



电力圆桌
POWER SECTOR ROUNDTABLE



专题报告

长三角虚拟电厂发展现状 分析报告

电力圆桌项目课题组

2023年11月

电力圆桌项目

电力圆桌（全称电力可持续发展高级圆桌会议）项目于 2015 年 9 月启动，旨在紧扣应对气候变化、调整能源结构的国家战略，邀请业内专家和各利益方参与，共同探讨中国电力部门低碳转型的路径和策略。通过建立一个广泛听取各方意见的平台机制，电力圆桌将各方关心的、有争议的、目前决策困难的关键问题提交到平台讨论，选出核心问题委托智库开展高质量研究，并将研究成果和政策建议提交到平台征求意见，从而支持相关政策的制定和落地，推动中国电力行业的改革和可持续发展，提高电力行业节能减排、应对气候变化的能力。

报告编写人员

苏州中咨：许相敏、程环宇、薛会、郭凤凤、徐璐、庞锐晰、郝梦婧

感谢自然资源保护协会对报告提出的意见和建议

项目课题组



苏州中咨成立于1994年，是中国国际工程咨询公司的控股子公司，是长三角地区重要的综合性咨询机构之一，是国际咨询工程师联合会和中国工程咨询协会会员单位。公司主要面向政府、企业、金融机构等服务对象，提供专业的投资策划、规划咨询、政策研究、评估咨询、管理咨询、全过程咨询等现代咨询服务。已累计承担 5000 多项各类咨询业务，服务区域从长三角拓展到全国绝大多数地区，同时积极响应“一带一路”倡议，咨询服务涉足加拿大、澳大利亚、非洲、东南等海外国家和地区。



自然资源保护协会 (NRDC) 是一家国际公益环保组织，成立于1970年。NRDC拥有700多名员工，以科学、法律、政策方面的专家为主力。NRDC自上个世纪九十年代起在中国开展环保工作，中国项目现有成员40多名。NRDC主要通过开展政策研究，介绍和展示最佳实践，以及提供专业支持等方式，促进中国的绿色发展、循环发展和低碳发展。NRDC在北京市公安局注册并设立北京代表处，业务主管部门为国家林业和草原局。更多信息，请访问：www.nrdc.cn。

长三角虚拟电厂发展现状分析报告

Report on Virtual Power Plant Development Status of
Yangtze River Delta

2023 年 11 月

目 录

- 执行摘要 01
- 1. 长三角地区虚拟电厂发展背景 03
 - 1.1 虚拟电厂基本概念03
 - 1.2 长三角地区电力供需分析05
 - 1.3 长三角地区虚拟电厂政策环境09
- 2. 长三角地区虚拟电厂建设现状与案例分析 11
 - 2.1 上海市虚拟电厂建设现状与案例11
 - 2.2 江苏省虚拟电厂建设现状与案例15
 - 2.3 浙江省虚拟电厂建设现状与案例17
 - 2.4 安徽省虚拟电厂建设现状与案例19
 - 2.5 长三角地区虚拟电厂案例总结21
- 3. 苏州工业园区虚拟电厂建设潜力分析 23
 - 3.1 苏州工业园区资源分析24
 - 3.2 园区虚拟电厂建设资源汇总33
- 4. 研究发展和建议 34
 - 4.1 研究发现34
 - 4.2 发展建议37
- 参考文献 39
- 附录 A 虚拟电厂潜力分析方法..... 40

执行摘要

在推动“双碳”目标实现的背景下，我国可再生能源产业逐步迈向高质量发展阶段，但可再生能源的快速发展和并网也为电网安全带来了新的挑战。虚拟电厂作为智慧能源管理系统，具备综合平衡电力供给侧和需求侧的能力，协调优化电网的稳定性，有效地减轻了新能源发电波动对电网电能质量的负面影响，同时解决了电力供需之间的紧平衡问题。本报告旨在通过调研长三角地区虚拟电厂建设和运行情况，分析该地区虚拟电厂的建设必要性、运营模式、技术特点等，在此基础上初步评估苏州工业园区开展建设虚拟电厂的资源潜力，以期为长三角及其他地区的虚拟电厂建设提供参考。

报告分析显示，长三角地区的电力供需差距明显，凸显了虚拟电厂建设的紧迫性，需要增加电力供给并合理调配需求侧资源；长三角各地虚拟电厂建设类型多样，发展路径主要在需求侧管理基础上实现，在技术上对信息安全、调度优化、快速响应等方面展开创新，如上海和江苏，因需求侧管理起步较早，已率先试点了负荷型虚拟电厂。此外，各地也在不断完善市场机制，积极探索不同的商业模式。例如，浙江首次开展了虚拟电厂参与备用辅助服务市场以及参与电力辅助服务结算的试运行。长三角地区的探索和创新经验为区域和全国虚拟电厂建设提供了借鉴。但该地区仍然存在一些问题有待解决，如分布式能源的协调控制和精准预测能力不足，以及相关政策需要进一步完善等。

报告以苏州工业园区作为案例，重点研究其建设虚拟电厂的必要性和潜力。结合前期研究成果，报告基于苏州工业园区各类电力用户的行业特性和电网负荷特性，分两阶段计算不同领域可调节负荷资源潜力。研究发现，苏州工业园区可调节资源潜力较高，拥有约

22.5 万千瓦可调节负荷资源，以及 13.6 万千瓦分布式光伏和 1.06 万千瓦基站储能资源，对比 2022 年苏州工业园区最高用电负荷 314.8 万千瓦，园区虚拟电厂可建设资源约占最高用电负荷的 11.8%。

为充分发挥虚拟电厂在支持长三角地区电力系统方面的作用，报告建议在政策制定、关键技术、市场机制以及商业模式等方面取得突破：

在政策制定方面，需要进行顶层设计，明确虚拟电厂的定义、范围、发展定位、发展目标以及实施策略，明确各方的职责；建立虚拟电厂的标准体系，消除各类负荷聚合商之间的数据交互壁垒，建立协调一致的多方协作机制和标准。

在关键技术方面，进一步优化虚拟电厂的调控优化、分析预测等核心技术；提高虚拟电厂对不同资源对象的辨识和配置效率，实现海量分布式资源的即插即用，提高异构网络下的通信承载能力；研究考虑虚拟电厂接入的安全校核方法和动态评估技术，加强信息安全防护，提升虚拟电厂运行控制的可靠性和安全性；建设统一的虚拟电厂接入平台，实现各类社会资本投资的虚拟电厂平台按照统一的技术规范标准接入，实现与电网的双向互动，实现省内资源的最优配置。

