源特性及优先并网消纳需要,需要系统研究改进规划方法,以及修订和编制相关标准。

(7) 规划指标中需要进一步完善系统灵活性指标,推动构建高比例可再生能源电力所需要的灵活电力系统。

(8) 中国电力系统规划中参与电力平衡的可再生能源电力容量可信度的研究仍然缺乏坚实的基础数据支持和被各方面普遍接受的科学评价方法。

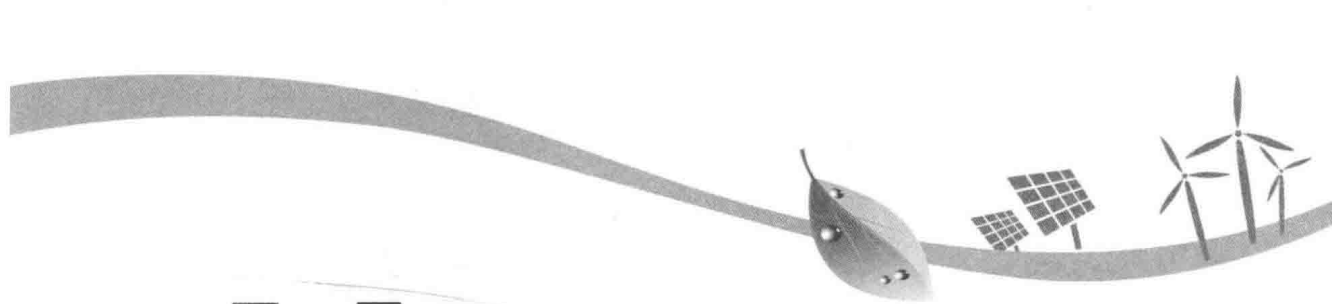
(9) 随着技术进步,目前规程规范中常规机组的最小负荷和爬坡率指标已经大大落后于机组实际技术水平,有必要重新进行审核修订以充分释放系统灵活性资源。

(10) 可再生能源电力参与电力市场、系统运行、调峰服务的机制、权责和贡献认定及补偿机制有待研究。

总体看,当前中国高比例发展可再生能源电力需要系统地在各个层面解决问题,但研究清单和共识仍不够清晰,需要通过各方加强交流对话,学习借鉴国际经验,进一步推动深入开展中国高比例可再生能源电力并网消纳和电力系统转型研究。为此,可再生能源电力并网研究协作组计划收集整理国内外有关研究成果,组织汇编含高比例可再生能源的电力系统转型研究成果,为国内相关研究提供参考。

根据前一阶段 CVIG 组织的研讨会交流讨论的结论,在国内外有关专家的积极支持下,2015 年可再生能源电力并网研究协作组的第一本研究汇编主题定为电力系统灵活性,通过邀请国内外有关专家投稿或选辑有关优秀文章,组织选编了《高比例可再生能源并网与电力转型 释放电力系统灵活性》,主要介绍国内外关于含高比例可再生能源电力的电力系统转型的研究成果。

值得指出的是,CVIG 定位于为可再生能源电力并网和电力系统转型的技术、经济和政策研究成果以及各利益相关方的诉求提供一个平等开放的交流平台。因此,CVIG 鼓励在科学、客观、平等的基础上进行交流研讨,该文集所选的论文中也有一些颇有争议的观点。但这仅反映了论文作者个人的观点,并不代表 CVIG 同意或支持这些观点。选编这些论文的目的是试图比较全面、客观地反映国际、国内的研究现状。



