可再生能源消纳：加州与山东的比较分析

Utilization of renewable energy: A comparative analysis between California and Shandong

■文 / 贾璨 祁加荣

第二十八届联合国气候变化缔约方大会（COP28）于2023年11月30日正式开幕。大力发展可再生能源是本届大会的重要目标之一。根据中美《关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明》，两国支持二十国集团领导人宣言所述努力争取到2030年全球可再生能源装机增至三倍。这些都是可再生能源行业的利好机遇。本文介绍美国可再生能源发展领头羊加利福尼亚州（以下简称加州）的经验，为我国山东省等可再生能源发展大省提供参考。

山东省是我国风光装机的第一大省，其可再生能源的消纳是重点关注问题之一。2023年“五一”期间，山东出现的负电价反映了“风光”大发导致的电力供应阶段性过剩，同时可再生能源的大规模并网导致电网负荷变化更加显著，给电网的安全稳定运行带来严峻挑战。

美国加州通过提高系统预测能力、加强区域电网互联和完善电力价格机制等措施，在提高可再生能源并网率的同时保障了电力系统的安全稳定运行，相关经验可

供山东等可再生能源大省参考。

一、山东与加州的相似之处

山东与加州在可再生能源发展上有许多共同之处。首先，两者都位于阳光充足的地区，且拥有较长海岸线，为“风光”的开发创造了有利条件。其次，两者在工业化和城市化上都走在各自国内的前列，为可再生能源消费提供了广阔的市场。此外，无论是山东还是加州，都在政策上对可再生能源发展给予了大力支持。加州是美国可再生能源发展的领头羊。山东可借鉴加州经验，更快地推进可再生能源的高质量发展。

加州以光伏发电为代表的可再生能源发展迅速。2022年，加州的可再生能源（不含大水电）装机为2800万千瓦，约占总装机的34%；发电量约占总发电量的36%，其中49%来自光伏。加州的电力消费主要集中在商业和居民生活领域，大部分发生在18:00—23:00时段。由于用电高峰与光伏发电高峰明显错配，加州电力净负荷呈“鸭型曲线”，尤其是午间时段净负荷连续多年下跌至近零值，光伏消纳已成为加州可再生能源进一步发展的一大挑战。

山东面临相似的挑战。山东可再生能源装机规模约为加州的3倍。截至2023年6月底，山东可再生能源装机达到8124万千瓦，约占总装机的41%；发电量约占总发电量的26%，其中光伏发电量占比50%，与加州的水平相当。

二、加州可再生能源的消纳经验

为应对可再生能源电量的增加对电力系统安全性和经济性带来的挑战，加州采取的主要措施包括：

1. 提高可再生能源出力预测能力

加州电力调度中心（CAISO）成立了一个跨学科的专家团队，包括统计学、数学、经济学、数据科学、电气工程和气象方面的专家，以温度、云层、风向风力等多维度气象数据为基础，将集中和分布式可再生能源、储能资源、电车充电以及其他灵活性资源纳入考量范围，开发了一套精细化的电力出力及需求预测系统。

在这套系统的帮助下，加州的风光发电目前预测平均绝对误差仅为4%—6%，而我国平均误差约为10%—20%，亟须提高预测水平。通过提高可再生能源出力预测水平，可以帮助电网提前做好调度计划，在日前市场解决绝大多数调峰需求。

2.实时跨区电力交易

通过西部能源不平衡市场（Western Energy Imbalance Market，WEIM），CAISO与其他电力调度中心进行实时电力交易，解决了一部分可再生能源消纳的问题。WEIM是CAISO实时市场的延伸，有15分钟及5分钟两种结算模式。当某个区域的电力供需失衡时，WEIM会自动发出信号，并通过实时市场寻找其他区域的电力供应或需求。

CAISO一般在可再生能源发电较少的夜间通过WEIM调入电力，在可再生能源发电较多的日间调出电力。以2022年为例，CAISO向其他电力调度中心的调入和调出电量分别为131亿千瓦时和133亿千瓦时，分别占加州2022年总发电量的6.7%和6.8%。

通过WEIM的日间电力调出，加州扩宽了光伏等可再生能源消纳的渠道。同时，也为其他互联地区的电力结构清洁化做出了贡献。自2014年11月启动以来，截至2023年4月，WEIM为市场各方创造了34亿美元以上的总收益，降低碳排放75万吨。