在市场机制方面，需要研究虚拟电厂多元主体动态定价技术，实现不同类型可调节资源价值的最优分配；完善现货电能市场和辅助服务市场等电力市场的价格发现机制，鼓励可调节资源的灵活响应，以引导虚拟电厂和需求侧响应的进一步投资；此外，需要完善适应虚拟电厂参与的多交易品种和多时间尺度的市场交易体系，为虚拟电厂的市场化运营提供机制支持。

在商业模式方面，鼓励合格的虚拟电厂参与电力市场，与传统能源进行公平竞争，并可参与绿色证书、绿色电力和碳排放交易；可以探索多类型服务，如能源金融和大数据增值等；丰富虚拟电厂的激励机制和政策。

长三角地区虚拟电厂 发展背景

1.1 虚拟电厂基本概念

1.1.1 基本概念

虚拟电厂是将不同空间的可调节负荷、多元储能侧、电源侧等一种或多种资源聚合起来，参与电力系统运行与交易的智慧能源管理系统^[1]。其既可作为“正电厂”向系统供电调峰，又可作为“负电厂”加大负荷消纳配合系统填谷；既可快速响应指令配合保障系统稳定并获得经济补偿，也可等同于电厂参与容量、电量、辅助服务等各类电力市场获得经济收益。下图 1-1 是虚拟电厂平台的架构示意图。

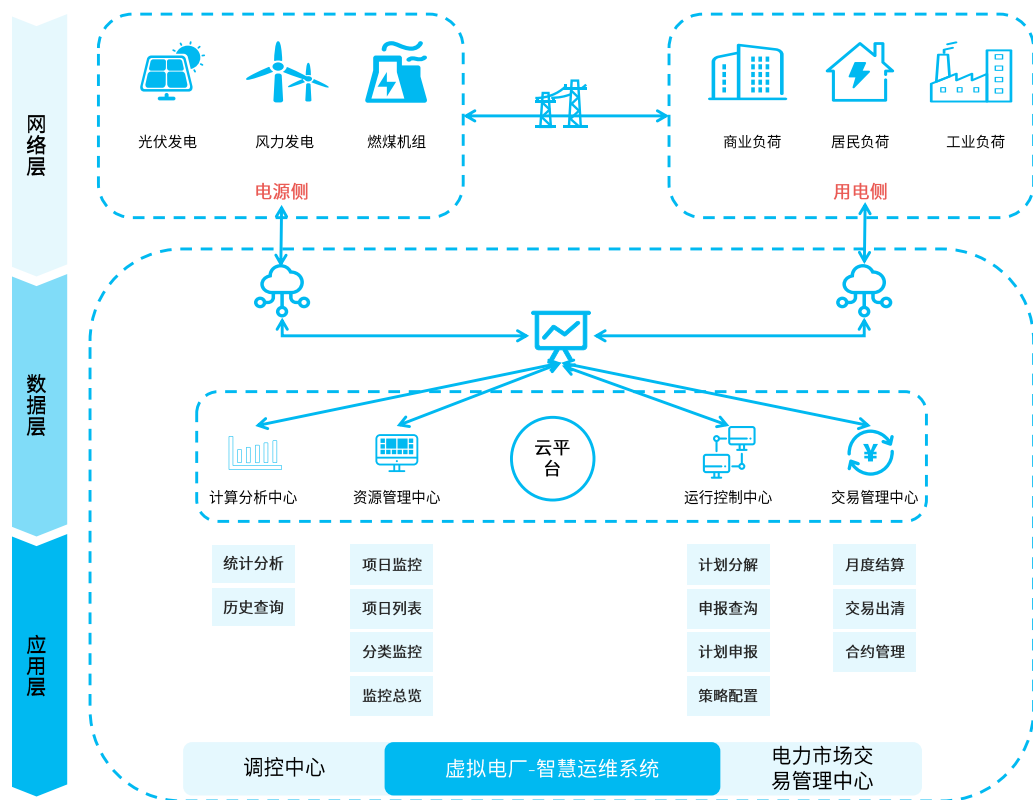


图 1-1 虚拟电厂平台架构示意图^[1]

1.1.2 主要类型

按照聚合资源的不同，虚拟电厂可分为电源型虚拟电厂、负荷型虚拟电厂、储能型虚拟电厂、混合型虚拟电厂等类型。各类型虚拟电厂的特征见下表 1-1。

表 1-1 各类型虚拟电厂的特征^[1]

虚拟电厂	聚合资源	运营模式	出售属性
电源型	风、光等分布式能源	聚合可控、不可控机组（风电、光伏）等资源，通过出售其发出的电源，参与电力还市场交易	强

负荷型	居民用电、写字楼制冷用电等	聚合区域内分散式负荷（如居民用电、工商业负荷）等资源，参与辅助服务市场，实现调频功能	弱
-----	---------------	--	---

虚拟电厂	聚合资源	运营模式	出售属性
储能型	独立储能项目，风、光储一体化项目	聚合不同地点的储能项目，响应调峰、调频需求参与电力辅助服务市场	中
混合型	源网荷储一体化	由可控机组、不可控机组（风光发电）、可控负荷（电动车）、独立储能项目等聚合而成	强

虚拟电厂在不同的发展阶段和应用模式下，可以分为邀约型、市场型和自主调度型虚拟电厂。第一阶段是邀约型虚拟电厂，由各省政府部门牵头组织。在这一阶段，各聚合商共同完成邀约、响应和激励领取。虚拟电厂主要聚合可控负荷资源，参与电力辅助服务市场，盈利主要来自响应补贴，市场化程度较低。第二阶段是市场型虚拟电厂，虚拟电厂与电能量现货市场、辅助服务市场和容量市场的衔接机制成熟。在这一阶段，虚拟电厂聚合商以实体电厂模式参加不同电力市场，获取多样化的收益。虚拟电厂将作为市场主体被纳入各类电力交易市场，其盈利模式更加清晰和多样化。第三阶段是自主调度型虚拟电厂，虚拟电厂能够实现跨空间自主调度。在这一阶段，虚拟电厂的资源聚合进一步扩大，包括微电网和局域能源互联网。虚拟电厂在这一阶段具有更大的自主调度能力和资源整合能力。这一演进过程将有助于虚拟电厂的不断发展和提高其市场化程度。

1.2 长三角地区电力供需分析

由上海、江苏、浙江、安徽“三省一市”组成的长江三角洲（长三角）地区，是改革开放 40 多年来我国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强、吸纳外来人口最多的区域之一。

