

关于虚拟电厂发展的几条建议： 纳入系统规划、完善市场参与

睿博能源智库

介绍及概述

随着中国经济进入高质量发展阶段，日电力负荷的峰谷差拉大，冬夏季的用电高峰也更加明显。这样的负荷特性变化给供电稳定性增加了难度，对电力系统的稳定运行提出了新的挑战。同时，随着出力具有随机性的新能源比例的提高，电力系统的不确定性增加，电力系统灵活性需求随之加大。鼓励灵活性资源的发展和使用能帮助削峰填谷，促进新能源消纳并优化系统运行。

2021年以来，能源规划、碳达峰行动方案、新型储能指导意见等多份政策文件中都强调了虚拟电厂的发展，北京、内蒙古、浙江等多地也将虚拟电厂写入其“十四五”能源发展规划。事实上，“虚拟电厂”的概念已经提出近20年，它不是一个实体发电厂，而是“一套能源管理系统，将用户侧分散的清洁能源、储能系统、可控负荷等分布式能源资源聚合并协调优化，参与电网运行。”¹。在中国的双碳目标下，发展虚拟电厂对于促进清洁能源消纳，实现电力系统安全运行等方面，具备重要意义。

在这篇文章中，我们根据中国电力行业结构和电力市场的发展情况，对虚拟电厂这项智能

¹ 王成山 (2022). 虚拟电厂，电力“智能管家”. 人民网. <http://kpzg.people.com.cn/n1/2022/0906/c404214-32520145.html>

电网技术在中国的发展提出一些不成熟的建议。接下来，我们将分别从以下几个方面简要概括主要建议，关于每个建议的具体内容将在文中进行讨论。

- 把虚拟电厂纳入电力投资规划。公平对待虚拟电厂与传统能源的竞争，力求用最低的社会成本（包括与温室气体排放和健康影响相关的成本）满足电力需求和实现“双碳”目标。
- 把虚拟电厂纳入电网投资规划。将虚拟电厂作为“非有线解决方案”进行投资评估，让现货市场产生的电网节点价格引导传统电网和虚拟电厂投资。
- 确定虚拟电厂参与电力市场的模式和规则。允许并鼓励虚拟电厂参与合适的电力市场，降低市场准入门槛，使虚拟电厂发挥其潜在的技术价值，包括电容量、电能量、系统平衡等辅助服务价值，并得到市场的补偿。
- 确保虚拟电厂得到合理和公平的经济价值补偿。在确保供给侧竞争充分和市场力监管足够的前提下，放宽现货市场价格上限，允许“稀缺性定价”释放价格信号，引导虚拟电厂和需求侧响应的进一步投资。同时，尽快取消政府对传统能源发电的政策补贴，包括对利用小时和上网电价的保护。

建议1：把虚拟电厂纳入电力投资规划

随着中国电力行业正处于从计划到市场、从传统能源向新型电力系统过渡，电力行业虽然不一定需要全国性、强制性的统一规划，但需要引导性的规划。一些比较成熟的欧洲和美国市场的经验表明，即使存在较为完善的现货市场，运作良好的规划过程也是必不可少的。具体而言，虽然美国和欧洲各地的电力市场发展水平也不尽相同，美国有些地区的经验（比如加州，同时实施了综合资源规划和RTO电力市场）可能可以为中国提供一些有用的参考。

图1给出了美国电力规划方法的一个概念图。此流程的第一步往往是预测负荷，并评估公共政策目标（如能效和可再生能源目标）和监管要求（如可靠性标准，排放标准）。根据明确的负荷目标和政策约束，规划部门再制定各种潜在投资组合，以及评估其经济性。而在这一步，理想的方式应把虚拟电厂等分布式资源考虑进投资组合，让新技术在规划层面得到公平的对待²。然后规划部门可对这些投资组合进行敏感性分析，力图以最低成本、最低风险来实现可靠性和环境目标。通常，在规划出台之前规划部门应向利益相关部门公

² 例如，美国PJM就把需求侧响应包含进了容量市场的规划当中。PJM Manual 18。
<https://www.pjm.com/-/media/documents/manuals/m18.ashx>