3. 发挥电价机制的作用

在零售侧，加州充分发挥了价格在需求响应中的信号作用，鼓励用户在可再生能源大发时多用电。三

探寻大自然的神秘与美丽　李丽川 / 摄

大主要公共事业公司为用户提供了多样化的分时电价套餐:(1)基于价格的需求响应:如分时电价;(2)基于激励的需求响应:如可中断电价、自动需求响应(Auto-DR)、容量投标项目(Capacity Bidding Program, CBP)等。

此外,为了提高绿电使用比例,促进可再生能源消纳,加州还推行了零售选择计划(Retail Electricity Choice Programs),允许用户绕过三大公共事业公司选择电力供应商,而三大公共事业公司仍旧提供输电、配电服务。具体有两种模式:(1)社区选择汇总(Community Choice Aggregation):允许政府机构成为其辖区的默认能源供应商,让社区可以更直接地参与能源决策,如使用更多的绿电。2021年加州州内已有约30%的用户选择该模式。(2)直接接入(Direct Access):允许工商业客户直接通过电力服务商(Electric Service Provider, ESP)购买电力,客户通常可以享受比传统公共事业公司更优惠、绿电比例更高的电价方案。

三、对山东可再生能源消纳的建议

根据《山东省能源发展"十四五"规划》和《山东省建设绿色低碳高质量发展先行区三年行动计划(2023—2025年)》等政策文件,到2025年,山东省可再生能源装机量预计将达到9000万千瓦,非化石能源电量在全社会用电量中的占比预计达到13%。为助力山东建设新型电力系统,提高对高比例可再生能源的消纳,根据自然资源保护协会(NRDC)与合作伙伴的研究,并结合山东电力市场特点和加州经验,提出以下建议:

1. 提高系统预测能力

提高可再生能源出力的预测精度,特别是量大面广的分布式光伏,把握各种时间和空间尺度下的出力特性和规律,从源头上减轻高比例可再生能源对电力系统造成的压力。

不同于加州可以利用启停快、易调控的气电来提升电力系统灵活性,山东电力调峰主要依靠煤电,需要更长时间响应负荷变化,因此更需要精确的可再生能源出力预测,优化日前市场和日内市场的价格信号,统筹可再生发电、负荷需求和储能设施之间协同,促进就地消纳。

为此,应着重发展预测技术,建立分布式微气象站,引入网格化模型,整合多源数据,并运用人工智能、机器学习和大数据分析,考虑时空特征,优化运营模式,以提高预测准确性。同时,推动风光并重,完善海上风电产业链,加快四大清洁能源基地建设,促进可再生能源组合多样化。

2. 加强省际互济

进一步规范和完善"外电入鲁"清洁化发展的顶层规划,考虑在中长期协议中划定外省可再生能源输送时段,尽可能与省内可再生能源消纳困难时段错峰,推动送受两端协同运行,增强区域电网协调机制及跨区域响应能力。如通过完善省际联络线调峰互济支援机制,通过区域辅助服务市场优化外送电曲线,提升可再生能源消纳水平。

此外,还应加强山东与其他省(区、市)之间的互通互济,完善省际电力现货和中长期交易体系。2023年3月下旬,利用山东、江苏两省晚高峰时段存在1小时的差异,两省通过对华北送江苏、京津唐送山东两笔年度交易合同曲线的调整,实现了晚高峰时段电力置换10万千瓦。下一步,应进一步完善跨省(区、市)的电力现货市场交易机制,扩大市场主体参与,推进省际电力市场信息披露,探索利用省际电力交易解决可再生消纳问题的可行性。

3. 推进需求侧管理

丰富工业用电峰谷电价选项,进一步鼓励工商业用户主动避峰。不同于加州80%的用电需求主要集中在三产和居民用电,山东的工业用电占比超过70%,为此,应进一步完善工商业用户的分时电价机制,在电价设置上可考虑按季节和峰谷时段划分、企业历史用电量纳入电费定价,让工业企业结合行业特点自主选择生产模式。鼓励工业企业和园区大力利用可再生能源,建设绿色微网,支撑源网荷储一体化的运营模式,同时加快虚拟电厂等需求侧资源在工业场景的试点工作。

此外,提前部署三产和居民用电需求侧管理解决方案。近年来,山东第三产业及居民用电在全省整体用电中的占比逐年上升,应针对居民用电行为进行深入研究和模型预测,进一步拉大峰谷分时电价差距,丰富电价机制,引导用户调整用电行为。推动建立自发自用激励措施,鼓励用户侧安装储能,减少高峰用网电需求。

作者单位: 自然资源保护协会