

促进虚拟电厂保供与新能源消纳的政策体系研究

以美国加州为例

高驰

睿博能源智库

引言

伴随着极端天气频发，电力系统的稳定运行不断面临挑战。今年夏季，美国东部地区遭受了极端热浪侵袭，纽约、华盛顿、费城等地最高气温接近40度¹。作为东部地区主要电网运营方之一的PJM，于6月24日观测到了近161吉瓦的峰值负荷，逼近其历史最高记录165吉瓦²。幸运的是，此次热浪虽来势汹汹，但并未造成大规模停电事故。

在此次PJM电网辖区的极端热浪中，虚拟电厂为电网平稳运行提供了关键支持。例如，虚拟电厂聚合商EnergyHub在6月24号负荷高峰期，通过调度超过一百万台设备，合计削减了900兆瓦峰值负荷，并将近3.5吉瓦时的电量转移出高峰用电时段。此外，Sunrun和Uplight两家聚合商也分别通过居民侧储能和可调节负荷，各自削减了340兆瓦和350兆瓦的尖峰负荷³。虚拟电厂的实践表明，其通过有效缓解电网峰值压力，充分展示了分布式资源聚合在应对极端气候挑战、提升电力系统韧性中的战略价值。

¹ Martucci, B. (2025, July). Virtual power plants helped save the grid during heat dome. Utility Dive. <https://www.utilitydive.com/news/virtual-power-plants-helped-save-the-grid-during-heat-dome/753247/>

² PJM Inside Lines. (2025, June). June 24 Update: Maximum Generation Alert Extended to June 25. <https://insidelines.pjm.com/june-24-update-maximum-generation-alert-extended-to-june-25/>

³ Sunrun Inc. (2025, June). Sunrun Dispatches More Than 340 Megawatts of Power in Single Evening to Support the Grid from Coast to Coast. <https://investors.sunrun.com/news-events/press-releases/detail/344/sunrun-dispatches-more-than-340-megawatts-of-power-in>

除应对极端天气之外，虚拟电厂作为电力系统的重要组成部分，已在国内外获得了广泛认可。

《关于加快推进虚拟电厂发展的指导意见》（发改能源[2025] 357号）作为具有里程碑意义的重大政策文件，不仅规范了虚拟电厂的定义和定位，更进一步强调了虚拟电厂的多维价值及其多元商业模式创新，为行业持续、健康发展指出了关键方向。

357号文同时明确了虚拟电厂的功能定位：“虚拟电厂对增强电力保供能力、促进新能源消纳”等方面具有重要作用。类似的表述在其它国家的相关政策中亦有体现。然而，放眼全球，虚拟电厂的商业化发展仍面临挑战，其保供、促消纳等能力尚未完全转化为可持续、可复制的发展路径。许多项目仍依赖专项资金支撑；而常态化、市场化的运营机制尚待完善，亟需建立一套将虚拟电厂多元价值与其收益能力直接挂钩的系统性政策体系。

当前，尽管虚拟电厂作为新兴主体在相关政策制定和市场参与中仍处于不断进行探索和演进的阶段，但也出现了一些值得参考的前沿案例。例如，2022年的市场调查显示，加州虚拟电厂项目已占全美市场份额近四分之一⁴，其部分经验及挑战有着借鉴价值。本文将以加州为实例，解析其相关政策如何鼓励虚拟电厂在保供和新能源消纳等多元场景下释放更大价值。

激活虚拟电厂的保供能力

根据美国能源部（DOE）的分析，容量价值占虚拟电厂所提供价值的七成，也将成为其未来主要收益来源之一⁵。对于高比例可再生能源的电力系统而言，充裕的容量对于系统安全和韧性至关重要；但未来随着可再生能源渗透率的不断提高，火电的利用小时数将不断降低，容量成本将持续升高。若传导到用户侧，更会推高用电价格。相比之下，虚拟电厂以聚合分布式资源的方式，能够灵活、高效地满足高峰负荷需求，在提升系统可靠性的同时，实现成本最优化。

例如，美国能源部的另一篇报告指出，虚拟电厂在作为容量资源时展现出较传统电力设施更高的经济性。满足400兆瓦容量需求时，虚拟电厂的年化成本约为43美元/千瓦，仅为尖峰气电站的99美元/千瓦的一半不到⁶。当然，中美在供应链、市场环境、以及相关政策上存在显著差异，因而具体成本比较还需结合实际情况加以分析。