开征求意见，根据反馈意见确定最优的投资计划。

图1.典型的电力投资规划流程³



在电力投资规划的过程中，我们建议：

- 对虚拟电厂与其他能源一视同仁，公平对待虚拟电厂与传统能源的竞争。充分考虑到虚拟电厂相比于传统电厂的各类指标，对比投资性价比，以最低成本的原则进行规划。在规划灵活性投资时，应对虚拟电厂，抽水蓄能，和煤电灵活性改造等提高系统调节能力的技术一视同仁，以最低成本满足“十四五现代能源体系规划”中提出的“电力需求侧响应能力达到最大用电负荷的3%-5%”。
- 把环境成本考虑进投资决策，力求用最低的社会成本（包括与温室气体排放和健康影响相关的成本）满足电力需求和实现“双碳”目标。中国现在已有绿证交易、绿电交易、碳排放权交易三类市场共同推进“双碳”目标，传统能源的环境成本因此可以通过市场价格进行部分量化，引导最低社会成本的能源投资。⁴

³ 睿博能源智库,自然资源保护协会 (2017). 美国电力规划的经验 and 借鉴. <https://www.raonline.org/knowledge-center/power-sector-planning-us-experience-and-recommendations-for-china-cn/>

⁴ 人民日报海外版(2021). 绿证交易、绿电交易、碳排放权交易——三类市场共同推进“双碳”目标. <http://www.xinhuanet.com/energy/20211027/1196a7bdecd9433399b9d5459b50df32/c.html>

- 准确评估虚拟电厂对电力系统的效益和成本，尤其是需求侧的响应能力，以最低成本保障电力系统可靠性。广州市在 2021 年 8 月发布了《广州市虚拟电厂用户指导手册》和《广州市虚拟电厂管理平台使用说明（用户侧）》，并向社会公开征集参与广州市虚拟电厂建设的电力用户和负荷聚合商。完善这样的信息收集将有利于电力部门对需求侧弹性的评估，进而对供给侧灵活性资源做出合理的规划和指导。
- 对现有试点项目进行分析，并继续开展各类虚拟电厂的试点，收集虚拟电厂的运行和成本信息，完善规划流程和必要的监管框架。据报道，‘十三五’期间，江苏、上海、河北、广东等地相继开展了电力需求响应和虚拟电厂试点⁵。此外，国家电投集团等研发的虚拟电厂已经在多地上线，完成了“虚拟电厂+电力需求响应”、“虚拟电厂+电力辅助服务”和“虚拟电厂+电力现货”3 项基础功能试验，并逐步进入商业化运行阶段⁶。电力规划部门应通过收集和分析各类虚拟电厂运行信息来提高规划的准确性，并建立必要的监管框架，保障资源充足和电网可靠性。
- 建立监管框架以确保符合标准的虚拟电厂在接入电网和调度时不受到歧视。

建议2：把虚拟电厂纳入电网投资规划

随着发电和电网技术的发展，电力公司越来越多地可以通过采用非电网替代方案 (Non-Wires Alternative)——包括太阳能光伏、储能、能源效率和需求响应等分布式能源组合等经济高效的方式——来满足客户不断增长的电网需求，从而减少其系统基础设施投资。根据专家的成本计算，需求侧响应是增加电网灵活性成本最低的方式之一⁷。

在电网投资规划的过程中，我们建议：

- 在电网公司规划电网投资时，应将虚拟电厂作为“非有线解决方案”进行投资评估，在成本更低时，让虚拟电厂代替电线杆、电线和变电站的投资。考虑电网投资时，也应考虑电网建设的环境和社会成本。
- 建立节点价格机制(Nodal Electricity Pricing)，让现货市场产生的电网节点价格引导传统电网和虚拟电厂投资。输电网传输能力作为一种稀缺资源，其稀缺程度可以通过节

⁵ 经济日报 (2022). 虚拟电厂意在推动能源绿色转型. 国家能源局. http://www.nea.gov.cn/2022-07/15/c_1310642169.htm

⁶ 北极星电力网 (2022). 国内首个虚拟电厂参与电力现货市场获得盈利. 北极星火力发电网. <https://news.bjx.com.cn/html/20220608/1231324.shtml>

⁷ 自然资源保护协会 (2022). 电力系统灵活性提升：技术路径、经济性与政策建议. <http://www.nrdc.cn/information/informationinfo?id=307&cook=2>