2022 年，长三角三省一市 GDP 合计约 29.03 万亿元，约占全国 GDP 总量的四分之一。然而，长三角地区能源资源较为匮乏、外部依赖度高，化石能源在能源消费结构中占主导地位，因此该地区能源电力发展面临着供需不平衡、结构待优化等问题。2022 年，上海、江苏、浙江、安徽三省一市发电总装机中的火电装机比重分别为 89.34%、64.6%、55.4% 和 63.48%，火电比重较高，长三角净外调电量为 3231.3 亿千瓦时，约占区域内总消费电

量的 18.2%，安徽省是区域内唯一对外净输出电量的省。根据调研数据显示，2021 年，上海市、江苏省、浙江省的最大峰谷差分别为 1398.67 万千瓦、2900 万千瓦、3436 万千瓦，巨大的峰谷差增加了电网平衡的难度，更凸显了电力系统灵活性调节资源短缺的问题，同时也加大了电力系统的供电保障压力。

长三角地区的能源电力系统面临多重挑战，无法简单地通过传统的粗放方式来解决。迫切需要推进长三角地区的电力生产与消费革命，以构建清洁、低碳、安全、高效的电力体系，以支持该地区的现代化经济体系建设。因此，长三角地区虚拟电厂的建设具有重要意义，它将在未来优化整个长三角地区的能源结构，推动绿色、低碳、创新型发展，发挥关键作用。

1.2.1 上海市电力供需情况

从电量来看，上海市全社会发、用电量均保持稳步增长的态势，全社会发电量从 2016 年的 832.3 亿千瓦时增至 2022 年的 963.44 亿千瓦时，同期全社会用电量则从 1486.02 亿千瓦时增至 1745.55 亿千瓦时，2022 年上海用电量仍存在 782.11 亿千瓦时的电量缺口，外来电占比 44.81%^[2]。

从负荷来看，上海市最大负荷增加的幅度小于本地发电装机的增幅，最高用电负荷从 2016 年的 3138.4 万千瓦增加到 2022 年的 3500 万千瓦，而同期发电装机从 2370.65 万千瓦增加到 2830 万千瓦。尽管上海市本地负荷缺口有所改善，但 2022 年最高用电负荷仍有 19% 的负荷缺口^[2]。

上海市作为典型的人口聚集和负荷密集区域，面临着外来电比例高、本地资源不足的挑战。未来，电力供需平衡的日益紧张，以及物联网通信等技术的进步，为虚拟电厂的发展创造了良好前景。从发电侧来看，上海的可再生能源将以更快的速度发展，可再生能源在上海电力系统中的占比将逐年提升。根据上海能源十四五规划，到 2025 年，上海的可再生能源将占全社会用电量的 36%。与此同时，传统电力供应体系中以煤电为主的化石能源将逐步调整成为调节性资源。从用户侧来看，由于 CO₂ 排放增加和环境气候变化，夏季和冬季出现极端天气的概率增加，电力系统呈现明显的双峰特征，尖峰负荷持续时间将

逐步延长。此外，上海市的电动汽车保有量急剧增长，截至 2022 年，上海市的新能源汽车保有量达到 94.5 万辆，位居全球首位。随着第三产业和居民用电的发展，负荷峰谷差逐年扩大，最大峰谷差达到 48.5%。物联网、信息通信等技术的广泛普及推动商业楼宇、电动汽车、分布式能源、5G 基站等用户灵活资源快速增长。

1.2.2 江苏省电力供需情况

从电量来看，江苏省全社会发用电量均保持增长态势，全社会发电量从 2016 年的 4753.7 亿千瓦时增至 2022 年的 5949.0 亿千瓦时，同时期全社会用电量则从 5459.0 亿千瓦时增至 7399.5 亿千瓦时。具体到各用电领域，2022 年“电气机械和器材制造业”、“信息传输、软件和信息技术服务业”的用电增幅明显，同比增长 21.5% 和 13.8%。截至 2022 年，江苏省本地的发电量仍存在 1450.5 亿千瓦时的电量缺口，外来电占比 19.6%^[3]。

从负荷来看，江苏省统调用电最高负荷的绝对值和增幅均高于统调发电最高负荷，统调用电最高负荷从 2016 年的 8886.2 万千瓦增加到 2022 年的 1.27 亿千瓦，涨幅 43%，同期统调发电最高负荷从 7360.1 万千瓦增加到 9686.2 万千瓦，涨幅 32%。可见江苏省本地用电最高负荷缺口增大，从 2016 年的 1526.1 万千瓦增至 2022 年 3001.2 万千瓦^[3]。

江苏电力供需矛盾突出，未来供电缺口将持续存在。2022 年迎峰度夏期间，江苏全网的调度用电最高负荷是 1.3 亿千瓦，同比增长 14.04%。迎峰度夏期间，最大负荷破亿天数 56 天，负荷破亿时长达 837 小时。同时，江苏的海上风电、光伏装机容量高，“十四五”末预计新能源装机达 9000 万千瓦，占总装机比超过 43%，但核心出力相对较低。到“十四五”末，即使建苏直流高端投产、雁淮直流满送，以及区外受电稳步提升（最大超 3200 万千瓦），全网仍存在超 800 万千瓦供电缺口，若区外受电未及预期，最大供电缺口将超 1300 万千瓦。

1.2.3 浙江省电力供需情况

从电量来看，浙江省全社会发用电量均保持稳步增长的态势，全社会发电量从 2016 年的 3197.6 亿千瓦时增至 2022 年的 4346.0 亿千瓦时，同时期全社会用电量则从 3873.2 亿千瓦时增至 5799.0 亿千瓦时^[4]。具体到各用电领域，建筑业与信息传输、计算机服务和

软件业的用电增幅明显，较 2016 年分别增长 94% 和 81%。互联网数据服务业是浙江发展数字经济的重点，光伏设备及元器件制造业、新能源车整车制造业、充换电服务业用电量均实现较快增长。截至 2022 年，浙江省本地发电量仍存在 1453 亿千瓦时的电量缺口，外来电占比 25.1%。

从负荷来看，浙江省用电最高负荷低于总装机容量，但差距正在快速缩小，总装机容量从 2015 年的 8215 万千瓦增加到 2022 年的 11793 万千瓦，增幅仅 30%，同期用电最高负荷从 5850 万千瓦增加到 10190 万千瓦，增幅达 42.6%^[4]。此外，受台风等气候因素的影响，浙江电网运行一直面临巨大压力。