从实际操作层面，虚拟电厂的容量价值以及收入保障，需依赖完整的规划流程与绩效支付。以加州CAISO为例：

⁴ Thomson, M. Mon, H.M., Boba, C., Juárez, A. & BIG Partnership . (2023). *California dwarfs all other VPP markets in North America*. Wood Mackenzie. <https://www.woodmac.com/press-releases/california-dwarfs-all-other-vpp-markets-in-north-america/#:~:text=housing%2024%25%20of%20projects%20in%20the%20region>

⁵ Downing, J., Johnson, N., McNicholas, M., Nemtsov, D., Oueid, R., Paladino, J. & Bellis Wolfe, E. (2023, Sep.). *Pathways to Commercial Liftoff: Virtual Power Plants*. <https://kevinikircher.com/wp-content/uploads/2025/03/DOE-LPO-VPP-Liftoff-2023.pdf>

⁶ Razdan, S., Downing, J. & White, L. (2025, Jan). *Pathways to Commercial Liftoff: Virtual Power Plants 2025 Update*. https://12cf57a2.delivery.rocketchdn.me/wp-content/uploads/2025/02/LIFTOFF_DOE_VirtualPowerPlants2025Update.pdf

1. 规划：资源充裕度分析及综合资源规划

加州CAISO每年开展资源充裕度分析(Resource Adequacy Assessment), 结合负荷预测、气象、发电等数据, 对未来一年中每个小时资源充裕度开展建模分析, 并将全域的资源充裕度目标分解至各个负荷区。

随后, 各负荷区内的供电企业在综合资源规划(Integrated Resource Planning, IRP) 中, 根据分解目标规划下一年度所需采购的容量资源。值得注意的是, 考虑到供电企业采用传统发电资源满足资源充裕度的惯性, 监管部门要求供电企业在规划制定时, 必须优先考虑到能效和包括虚拟电厂在内的需求侧资源⁷。综合资源规划经加州监管部门CPUC批准后, 容量资源便可通过双边合同的方式直接采购, 容量资源相应从供电企业获得年度/月度容量补偿。

该规划流程通过明确分解目标、强制能效和需求侧优先, 并引入常态化采购机制, 有效为各类容量资源创造了直接的市场激励和稳定的收益预期。尤其是将虚拟电厂等需求侧资源纳入容量采购范畴, 不仅畅通了其市场参与路径, 也显著降低了制度性惯性阻力, 为新型容量资源更好地承担保障责任和获得合理收益打下坚实基础。

2. 实际调用和绩效支付

为确保容量资源的可靠性, CAISO要求资源在其承诺的可用时段内, 必须在日前和实时电能量市场中提交投标。一旦中标并被调度, 该资源需按照合约容量及时履约交付义务。实际履约情况也会直接影响容量资源的经济回报: 若电能量市场中的投标低于合约容量, 相关资源需要按比例缴纳违约金。上述机制确保容量资源的可靠性与市场激励高度挂钩, 有效提升虚拟电厂和其它资源的保供能力。

简而言之, 以上流程可以分为四步:

- 通过资源充足性规划明确各负荷区每小时的容量需求⁸。
- 通过年度滚动的竞争性容量补偿机制, 为虚拟电厂、储能、火电站等多元容量资源打造公平竞争的平台以及稳定、可预测的需求⁹。
- 中标的容量资源需在目标时段内(如夏季高峰时期的下午4-9点, 即加州一天中净负荷爬坡最高的时段)参与日前市场及实时市场。该目标时段通常按季度或月份设定, 并集中在资源充足性规划预测的系统高风险时段, 而非全年的每一小时。
- 调度后根据调度实际履约表现与中标容量的差值进行考核, 并据此调整容量补偿。

⁷ California Public Utility Commission, Energy Resources Conservation and Development Commission, Consumer Power and Conservation Financing Authority. (2003, May). *Energy Action Plan*. [https://www.cpuc.ca.gov/-/media/cpuc-website/files/uploadedfiles/cpuc_public_website/content/utilities_and_industries/energy - electricity and natural gas/2003-energy-action-plan.pdf](https://www.cpuc.ca.gov/-/media/cpuc-website/files/uploadedfiles/cpuc_public_website/content/utilities_and_industries/energy_-_electricity_and_natural_gas/2003-energy-action-plan.pdf)

⁸ 关于如何进行资源充足性规划, 睿博能源智库在2023年与加州大学圣地亚哥分校以及华北电力大学的团队对东北电网的冬季资源充足性进行了分析。详见<https://emtracker.org/zh-hans/research/2022-2023%E4%B8%9C%E5%8C%97%E8%BF%8E%E5%B3%B0%E5%BA%A6%E5%86%AC%E5%88%86%E6%9E%90%E6%8A%A5%E5%91%8A-%E5%AA%92%E4%BD%93%E7%AE%80%E6%8A%A5/>