目 录

序一

序二

前言

● 美欧可再生能源发电并网与电力市场演进	1
● 促进系统灵活性和可再生能源消纳的现代电力市场体系	11
● 改进电力批发市场设计, 适应高比例可再生能源	28
● 高比例风电和其他间歇性可再生能源对加州电力系统运行的影响	38
● 可再生能源管理与评估电力系统转型需求	47
● 可再生能源并网: 加州、德国和丹麦的案例及启示	59
● 中美新能源运行问题比较研究	71
● 中国弃风弃水弃光的原因分析及建议	80
● 促进中国风电消纳的思路	89
● 用于大规模风电输送的先进灵活输电技术研究	98
● 风电容量可信度研究评价及其在电力系统规划与运行中的应用	122
● 高渗透率分布式光伏发电接入低压电网的规划方法和运行技术研究	144
● 提高燃煤电厂弹性: 从基荷电力到调峰电力	161
● 中国常规火电和热电联产机组调节灵活性及激励政策	168
● 储能技术在可再生能源并网中的应用及政策	177
● 附录 CVIG 2014~2015 年总结报告	199
● 中英文对照	207

美欧可再生能源发电并网与电力市场演进^①

J. C. SMITH^{*1}, M. AHLSTROM², J. DUMAS³, P. B. ERIKSEN⁴, J. O'SULLIVAN⁵,
P. SOTKIEWICZ⁶

(1. UVIG, 美国; 2. WindLogics Inc, 美国; 3. ERCOT, 美国; 4. Energinet.dk, 丹麦;
5. Eirgrid, 爱尔兰; 6. PJM Interconnection, 美国)

翻译: 刘德刚 审校: 许传龙, 赵勇强, 等

摘要

电力系统中可再生能源发电 (RES-E) 的渗透率日益提高, 尤其是来自风力发电和太阳能发电的波动性电源, 正在引起全球对电力市场和系统运行的重新思考。波动性、不确定性和运行不灵活已经成为电力系统运行中的通病, 随着风能和太阳能发电比例的增加, 更凸显了这些问题的重要性, 激发我们从三个方面认真考虑可靠性问题: 实现长期规划目标的容量资源充足性, 保证实时运行可靠性的系统灵活性, 以及确保所有资源随时随地可用的输电能力。本文从上述保证可靠性的三个方面讨论了欧洲和北美电力市场及其系统运行的现状, 以及未来的发展方向。电力市场与碎片化政策 (在欧洲各国以及美国各州不同的政策) 之间复杂的相互作用正引起人们的担心, 因为这些零散的政策可能扰乱市场和系统运行的效率。市场和 (或) 系统运营商都在想尽办法, 力求在这些政策约束下经济有效地保障可靠性并努力实现环境目标。美国 and 欧洲的市场已经提出了各种方法 (并还在继续发展), 以不同的方式解决资源充足性、运行灵活性, 以及输电安全性方面的需要。因此, 有必要通过比较已经在实施的或正在讨论的将来要实施的各种机制, 帮助我们理解在面对日益增加的可再生能源发电时有效地保持系统可靠运行, 是否只有一条路走还是有多条同样有效的光明道路。

关键词

市场整合; 电力市场; 可再生能源并网; 资源充足性; 运行灵活性; 输电能力

0 引言

全球风能和太阳能发电发展迅速, 某些国家已有超过 20% 的年度电力需求来自风能和太阳能, 有些地区部分小时的风能和太阳能发电出力甚至超过负荷的 50%。电力系统在负荷侧和发电侧总会遇到波动性和不确定性, 根据以往的经验就能够识别出波动性、不确定性及缺乏灵活性的例子和模式, 并逐渐建立了解决这些问题的运行规则和市场机制。可再生能源所引起的波动性、不确定性和不灵活性虽然规模不同, 但产生的影响

① 此文原发表于 CIGRE 2014 论文集, 承蒙作者和会议主办方允许编译为中文, 在此表示衷心感谢。

基本相同。

与此同时,人们相信电力市场已成为提高系统效率并且保持可靠性的一个极佳手段。电力市场正在扩大其规模和范围,其中包括计划建立一个一体化的欧洲电力市场。电力系统的资源充足性、运行灵活性和输电能力等问题,必须通过不断改善监管和市场体制来解决。这些可靠性问题与相关政策彼此交织、错综复杂,需要不断完善政策、市场设计和操作实践。本文比较了欧洲和美国电力市场与可再生能源并网背景下资源充足性、运行灵活性以及输电能力的现状。