1.2.4 安徽省电力供需情况

从电量来看，安徽省全社会发用电量均保持持续增长的态势，全社会发电量从 2016 年的 2252.7 亿千瓦时增至 2022 年的 3271.0 亿千瓦时，同时期全社会用电量则从 1795.0 亿千瓦时增至 2993.2 亿千瓦时。具体到各用电领域，农、林、牧、渔业与批发、零售业和住宿、餐饮业的用电增幅显著，同比 2021 年分别上升了 102% 和 93%。安徽省农业生产呈现稳中有增的发展态势，第三产业逐渐成为安徽整体经济发展的主引擎。截止到 2022 年，安徽省本地的发电量不存在缺口问题，全社会发电量有 8.5% 的富余^[5]。

从负荷来看，安徽省最大用电负荷和发电装机容量增长平稳，整体呈供大于需的局面。2016-2022 年，安徽省最高用电负荷从 3167.8 万千瓦增加到 5600.0 万千瓦，增幅 43.4%；发电装机容量从 5732.7 万千瓦增加到 9219.0 万千瓦，增幅 37.8%^[5]。除了发电供本省用之外，安徽省还承担了一定的外送的任务。安徽省是华东地区的能源基地，通过“皖电东送”通道，安徽火电覆盖江苏、浙江、上海等地区。

1.3 长三角地区虚拟电厂政策环境

自 2021 年以来，长三角地区各省市陆续出台了多项政策，其中多有提及虚拟电厂，相关政策详见表 1-2。这些政策的制定旨在推动虚拟电厂项目发挥示范作用，实现多种可调资源的有效聚合，鼓励工业用电大户和商业可中断用户积极参与负荷需求响应，以推动电力调度模式从传统的“源随荷动”逐渐向“源荷互动”的新模式转变。

表 1-2 长三角地区虚拟电厂政策

省市	时间	文件名	主要内容
上海	2022 年 1 月	《上海市公共机构绿色低碳循环发展行动方案》	到 2023 年在全市实现 20 家公共机构需求响应改造，实现虚拟电厂功能，积极参与电力需求响应工作
上海	2022 年 7 月	《上海市瞄准新赛道促进绿色低碳产业发展行动方案（2022—2025 年）》	智能电网。加快布设新能源终端和智能电网设施发挥新能源微电网、智慧减碳虚拟电厂等项目示范作用，推动光储直柔等智能电网应用。
上海	2022 年 7 月	《上海市数字经济发展“十四五”规划》	加快构建以零碳能源为基础的区域性电能集中管理模式，建立城市级“虚拟电厂”和能源互联网中心聚合可调节工商业、智能楼宇、电动汽车充电站、分布式光伏、风电等泛在可调资源，推动传统“源随荷动”调度模式转变为“源荷互动”新模式，实现绿色电力就近最大消纳，打造零碳能源产业新生态
上海	2022 年 7 月	《上海市碳达峰实施方案》	完善用电需求响应机制，开展虚拟电厂建设，引导工业用电大户和工商业可中断用户积极参与负荷需求侧响应，充分发挥全市大型公共建筑能耗监测平台作用，深入推进黄浦建筑楼宇电力需求侧管理试点示范，并逐步在其他区域和行业推广应用。
上海	2022 年 8 月	《上海市能源电力领域碳达峰实施方案》	引导自备电厂、高载能工业负荷、工商业可中断负荷、电动汽车充电网络、虚拟电厂等参与系统调节。
江苏	2018 年 7 月	《江苏省电力需求响应实施细则（修订版）》	建立完善需求响应体系。体系包括市场模式响应规则、技术架构、数据管理等，实现用电与电网之间互联互通互动，促进电力资源优化配置，推动负荷管理科学化、用电服务个性化。

省市	时间	文件名	主要内容
江苏	2022 年 8 月	《江苏省“十四五”新型储能发展实施方案》	完善适应新型储能发展的电力市场体系，推动新型储能以独立电站、储能聚合商、虚拟电厂等多种形式参与辅助服务，鼓励配建新型储能与所属电源联合参与电力市场。
浙江	2021 年 5 月	《浙江省全面提升“获得电力”服务水平持续优化用电营商环境三年行动计划》	推广并拓展综合用能服务。各供电企业积极服务保障各类虚拟电厂、储能等先进技术应用，加快构建以新能源为主体的电力系统。
浙江	2021 年 6 月	《浙江省循环经济发展“十四五”规划》	健全电力需求侧响应机制，健全可中断、可调节负荷，打造具有浙江特色的电力需求侧管理模式。加快建设多元融合高弹性电网，积极建设虚拟电厂、源网荷储等示范项目，提升电网设施智能化调度运行水平
浙江	2021 年 11 月	《关于浙江省加快新型储能示范应用的实施意见》	积极支持用户侧储能建设。推动储能应用与电网协同发展，探索运用数字化技术对分布式储能设施开展平台聚合，鼓励智慧能源、虚拟电厂等新业态发展，充分发挥灵活、可调性储能资源在新型电力系统中的平衡作用
浙江	2021 年 12 月	《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的实施意见》	深化能源治理改革创新。持续提升电力需求侧响应能力，积极推广虚拟电厂。
浙江	2022 年 5 月	《浙江省能源发展“十四五”规划》	提升电力系统灵活可靠性。推动源网荷储一体化和多能互补，推进虚拟电厂建设促进可再生能源消纳。开展电力需求侧响应，到 2025 年，电力精准负荷响应能力扩大到千万千瓦级，负荷侧调峰能力达到全社会最高负荷的 5%。
安徽	2022 年 1 月	《安徽省电力需求响应实施方案（试行）》	按照“安全可靠、自愿参与、公平公正”和“需求响应优先、有序用电保底”的原则，在全省范围内开展电力需求响应工作，运用市场机制和价格杠杆广泛发动各类市场主体参与需求响应，逐步形成全省最大用电负荷 5% 左右的需求响应能力。

2 长三角地区虚拟电厂建设现状与案例分析

目前，长三角地区的虚拟电厂发展迅速，特别是在上海、江苏和浙江地区，具有显著特点。一方面，这些地区用电需求巨大，面临着较高的电力短缺风险，因此虚拟电厂的发展具有紧迫性。另一方面，这些地区具备大量可控负荷，为建设虚拟电厂提供了有利条件。

2.1 上海市虚拟电厂建设现状与案例

根据文献，上海市可调节负荷资源超过 876 万千瓦，占 2022 年上海最高用电负荷的 26.1%，其中包括工业负荷 123 万千瓦、商业负荷 216 万千瓦、电动汽车负荷 100 万千瓦等^[6]。为充分发挥负荷资源优势，近年来，上海市电力公司积极推进虚拟电厂项目，重点关注需求响应资源的发展，以引导电力用户更灵活地调整用能需求，实现了电力用户从电能消费者向电能生产者和消费者的身份转变。同时，上海市电力公司正在牵头制定国家标准《虚拟电厂资源配置与评估技术规范》，为虚拟电厂的发展提供技术规范和指导。