点电价反映 — 节点价格能够反映电能在不同时刻，不同地理位置的价值，体现电力生产和电网传输的稀缺程度，因此可以为电力资源的优化配置和电网建设提供价格信号。在美国，节点价格通常包含系统边际发电成本，边际阻塞成本，和边际电损成本⁸，广东现货节点价格包含系统边际发电成本和边际阻塞成本。⁹ 节点电价在现货市场中实时波动，向发电商和客户发送准确的价格信号，告知他们何时何地电力便宜或昂贵。市场参与者受益于透明的实时数据，从而做出可靠的投资决策—包括对需求侧响应资源和虚拟电厂的投资，提高创新、效率、可靠性和市场流动性。

建议3：制定虚拟电厂参与电力市场的模式和规则

虚拟电厂统筹优化其系统内资源，比如分布式和需求侧资源，作为一个“电厂”发挥功能和提供服务。根据不同类型的虚拟电厂所具有的技术特性，它们应该被鼓励参与相应的市场，与传统能源进行公平竞争，充分发挥虚拟电厂的价值，尽快回收投资成本。这些电力市场包括中国将要建设的电力容量市场、中长期交易市场、日前和日内电能量市场（包括金融合同）、调频辅助服务和备用市场、发电权和输电权交易市场等等。图2展现了各类电力市场进行的时间序列。

图2：电力市场类型的时间序列



在这里，我们着重讨论虚拟电厂参与现货电能量市场的模式和规则。现货市场通常包含日前和日内/实时市场，广义上来说也可以包含辅助服务市场。现货市场通过集中竞价交易产生市场出清价格，在一个竞争充分的现货电能量市场中，市场出清价格应该反映系统的边际发电成本。在“全国统一电力市场”的政策下，统一现货市场是最重要的一步，而这对

⁸ ISO New England. FAQs: Locational Marginal Pricing. <https://www.iso-ne.com/participate/support/faq/lmp>

⁹ 南方能源观察(2018). 【重磅】全国首个现货市场规则征求意见，参与设计者独家解读. 碳交易网. <http://www.tanjiaoyi.com/article-24693-2.html>

虚拟电厂的发展也会很有帮助，因为一个统一的现货市场可以让虚拟电厂发挥其灵活性价值，实现其削峰填谷和消纳新能源的经济价值。

对于虚拟电厂参与现货市场交易，我们建议：

- 现货市场应为市场参与者提供一个公平且充分的竞争环境，让每一种技术发挥其价值，包括电容量，电能量，和系统平衡等辅助服务价值，并得到公平合理的市场价格补偿。国际上，2020年，FERC发布了一项指令，要求美国区域电力市场制定参与模式，允许分布式能源资源，包括需求响应，以直接或者聚合的形式参与任何一个批发市场的细分市场¹⁰。类似地，2019年的欧洲法令要求监管机构明确向需求响应开放所有电力市场，作为“以最具竞争力的价格确保电力供应”的部分举措，并通过清洁能源一揽子法案为欧洲成员国制定了实施需求响应的共同框架。¹¹
- 消除或降低现货市场对虚拟电厂的最低容量限制，以鼓励虚拟电厂参与市场竞争。并且，由于虚拟电厂作为一个平台可以通过添加新的资源不断扩展容量，现货市场的模型应考虑到这点并制定相关规则。
- 制定和发布虚拟电厂在辅助服务市场中的准入要求的交易规则，尤其是辅助服务市场所需的对电厂的控制和遥测要求，以指导虚拟电厂的技术开发和应用。江苏省和广东省已发布分布式发电市场交易规则，可以作为虚拟电厂和其它省份的参考。¹²

建议4：确保虚拟电厂得到合理和公平的经济价值补偿

在市场化电力系统中，价格是一个指导电力资源投资和退役的重要信号。如果预期的市场收益足够高，足以支付新资源的总固定成本和可变成本，市场就会发出对该资源投资的信号。如果预期的市场收入不够高，不足以支付资源的未来成本（即，固定的运营和维护成本，税收，可变成本），市场就会发出淘汰该资源的信号。因此，确保资源的合理组合（尤其是对新技术的投资）需要合理和公平的市场价格。这里所说的市场包括我国未来即将建设的容量市场，中长期交易市场，发电权交易市场，现货电能量市场，调频辅助服务

¹⁰ 美国联邦能源监管委员会第2222号令: <https://ferc.gov/media/ferc-order-no-2222-fact-sheet#:~:text=FERC%20Order%20No.%202222%20will%20help%20usher%20in>

¹¹ Article 13 of European Directive 2019/944.