1 美国电力市场及其可再生能源并网

目前,美国电力行业市场模式包括两种类型:

(1) 垂直一体化的电力企业,自身负责系统运行,实行基于服务成本的监管模式。

(2) 根据 1992 年的能源政策法案 (Energy Policy Act, EPAct) 成立的竞争性电力批发市场。

美国联邦能源监管委员会 (Federal Energy Regulatory Commission FERC) 通过 1996 年的 888 号法令,进一步明确了要求非歧视性、开放输电系统接入等条款,成立独立系统运营商/区域输电运营商 (ISO/RTO) 负责运行竞争性市场和输电系统。这些市场在电量市场和辅助服务市场的设计方面非常相似,但对资源充足性的要求却有着很大差别,存在两种主要的市场模式:

(1) 单一电量市场模式,容量成本通过电能和辅助服务市场来回收,如德州电力可靠性委员会 (ERCOT)、加州独立系统运营商 (CAISO)。

(2) 电量市场和容量市场并行,用来回收一部分容量固定成本以保证资源充足性,如 PJM 独立系统运营商 (PJM)、纽约独立电力系统运营商 (NYISO)、新英格兰独立系统运营商 (ISO-NE)、中西部独立系统运营商 (MISO)。这两种市场都可能有额外的容量冗余要求,需要负荷服务实体签订容量合同 (如 CAISO 和 MISO 的部分地区)。

2 美国电力市场的资源充足性

通常,美国的电力公司或系统运营商每年都要对其资源的充足性进行研究,目的是保持一定的备用冗余,以保证资源不足造成的失负荷期望值为 1 天/10 年^[1]。ERCOT 地区逼近其 13.75% 的备用容量冗余目标 (因此希望鼓励建设新的发电厂),ERCOT 运行单一的电能市场,没有容量市场。另一方面,PJM 估计 2013 年夏天备用冗余比其 15.9% 的冗余目标高出 13% 以上,PJM 运行一个提前三年采购的容量市场,并采用一种倾斜的需求曲线,发现超出已安装/计划安装的备用容量冗余目标的容量价值。由于在解决资源充足性方面有着很大的差异,ERCOT 和 PJM 提供了来自美国电力市场的一种有益的比较分析。

无论是在 ERCOT 还是美国其他一些地方,电量市场的波动性和价格过高的前景引起许多利益相关者的担忧。除了对资源充足性的争论外,赞成容量市场的一个理由是,

它们通常能平抑能源价格的波动,缩短高价格的周期。容量市场的目的在于,发电厂的建设投资成本只有一部分从电能市场上回收,而剩余部分从容量市场上来回收,从而发现适当的投资信号。关于单一电能市场和容量市场各自的优点以及各种容量市场机制的设计,在美国仍在进行激烈辩论,不同的 ISO/RTO 也在做着自己的选择。

自 2002 年放松电力工业管制以来,德州电力可靠委员会(ERCOT)一直能够保持充足的投资和备用。事实上,2000~2005 年,ERCOT 增加了 20000MW 联合循环燃气发电机组。这种高效的燃气发电机组及低成本的煤电、风电和核电,导致大多数时间电价低廉,只有当发电资源几乎耗尽、边际成本急剧上升时,才会出现电价尖峰。由于供给曲线平缓,天然气价格低廉,ERCOT 发电厂面临着边际价格过低的问题。因此,需要适当的稀缺价格小时数(在这些时段中,为了保障电力平衡和备用需求,电能价格超过了系统中成本最高的电源的边际成本)用来回收新建电厂的成本。

依赖稀缺性定价来保障长期可靠性会带来一个问题,因为较多的备用容量冗余在提高可靠性的同时,也会降低稀缺定价的频率。随着机组的退役和经济的增长,备用容量冗余一直在下降。由于备用容量冗余的下降,再加上天然气价格的降低和资本市场的融资紧缩,导致 2013 年 6 月 ERCOT 决定对全系统范围的竞标报价上限(SWCAP)提高至 5000 美元/MWh,2014 年 6 月提高到 7000 美元/MWh,2015 年 6 月提高到 9000 美元/MWh,通过允许更高的电能价格尖峰刺激新建发电厂的投资^[2]。