作为全国首批建设虚拟电厂的城市之一，上海市已成功建立了市级虚拟电厂平台，实现了对 12 家不同类型虚拟电厂资源的统一管理和调度。这些虚拟电厂包括黄埔商业建筑虚拟电厂、上海蔚来汽车虚拟电厂、铁塔基站虚拟电厂、国网上海综合能源虚拟电厂等，

涵盖了各种资源，如中央空调、水泵、电热锅炉、照明、充电桩、换电站、其他储能设备以及铁塔基站储能等。上海市虚拟电厂建设情况见表 2-1。

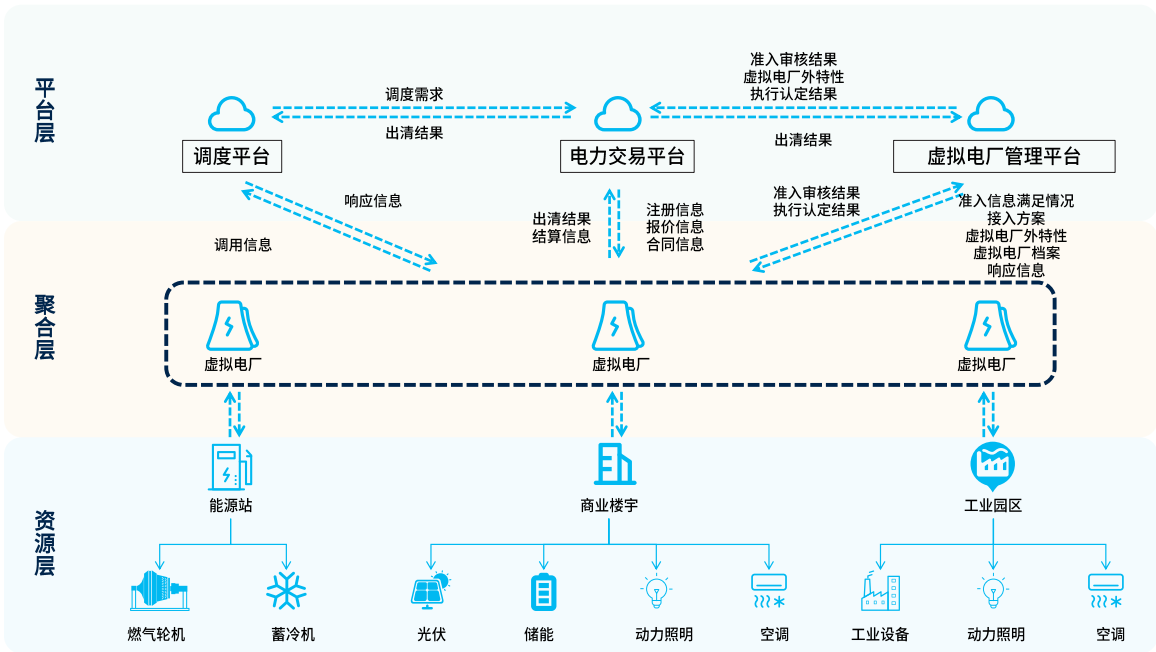
表 2-1 上海市虚拟电厂建设情况

序号	试点项目	主要影响资源	主要场景	特点
1	黄浦区商业建筑虚拟电厂	工商业负荷、储能等	商业楼宇能源管理、削峰填谷等	以商业楼宇为主的虚拟电厂体系
2	嘉定区泛在电力物联网智慧充放电示范试点项目	充电桩等	削峰填谷等	通过智慧有序充电实现对用户充电行为的灵活引导与主动调控

2.1.1 上海市虚拟电厂典型案例

(1) 市级虚拟电厂运行管理与监控平台

为实现对市内各类虚拟电厂的监控管理和协同调度，上海市搭建了市级虚拟电厂运行管理与监控平台，其运行体系见图 2-1。目前，该平台已接入虚拟电厂 12 家，虚拟发电机组共 10078 户，涵盖资源类型包括工商业楼宇、三联供、电动汽车、铁塔基站等，削峰能力 10.7 万千瓦，填谷能力 7.9 万千瓦。



在商业模式方面，主要应用场景为削峰填谷需求响应。在 2021 年和 2022 年，国网上海电力率先实施了以“双碳”为主题的电力需求响应行动，并引入了“无感调控”模式的填谷需求响应。2021 年的电力需求响应行动首次融入了“智慧减碳”概念，成为国内同类需求响应行动中可调节资源种类最丰富、充电桩负荷规模最大、基站储能参与度最高的一次行动。2022 年的“无感填谷”模式通过提前设定的预置策略和响应计划，实现了全程无需人工现场干预。与传统的调用模式相比，“无感调控”能够实现户均影响更小、用户积极性更高、调控精度更高、响应时效更快，从而增强了电网调控的可靠性，有助于推动需求响应的常态化开展。上海虚拟电厂开展交易情况见表 2-2。

表 2-2 上海虚拟电厂开展交易情况 [6]

时间	交易名称	出清情况	参与主体
2019 年 12 月 5 日	迎峰度冬专项试点交易	响应时长 :2 小时 电量 :1.83 万千瓦时 收益 :43950 元	4 家运营商及其 226 个客户, 共 8.7 万千瓦负荷

时间	交易名称	出清情况	参与主体
2020 年 6 月 25 日	端午节填谷需求响应交易	容量 :1.7 万千瓦 电量 :4.02 万千瓦时 价格 :1.2 元 / 千瓦时	2 家虚拟电厂运营商
2020 年 9 月 29 日	“十一” 填谷需求响应交易	容量 :25 万千瓦 价格 :1.2 元 / 千瓦时	综合能源服务公司、蔚来汽车、腾天节能、前滩新能源 4 家虚拟电厂
2021 年 5 月 6 日	“双碳” 主题虚拟电厂需求响应	削峰容量 :6.2 万千瓦 价格 :2.4 元 / 千瓦时 填谷容量 :2.1 万千瓦 价格 :0.96 元 / 千瓦时	腾天节能、前滩新能源综合能源服务公司、5G 基站等
2022 年 2 月 6 日	“无感调控” 填谷响应	最大填谷负荷：4.1 万千瓦 累计填谷电量：7.1 万千瓦时	—

（2）黄浦区商业建筑虚拟电厂示范项目

黄浦区商业建筑虚拟电厂定位为商业建筑领域的负荷类虚拟电厂，重点聚焦负荷侧可调资源的集中调控，是国内首个以商业建筑为主要调控对象的虚拟电厂。项目主要参与方包括上海市黄浦区商业楼宇、世博 B 片区综合能源中心、电力公司自有楼宇等。