⁹ 详见王轩. (2024). 建立以资源充足性规划为基础的容量补偿机制. <https://www.raponline.org/knowledge-center/resource-links-to-capacity-payment/>

除了将虚拟电厂纳入加州的综合资源规划以及容量采购框架，加州自2022年以来还推出了专门针对需求侧的电网支持项目(Demand Side Grid Support, DSGS)。该项目鼓励商业和居民用户利用电池储能、备用发电和能耗调节，经虚拟电厂聚合后，在每年五月至十月电网高峰期或极端气候事件时，通过减少用电或向电网回送储存电力，辅助电网稳定运行并降低停电风险。参与者可获得有竞争力的经济奖励，项目规模已达500兆瓦以上，累计逾26万用户参与。

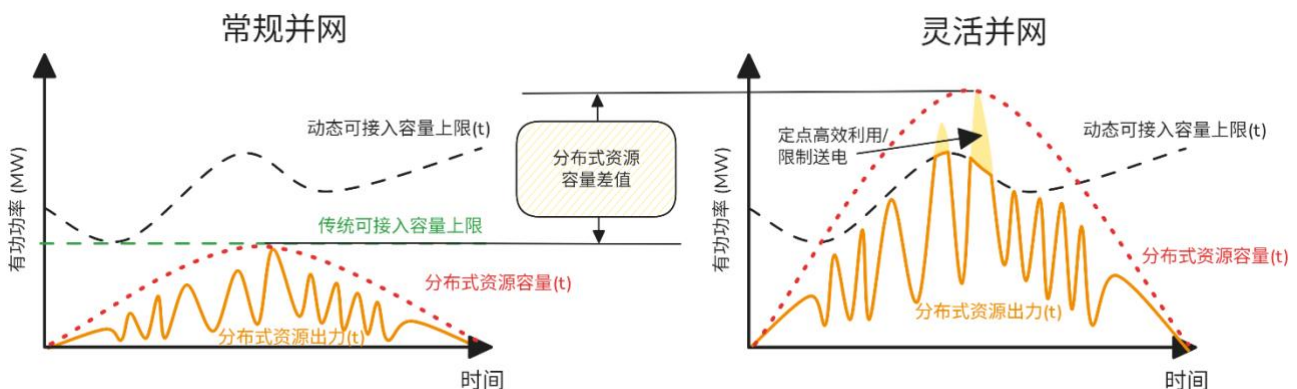
利用虚拟电厂缓解配网消纳难题

目前，分布式可再生能源的消纳已成为亟需破解的难题。其中，配电网的承载能力是影响分布式能源接入电网的主要瓶颈之一。我国现行《分布式电源接入电网承载力评估导则》(DL/T 2041-2019)，通过评估反向负载率、电流，电压偏差，以及谐波含量等指标，将评估区域的承载力划分为绿色、黄色、以及红色¹⁰。据统计，截至2024年12月初，已有11省超450个地区被划为分布式光伏“红区”，超出可承载范围的项目的审批被全面暂停¹¹。

现阶段，可承载范围的确定主要依据配电网最大承压能力，只要一年中任何时刻存在超出承载上限的可能，即会放缓甚至停止分布式电源接入审批。新增分布式电源项目须等待配电侧扩容后方可继续接入。

虚拟电厂则可以通过数字化手段升级分布式资源的响应能力，使其成为可观、可测、可调、可控的灵活资源，与储能、可调节负荷协同，实现最大化自发自用。具体而言，对分布式资源实施智能控制，不仅能缓解高峰期余电上网对配电侧的压力，更能提升配网资源利用效率，促进更多分布式能源项目的安全接网。

图表1. 采用余电上网曲线前后的分布式电源发电容量及配电承载力对比¹²



¹⁰ 国家能源局. (2019). 分布式电源接入电网承载力评估导则. <http://www.js.sgcc.com.cn/html/files/2025-06/05/20250605181228763716364.pdf>

¹¹ 新能源正前方. (2025). 分布式光伏，2025年堕入深渊. <https://solar.ofweek.com/2025-02/ART-260001-8420-30657089.html>

¹² 图表经笔者改编并重新绘制，资料来源: US Department of Energy. (2024). DER Flexible Interconnection Strategies and Approaches. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-08/Flex%20IX%20Webinar-%20combined%20slides.pdf>