¹² 北极星风力发电网 (2019). 《江苏省分布式发电市场化交易规则（试行）》发布! <https://news.bjx.com.cn/html/20191211/1027715.shtml>.

绿色电力交易 (2018). 广东省分布式发电市场化交易试点规则大纲（征求意见稿）. 北极星售电网. <https://news.bjx.com.cn/html/20180329/888516.shtml>.

市场，期货和金融输电权市场等等。

对于确保虚拟电厂得到合理和公平的经济价值补偿，我们建议：

- 在确保供给侧没有市场力（也就是竞争充分）的前提下，放宽现货市场价格上限，允许“稀缺性定价”释放价格信号，引导虚拟电厂和需求侧响应的进一步投资。“稀缺性定价”是指在系统紧张，供应稀缺或需求旺盛（或三者兼而有之）的情况下，价格可能会大幅上涨。虽然这些高价时期可能相当罕见，但它可以激发经济调度，激励对适当的灵活性资源的投资--包括储能、需求响应和燃气发电，并刺激非必要的、非灵活性资源的退役。
- 鼓励符合要求的虚拟电厂参与到合适的电力市场，与传统能源进行公平竞争，充分发挥其技术价值，尽快回收投资成本。
- 鼓励虚拟电厂参与绿色证书交易、绿色电力交易和碳排放交易。中国现在已有绿证交易、绿电交易、碳排放权交易三类市场¹³，而虚拟电厂的环境效益（低排放或零排放的电能量）可以通过参与这三个市场的交易来得到补偿。每个虚拟电厂应得到和自己电源能力相匹配的碳排放权。
- 在虚拟电厂发展的最初几年可以考虑通过补贴、减税，和可再生投资组合标准来鼓励技术发展和产业投资，但在技术发展较为成熟后应取消政府补贴。同时，我们建议政府尽快取消对传统能源发电的政策补贴，包括对利用小时和上网电价的保护。

结论

“十四五”时期是能源低碳转型的重要窗口期，可再生能源将进入高质量跃升发展新阶段，必须加快构建新型电力系统，全方位提升系统灵活性，促进可再生能源大规模、高比例、市场化、高质量发展。虚拟电厂作为实现智能电网的重要技术之一，其价值应该被充分认可和评估，让其在电力市场中发挥优化配置资源，提高新能源消纳的作用。

本文提出了几点不成熟且不全面的政策意见，包括（1）把虚拟电厂纳入电力投资规划，公平对待虚拟电厂与传统能源的竞争，力求用最低的社会成本（包括与温室气体排放和健康影响相关的成本）满足电力需求和实现“双碳”目标；（2）把虚拟电厂纳入电网投资规

¹³ 人民日报海外版 (2021). 绿证交易、绿电交易、碳排放权交易——三类市场共同推进“双碳”目标 .
<http://www.xinhuanet.com/energy/20211027/1196a7bdecd9433399b9d5459b50df32/c.html>

划，对其作为“非有线解决方案”进行投资评估，让现货市场产生的电网节点价格引导传统电网和虚拟电厂投资；（3）制定虚拟电厂参与电力市场的模式和规则，允许和鼓励虚拟电厂参与到合适的电力市场，降低市场准入门槛，让虚拟电厂发挥其所有的技术价值，包括电容量，电能量，和系统平衡等辅助服务价值，并得到市场价格的补偿；以及（4）确保虚拟电厂得到合理和公平的经济价值补偿，在确保供给侧竞争充分和市场力监管足够的前提下，取消或放宽现货市场价格上限，允许“稀缺性定价”释放价格信号，引导虚拟电厂和需求侧响应的进一步投资。同时,尽快取消政府对传统能源发电的政策补贴，包括对利用小时和上网电价的保护。



RAP[®]

Energy Solutions for a Changing World

Regulatory Assistance Project (RAP)[®]

Belgium · China · Germany · India · United States

CITIC Building, Room 2504

No. 19 Jianguomenwai Dajie
Beijing, 100004

中国北京市建国门外大街 19 号

国际大厦 2504 室

邮编: 100004

raponline.org

© Regulatory Assistance Project (RAP)[®]. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial License (CC BY-NC 4.0).