基于设备负荷特性研究，该项目将楼宇内常见设备进行分类，并针对不同类型设备，通过停、关、调三类方式，能够精细化的调整楼宇内用电设备的运行规律，从而达到科学调整用电负荷的效果，见表 2-3 和图 2-2。目前，项目已完成 6 万千瓦的商业建筑可调资源的开发，包含了冷水机组、风冷热泵、电热锅炉、动力照明、充电桩等大量可控用电设备，可调楼宇 130 幢，单个楼宇的平均响应能力 100 ~ 500 千瓦，其中 20% 的商业建筑具备分钟级自动需求响应能力，此外还接入了 2 个居民社区、3 个电动车充电平台的多元化响应资源，完成商业建筑虚拟电厂生产与运营调度应用的开发与上线运行。项目作为上海电力需求响应的日常调度资源，已累计调度超 2000 幢次，单次最大削峰负荷 5 万千瓦，区域峰值柔性负荷调控能力超过 10%，年可节约标煤约 1000 吨、减排 2700 吨 CO₂。

表 2-3 商业建筑四类设备负荷特性

设备类型	负荷特性
常用设备	长期持续性的使用，短时间的暂停影响较小
常关设备	高能耗，但是对运行时刻没有要求
二元设备	在化石燃料与电的使用上相互转换
供暖制冷设备	供暖与制冷有着滞后性

停空调 制冷机组 例：在开启两台制冷机组的情况下，暂停其中一台机组	停照明 公共区域照明 例：调度期间，暂停部分公共区域照明灯具	停排风 通风机 例：暂停地下车库及后勤机电用房等非重要区域的排风机组	停新风 新风机组 例：对于楼宇内部新风机组开启的情况下，暂停部分新风机组	停电梯 电梯 例：在不影响楼宇正常运转的情况下，暂停一部分电梯	停锅炉 电热水锅炉 例：生活热水系统中在开启两台电锅炉的情况下，暂停其中1台电锅炉
	变冷源 制冷机组 例：优先将建筑中电制冷机组切换为溴化锂机组	变频率 冷冻(冷却)水泵 例：水泵在允许的情况下切换工频变为变频	变热源 锅炉 例：在电锅炉和燃气锅炉的建筑中，将电锅炉切换为燃气锅炉	变大小 制冷(热)机组 例：建筑同时具备大小不同的机组，将大机组变为小机组运行	
		调温度 制冷机组 例：在机组数量不便调整的情况下，调高出水温度	调负载 电锅炉 例：在电锅炉70%负载运行的情况下，调整电锅炉负载至50%		

图 2-2 黄浦区商业建筑虚拟电厂负荷调节方式

2.2 江苏省虚拟电厂建设现状与案例

江苏省在负荷侧管理方面走在长三角的前列，延续其发展，江苏省的虚拟电厂试点案例以负荷型虚拟电厂为主，代表案例包括省级需求侧管理系统、源网荷友好互动系统等。此外，江苏省近年来也开始在储能型和混合型虚拟电厂领域进行试点，例如江苏电网侧储能和南京江北虚拟电厂等项目。目前，江苏省尚未建立像上海市一样的市级统一虚拟电厂管理平台，因此日常的调度和交易仍然由各虚拟电厂直接与省交易中心和省调度中心进行对接。江苏省虚拟电厂建设情况见表 2-4。

表 2-4 江苏省虚拟电厂建设情况

序号	试点项目	主要影响资源	主要场景	特点
1	大规模源网荷友好互动系统	可中断 / 可调节负荷	需求响应、新能源消纳等	源 - 网 - 荷控制系统，国内规模最大
2	镇江电网侧储能	储能	需求响应、新能源消纳等	2018 年建成，是当时世界规模最大、功能最全的首套毫秒级响应的电网侧储能电站
3	南京江北虚拟电厂	分布式能源、储能、可控负荷	调峰辅助服务等	通过串联分布式光伏、储能设备及各类可控负荷，参与电网调峰辅助服务市场，按需增减各类能源使用比例

2.2.1 江苏省虚拟电厂典型案例

(1) 省级需求侧管理系统

江苏省从 20 世纪 90 年代着手建设基于需求响应的负荷控制系统，经过多年的建设和完善，江苏电力公司于 2015 年开通需求响应中心业务支撑平台，该平台对江苏省电网削峰填谷需求响应提供了有力支撑。该项目的参与主体为普通工业用户负荷集成商、储能站、电动汽车、5G 基站等。2015 年参与的独立用户 513 户，参与的负荷集成商 8 家，日最高响应负荷能力为 188 万千瓦。目前，该平台已实现 50 千伏安以上容量用户的负荷监测全覆盖。

在商业模式方面，该项目专注于满足削峰填谷需求。作为需求响应中心业务的支持平台，该项目的主要应用场景是江苏省内的削峰填谷需求响应。削峰方面，江苏省于 2015 年首次实施全省范围的需求响应，日最高响应负荷 188.75 万千瓦，次年，该平台成功支撑了世界最大规模需求响应，响应总量达 344.75 万千瓦，有效降低电网峰谷差 18.47%。

填谷方面，江苏省自 2018 年以来在国庆、春节负荷低谷时段创新开展填谷需求响应，最大规模 257 万千瓦，共计促进新能源消纳 3.38 亿千瓦时。

（2）源网荷友好互动系统

为确保大电网安全运行，在江苏省经信委等政府相关部门指导下，江苏省电力公司试点建设了大规模源网荷友好互动系统。该平台于 2017 年 5 月正式投入运行，并于当月在苏州完成了用户侧零误跳的切实验证，实际参与用户 245 户，精准切负荷 300 万千瓦，充分验证了系统的可靠性及其友好互动性。2018 年，项目具备 260 万千瓦毫秒级、376 万千瓦秒级可中断负荷精准控制容量、417.5 万千瓦实时负荷调控能力，可提升特高压直流送电能力 154 万千瓦。

作为国内首套基于实时可中断负荷快速响应的负荷管理系统，该系统通过对负荷资源的分类、分级、分区域管理，将源网荷系统的应急处理速度从原先的分钟级提升至毫秒级，可精准控制到用户的特定负荷。可中断负荷由用电客户自主选择，如空调、部分照明用电，被切除后安全保障用电不受任何影响，最大程度保障企业产能和电网设备安全，降低负面影响。项目已累计增供电量 49.896 亿千瓦时、累计新增销售额 27.4428 亿元、累计新增利润 1.2474 亿元，年增利润约 8400 万元。在负荷控制能力方面，相当于 4 台百万千瓦火电机组，节省投资 126.4 亿元，经济和环境效益显著。