PJM 容量市场,被称为可靠性定价模型(RPM)^[3],有三个鲜明特点:一种向下倾斜的需求曲线,用以发现安装备用冗余目标值之外的容量资源价值;提前 3 年允许新建电源进入机组组合的承诺,使新项目更易于融资;根据已知输电约束对高峰时段容量输送的限制,形成容量资源的分区价格。容量的需求根据基于新建燃气内燃机组的项目净成本(Net CONE)的需求曲线和安装备用冗余(IRM)目标值决定。

自成立以来,RPM 容量市场一直以低于 Net CONE 价值的价格,维持或高于预计安装的备用冗余,已经吸引了近 58000MW 的新增容量资源加入 PJM 市场。虽然从 2011~2016 年有近 23GW 的装机容量将要淘汰退出市场,但通过它的容量市场,PJM 已经承诺 2016 年夏季有超出备用冗余目标 5%以上的资源。而且发电机组的构成在不断变化,更倾向于需求响应和燃气发电机组,这些资源比正被取代的传统燃煤发电的调节速度更快。

3 美国电力市场的运行灵活性

灵活性可定义为能够迅速改变出力,以适应快速变化的系统条件。由于发电资源(包括一定的波动性电源)、需求响应及储能资源提供的在线灵活性,在线发电资源可以非常灵活,它们具有向上或向下爬坡的能力。离线资源也可以灵活,它们可以启动并迅速接近满负荷,也可以迅速地关闭。更高的爬坡率,更短的日内启停周期,以及最小出力与最大出力之间更大的范围,意味着有更高的灵活性。需求响应(按照定义,在线运行并与电网同步)具有非常好的潜在灵活性。

市场或系统的灵活性受参加调度机组的地点和数量影响,也与市场中的负荷有关,

其他影响因素还包括市场设计、参与度、电能市场、辅助服务及容量市场等。特别是电能与辅助服务市场之间的相互作用，允许资源同时为两个市场提供供给。激励资源按照调度指令实时运行尤为重要。ISO/RTO 已经预留了一定容量用于调节和备用，事实上就是认可了需要有灵活性来满足负荷和发电随时间的波动以及系统性的突发事件。风力发电和太阳能发电的波动性只是同类的问题。其他的波动性变化，可以通过 5min 调度信号和快速内燃机组或水电机组合进行系统短期平衡。

美国的电能市场设计，一般趋向基于安全约束机组组合的日前市场，以及基于安全性约束经济调度的实时市场，并采用节点边际电价（LMP）来反映网络阻塞和网损。此外，这些市场都提供辅助服务，如调节和频率响应（欧洲称为一级备用）、同步或旋转备用（欧洲称为二级备用），以及各种形式的非同步/非旋转备用容量。在大多数美国市场，还有实时运行过程中电能和辅助服务的联合优化，能够做到对电能和辅助服务的最小成本分配和定价上的一致性。

现在，风电的不确定性在很大程度上通过 5min 调度的灵活性进行管理，备用容量（如非旋转备用或 30min 离网备用容量）可在极端情况下使用。例如，ERCOT 中风电的调度，利用了来自风电场的最新遥测功率值（必要时可削减）。ERCOT 使用其 5min 调度来管理风电出力的巨大变化，可以做到在 1h 内应对约 2500MW 的风电出力下降而不会耗尽已有的运行备用容量。5min 节点调度的效率，特别是能对节点市场价格信号做出迅速反应的快速启动燃气涡轮机，使 ERCOT 能够对高（而且仍在提高）风电渗透率进行管理。