加州在2024年出台了一项新规定，引入了分布式资源余电上网曲线(Limited Generation Profiles, LGP)¹³。该规定允许在不进行配电网扩容的情况下，通过配置储能、电气化、可控限制发电等方式预先规定新接入分布式电源余电上网的曲线，确保其回送电量始终控制在配电网承载能力范围之内。

此外，配电网的承载力并非静止不变的。其大小不仅取决于配电侧的基础设施，还受到当前负荷水平等运行条件影响。负荷增加时，配电网能吸收更多分布式资源的电力，因而承载能力也随之提升。实际承载力会随着季节、甚至更短时段的负荷、可再生能源出力等多种因素而波动。为更好地适应这种季节性和时段性的变化，新规定允许合规分布式电源根据季节（或月度）使用智能逆变器灵活调整余电上网曲线，在承载力更高的时段提高余电上网的回送量，而非简单地“一刀切”禁止新项目接网。

这一规定无疑为虚拟电厂的运营和创新提供了更广阔的空间。余电上网曲线的调节，不仅仅可以通过简单的弃电方式实现，更可以借助虚拟电厂对用户侧分布式资源的智能调配、负荷弹性、电气化协同和能效升级等多元措施，在用户端高效利用无法回送至电网的电量。例如，虚拟电厂可以通过整合储能设备、电动汽车充放电，从而提升自发自用的比例，最大化系统整体价值。

类似的做法在智能电网领域并不陌生，不过目前主要集中在工业园区以及源网荷储一体化等试点和科技项目中，尚未在更广泛层面实现常态化推广。而余电上网曲线的机制可以为消纳“红区”等分布式资源接网受限的省份和地区提供了可行且高效的解决方案。不仅可以在一定程度上规避配电侧容量瓶颈的限制，还能进一步促进分布式资源规模化发展和高质量接入。

从政策上来说，若要将余电上网曲线以及灵活接网更广泛地应用于各地，可以考虑以下几点：

1. 在《分布式光伏发电开发建设管理办法》（国能发新能规[2025] 7号）中，对于“自发自用余电上网”的用户，允许采用余电上网曲线的方式灵活接入电网。
2. 推动建立并完善动态配网承载力发布机制。参照《关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》（发改能源[2024] 187号）中，在“系统开展新能源接网影响分析，评估配电网承载能力，建立可承载新能源规模的发布和预警机制”的基础上，进一步鼓励电网公司公开季度甚至月度动态承载力数值，提高并网过程透明度、便利度。
3. 通过更广泛的分布式电源灵活接网政策，依托虚拟电厂或能源综合管理服务公司，在配电侧紧张时段最大化用户侧的自发自用比例，为可再生能源的深度消纳释放更大空间。

¹³ California Public Utilities Commission. (Mar. 2024). *Resolution E-5296: Approving in part and modifying Pacific Gas and Electric Company's, Southern Edison Company's, and San Diego Gas & Electric Company's Advice Letters, providing the specifics and process of Limited Generation Profiles.* <https://docs.cpuc.ca.gov/PublishedDocs/Published/G000/M527/K828/527828730.PDF>

结语

虚拟电厂已成为全球电力行业创新与转型的重要课题，受到各国政府、研究机构和产业界的高度关注。尽管理论和市场预期层面赋予了虚拟电厂广泛的价值——包括保供、消纳、灵活调度等多元场景——但其大规模落地仍依赖创新且可持续的政策支持。不同国家和地区虚拟电厂的政策选择仍在深入迭代，商业模式和激励机制尚待完善。

本文以加州为案例，梳理了虚拟电厂在保供及新能源消纳方面的实践经验。为激活其保供能力，需将虚拟电厂明确纳入容量资源的整体规划和采购流程，通过容量市场及补偿机制为其创造稳定、可预期的收益。与此同时，应加强绩效考核与市场准入标准，激励高质量虚拟电厂持续向系统提供可靠容量资源。

另外，应系统推动分布式电源余电上网曲线优化和灵活接网政策的全面实施，鼓励电网企业发布各地接入承载力的动态信息，提升接网透明度和灵活性。同时，考虑推动虚拟电厂与能源综合服务公司等多方深度协同，强化用户侧智能化能源管理，持续提升分布式电源的深度消纳能力。



Regulatory Assistance Project (RAP)®
Belgium · China · Germany · India · United States

CITIC Building, Room 2504
No.19 Jianguomenwai Dajie
Beijing, 100004

+86 10 8526 2241
china@raponline.org
raponline.org

中国北京市建国门外大街 19 号
国际大厦 2504 室
100004