2.3 浙江省虚拟电厂建设现状与案例

浙江电力虚拟电厂的发展处于全国前列，涌现出一批试点项目，如华能浙江虚拟电厂、金华全域虚拟电厂、宁波虚拟电厂、丽水绿色能源虚拟电厂、平湖县域虚拟电厂等。

2023 年，国网浙江电力牵头，正在编制国标《虚拟电厂管理规范》。目前，浙江省谋划构建完成了“1 国标 +3 行标”系列标准体系，以调度管理模式、市场运行体系、新型电力系统建设、网络安全要求、国家宏观政策等为出发点，系统设计建立了“中国特色虚拟电厂”浙江模式，为全国虚拟电厂建设提供浙江方案。浙江省虚拟电厂建设情况见表 2-5。

表 2-5 浙江省虚拟电厂建设情况

序号	试点项目	主要资源	主要场景	特点
1	华能浙江虚拟电厂	储能, 分布式燃机、楼宇、充换电设施等	辅助服务、电能量市场等	全国首台（套）接入调度系统参与实时响应调节的虚拟电厂
2	金华全域虚拟电厂	5G 基站、储能电站、充电桩、空调、路灯和精准可调负荷	调峰、调频辅助服务等	地域全、资源全、时段全
3	宁波虚拟电厂	分布式光伏、空调、储能和工业等用户侧可调节资源	无功平衡调节、旋转备用等	以 5G 专网和智慧终端聚合了前湾新区分布式光伏、空调、储能和工业负荷等用户侧可调节资源，精准有序服务电网安全保供和低碳转型
4	丽水绿色能源虚拟电厂	侧重水电发电侧	调峰辅助服务等	接入全市 800 多座水电站，利用北斗通信、4G+ 量子、租赁专线等技术，实现水电发电信息聚合、智慧调度
5	平湖县域虚拟电厂	分布式发电、储能、商业、工业等	调峰辅助服务等	汇聚分布式发电、储能等 6 大类 18 小类用户侧资源，建成包含日前、日内、实施可调资源共计 200 兆瓦以上

2.3.1 浙江省虚拟电厂典型案例研究

(1) 华能浙江虚拟电厂

华能浙江虚拟电厂平台又称为“华能浙江能源聚合中心”，项目 1 号机组于 2022 年 11 月顺利完成 72 小时试运行，具备常态化接收省调自动发电控制（AGC）指令并参与系统调节的能力，是全国首台（套）接入调度系统参与实时响应调节的虚拟电厂。该项目由华能集团牵头，在浙江能源监管办组织省电力公司、交易中心、调控中心、华能能源服务有限公司等单位的共同努力下开展。

华能浙江虚拟电厂广泛聚集浙江省内各地的分布式电源、新型储能、充换电站、楼宇空调等多元化需求侧可调节资源，聚合了 6 万千瓦左右的灵活性资源，常态化调节能力为

2.5 万千瓦。华能浙江虚拟电厂平台将实时的调度指令进行优化分解，分配给位于浙江省不同城市的虚拟电厂终端，这些虚拟电厂可参与电力系统的调峰、调频、备用电力以及需求侧响应等辅助服务，以协助电网维持稳定运行。

华能浙江虚拟电厂平台的建设在调控技术、运行策略等方面形成了诸多创新点，具体包括：①多类型资源优化聚合调节以及在线自动调控。②全流程全闭环 AGC 实时调节。③虚拟电厂功率控制秒级响应。④应用 5G、北斗作为接入资源的主要通信技术。⑤实现虚拟电厂参与现货市场辅助服务、电能量市场的优化运行策略。⑥区块链技术应用于电力控制大区。⑦成功研制专门用于虚拟电厂资源接入，多功能、即插即用的终端设备。

2.4 安徽省虚拟电厂建设现状与案例

与长三角地区的其他省市相比，安徽省在虚拟电厂建设方面的进展相对较慢。这主要是因为安徽省内拥有丰富的煤炭和水力资源，拥有多个重要的火力发电厂和水电站，与周边地区建立了紧密的电力互联互通关系，一直以来都是长三角地区的重要电力供应地，因此一直拥有充足的电力供应，这使得虚拟电厂建设的动力相对不足。然而，近年来，安徽省的用电增长速度较快，尤其是最高用电负荷增速更为显著，2022 年安徽省电力缺口达 1080 万千瓦。

在这一背景下，合肥供电公司于 2020 年建成并投入运营了合肥虚拟电厂，这是国内首个全面应用“5G+ 量子”技术的虚拟电厂。该虚拟电厂聚合了分布式光伏发电、储能、充换电设施、微电网等多种电力能源形式，使它们能够互联互通，总装机容量达到 12 万千瓦。此外，芜湖市也近期宣布计划建设虚拟电厂，以促进能源节约和减少碳排放。这些举措有望为安徽省未来的电力供应问题提供有力支持。安徽省虚拟电厂建设情况见表 2-6。

表 2-6 安徽虚拟电厂建设情况

序号	试点项目	主要资源	主要场景	特点
1	合肥虚拟电厂	分布式光伏、储能等	调峰、需求响应等	国内首次实现“5G+ 量子”技术全面应用的虚拟电厂

2.4.1 安徽省虚拟电厂典型案例

(1) 安徽合肥虚拟电厂

合肥虚拟电厂系统于 2020 年 2 月正式上线，旨在解决分布式新能源并网、电网调峰、调控安全三类问题，是国内首次将“5G+ 量子”技术全面应用于虚拟电厂。该项目目前共接入全市 15.3 万千瓦光伏电站、5.43 万千瓦电动汽车充换电站（桩）、2.0 万千瓦储能和 0.83 万千瓦商业楼宇可控负荷，总容量达 23.56 万千瓦，到 2024 年，合肥虚拟电厂总容量占比预计将达到夏季降温负荷 400 万千瓦的近两成，相当于少建设一座 80 万千瓦传统电厂。