美国的大多数电力系统在日前机组组合方案中都采用日前风电预测（根据需要可增加太阳能发电预测）。日前预测对于在机组组合优化中恰当考虑可再生能源预期容量至关重要，否则就会出现投入过多的火电机组，使得系统运行的经济效益受到受到影响。日前风电预测值具有不确定性，这种不确定性有时会比负荷预测的不确定性更高，所以滚动式的机组组合，或对日前发电计划的日内调整被认为能够更好地利用日内风电和太阳能发电预测的准确性，并在更接近于实际运行的时间内投入机组，这样可以同时提高系统运行的经济性和可靠性。

4 美国的输电能力

与输电能力相关的一些重要工作包括输电规划、成本分摊和成本回收。这一领域在过去二十年一直处于转型期。在美国许多区域性的输电规划工作中，现在明确地认识到，如果不对输电系统进行相应的扩建，大量的波动性发电（特别是风电）就不能输送到负荷地。这一认识已经体现在 FERC1000 法令中所提出的政策，即要求相邻的输电公司、输电运营商和 RTOs/ISOs 之间，联合并协调地编制输电规划。

作为一个有着稳定的输电规划过程和强大输电基础设施的区域性实体，ERCOT 就是一个很好的例子。在 ERCOT，各输电服务提供商通过收费来回收成本，而这种收费基于需求的使用情况，并通过一种负荷比例分摊机制来回收。对于能够让德州西部的风电

输送到中部和东南部负荷中心的竞争性可再生能源区划 (CREZ) 项目, 其成本也正是通过这一负荷比例分摊的机制来回收的。

其他的 RTOs/ISOs 也建立了类似的规划机制和成本分配与回收过程, 导致过去六年里出现越来越多的输电系统投资, 扭转了多年来输电系统投资下滑的趋势。例如, 由多价值项目 (Multi Value Project, MVP) 过程批准的中西部独立系统运营商 (MISO) 区域的 50 亿美元输电线路, 体现了可再生能源输电公共政策的价值。在 PJM, 2000 年以来的 240 亿美元输电系统扩建项目几乎全部出于提高系统可靠性的考虑。随着 1000 法令的出台, PJM 的区域输电扩建规划 (RTEP) 过程现在可以考虑公共政策对可能的可靠性需求的影响, 并且“州立协议办法”使 PJM 内部各州同意承担满足其强制性公共政策目标的输电项目费用, 而无须其他州也承担这些项目的费用。虽然正在取得进展, 但输电工程的建设在国内各地仍存在巨大差异 (尤其是各州的审批程序和新输电工程的成本回收问题), 而且区域间的规划仍处于初期阶段。

5 欧洲的电力市场与可再生能源并网

欧洲的能源政策比美国更加集中在欧盟 (EU) 所要求的可持续、经济、安全的能源供应, 这些从根本上改变了电力系统的性质。发展一个泛欧洲的内部能源市场 (IEM)、建立一个共同的交易机制的努力, 让 28 个成员国 (加上挪威和瑞士) 能够更有效地利用系统现有的容量和灵活性, 按照协调的方式规划发展电网。这项工作本身将带来大规模的效率提高。

但是, 全欧盟范围内的市场机制与各成员国的政策目标并不一致。各国供电安全性与可持续性发展的目标正在通过支持可再生能源发电 (RES-E) 来实现。这些对市场结果的扭曲导致了市场的低效率。

根据欧盟 2050 能源框架, 到 2050 年, 欧洲的电力系统中将有至少 55% 的发电量来自可再生能源发电 (RES), 其中 37% 将来自波动性的 RES-E^[4]。上述比例仅是平均值, 在实时运行的某些阶段 RES 占比肯定会高于该比例, 这将产生重要的影响。鉴于 RES-E 发电的可变成本较低, 这些发电量可能会降低市场的平均电价, 而且波动性的 RES-E 将导致电价的波动性。

虽然较低的电价似乎对消费者一个很好的结果, 但电价降低以及增加的波动性很难在激励 RES-E 发展的同时, 还能保障常规发电装机的容量充足性。目前解决这一问题的办法是, 充分利用对 RES-E 的支持措施 (优先调度), 并在成员国中推广容量补偿机制 (Capacity Remuneration Mechanisms, CRMs) 来保障充足的容量以实现可靠性。然而, 政策支持、优先调度和容量补偿机制正在加大实现政策目标的成本, 并可能破坏电能市场的有效性。

许多成员国和欧盟就所需的灵活性和容量机制开展了激烈的讨论。根据最近欧盟^[4, 5, 6, 7]开展的一系列征求意见结果, 欧盟委员会明显意识到, 差异化的容量市场肯定不是解决问题的好办法。欧洲各国拼凑出来的容量市场, 会扭曲电能市场的流动性和交易模式,

并影响其经济效益。最近的指南已表明,任何这样的机制需要得到“成员国援助项目(State Aid)”的批准,因为建立容量市场很可能被认为是出于政府的支持从而过度扭曲竞争,这样的行为很可能会被禁止。另一方面,成员国将强调有必要保持足够的供电安全性。这是欧洲法律所规定的成员国责任,而且也是任何主权国家能源政策的核心,即确保本国供电安全。这就造成欧盟及其成员国不同政策之间的明显紧张。

还存在一些重要的技术问题有待解决。随着大量波动性电源的加入,电力系统的性质将发生根本改变。一些欧洲地区的电力系统正面临较高的可再生能源渗透率。除了容量市场和电能市场,这些影响也对整个系统的性能提出了新的要求。

由于 RES-E 的高渗透率与欧洲互联电力系统有关的额外灵活性问题包括:

(1) 系统爬坡能力非常重要,不只是用于实时平衡,还需要充足的响应式资源,能够在不同时间尺度上对意外状况做出反应。

(2) 必须要有静态无功管理,因为虽然技术标准可要求 RES-E 增加无功支持,但 RES-E (通常位于系统的偏远地区) 的无功质量和无功容量通常小于传统发电机组。

(3) 对非同步电源渗透率很高情形下的系统暂态稳定性也需要进行深入研究。

6 欧洲的资源充足性

一些欧盟国家越来越担心单一的电能市场无法提供足够的容量满足未来的电力需求。其主要论点是所谓的“效益遗失”问题,即通过尖峰电价的收益来支撑新建电厂,但一旦增加额外容量后收益将会消失(如果一开始就有足够的政治意愿允许价格尖峰)。增加 RES-E 可能会导致市场价格下降,降低了保证容量充足性所需新投资的积极性。

由于欧洲排放交易系统(ETS)中的 CO₂ 价格已经崩塌,市场价格进一步下跌,部分原因是由于金融危机的影响,另一方面是因为欧盟执行的 20-20-20 目标(到 2020 年将实现,欧盟温室气体排放量在 1990 年的水平上减少 20%,欧盟能源消耗的 20%来自可再生能源,以及欧盟的能源效率提高 20%)并没有降低欧洲的二氧化碳排放限额。

作为对未来容量充足性担忧的回应,已经提出了各种各样的 CRMs。欧洲有些国家已经实施了 CRMs,一些国家正在考虑这样做,而有些国家则不考虑实施 CRMs。

正如欧洲能源监管合作局(ACER)指出^[8],各国 CRMs 方案的多样性带来了严重的问题。欧洲一体化电能市场上容量不足的问题,应作为一个全欧洲的问题来解决。目前的缺乏协调不利于正在开展的市场一体化进程,并有可能产生市场扭曲。这种情况可能会陷入僵局,正在等待欧盟委员会(欧盟能源总公司)的决定。欧洲未来的容量充足性在很大程度上取决于正在讨论的结果。

7 欧洲市场的运行灵活性

欧盟目标模式^[9]对于欧洲的电力系统运行灵活性起着至关重要的作用。欧盟目标模式的目的是协调和整合现有的区域电力市场,发展成为一个统一的欧洲市场,从而在最大的区域上实现最大的灵活性。这包括提出一种通用方法,计算跨国界的输电能力,确