商业模式上，国网合肥公司结合不同资源特性，面向不同的应用场景，构建了调压、调频和调峰三大类虚拟机组，见图 2-3。

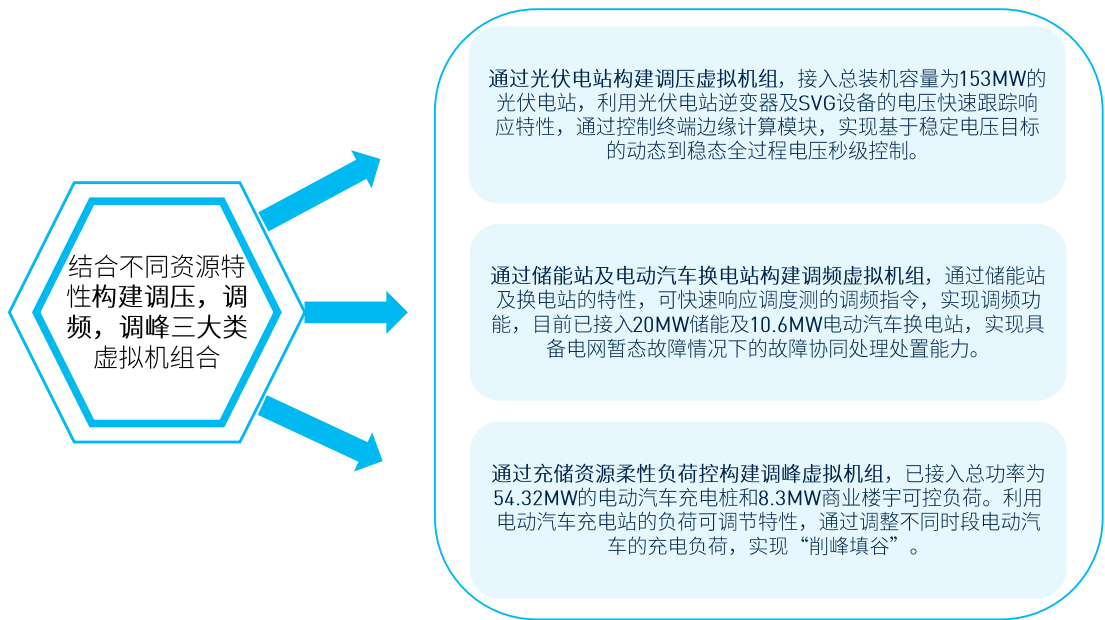


图 2-3 合肥虚拟电厂三类虚拟机组^[7]

该系统接入了光伏电站、电动汽车充换电站、储能电站和商业楼宇负荷等多种资源。技术上，平台实施了实时监测和智能控制，通过 "5G+ 量子 " 技术的融合，实现了更快速的负荷调节和更高的操作安全性。虚拟电厂系统能够提升合肥电网的抗灾能力，迅速调控频率波动，确保稳定供电。在运营方式上，系统在日常期间保障新能源消纳和安全运行，而在峰谷时期则起到了削峰填谷的作用。虚拟电厂可以实现对负荷的无感调节，确保商业综合体内空调温度变化较低，以及电动汽车充换电时间的最小增加。由于该项目首次融入了“5G+ 量子”技术，让合肥虚拟电厂的安全性与可靠性大幅度提升，该技术在虚拟电厂中的成功应用对各省市的虚拟电厂的发展有着很好的示范作用。

2.5 长三角地区虚拟电厂案例总结

对比盈利模式、技术、政策、市场，各省市虚拟电厂的实践和创新同中有异。各省市的虚拟电厂盈利模式主要依赖于参与电力需求响应和提供辅助服务以获取利润。然而，当前政策补贴型需求响应的开展频次和补贴金额有限，使得盈利具有不确定性，需要进一步完善电力市场激励机制和补偿机制，以增强盈利的持续性。此外，各省市的虚拟电厂在分布式能源的协调控制和精准预测能力也都有不足，需要加强提高。虽然各省市虚拟电厂发展存在相似性，但它们在技术、政策、市场等方面的实践和创新为整个长三角地区提供了借鉴。

基于高比例工商业用电的特点，上海市在虚拟电厂发展方面侧重于负荷型虚拟电厂，针对不同类型的楼宇负荷特性进行研究，实现柔性负荷的精确控制。上海市还在政策上放宽了结算考核标准，鼓励更多主体参与市场调峰，同时创新建立了市级虚拟电厂运行管理与监控平台，实现对上海市内所有虚拟电厂资源的统一管理与调度。

江苏省是电力需求响应的先行者之一，拥有国家（省）电力需求侧管理在线监测平台，在技术上实现了毫秒级精确负荷控制和负荷分类分级管理。江苏省还在镇江试点建设了世界规模最大的电网侧储能电站，为电网侧储能型虚拟电厂商业运营和技术积累经验。

浙江省的虚拟电厂发展受益于其丰富的聚合资源和高比例的可再生能源装机容量。浙江省虚拟电厂平台实现了多元资源的聚合和优化调节，接入了相当规模的分布式能源。此外，浙江首次开展了虚拟电厂参与备用辅助服务市场和电力辅助服务结算的试运行。

合肥电网公司以深化分布式可调节资源利用率为核心，引入了“5G+ 量子加密”技术，实现了“5G+ 量子”虚拟电厂的安全实时调度模式，率先应用于“车-桩-网”双向调度互动，并可作为安徽省可调节资源参与华东可调负荷资源跨省互济支援。

3 苏州工业园区虚拟电厂建设潜力分析

长三角地区拥有多样化的终端用能类型，为虚拟电厂的建设提供了广阔的潜力。然而，为了准确分析潜力和确定建设规模，需要结合当地负荷情况进行详细的分析。本报告中我们选取苏州工业园区作为案例研究，通过对各领域资源进行量化分析，旨在充分挖掘虚拟电厂建设的潜力，从而为该地区建设虚拟电厂提供方法和借鉴经验。

苏州工业园区隶属江苏省苏州市，位于苏州市城东，地处沿海经济开放区与长江三角洲经济发展带交汇处。1994 年 2 月经国务院批准设立，行政区划面积 278 平方公里，见图 3-1。

苏州工业园区集聚了大量工业和商业设施，电力消费潜力较高，特别是 2017 年以来苏州工业园区经济实现年均 8% 的高速增长，带动了工商业用电量持续增长。加之人口规模增长、居民生活水平提升、电动车保有量增加等因素驱动，苏州工业园区电力需求巨大。相应的，园区电力供给对外依存度高，电力供应安全的制约因素较多，在国内可再生能源高比例并网背景下，由于其随机性、波动性、间歇性特点，一旦风电、光伏出力大幅下滑，极有可能带来电力安全风险，导致电力供需紧平衡、电能质量下降等问题。特别是迎峰度夏期间，面对电力供应不足时，园区目前多采用有序用电方式来削减电网负荷，影响企业的正常生产，特别是连续生产类企业。在此背景下，建设虚拟电厂能够提供灵活的能源供应和需求管理，通过综合利用各类调节资源，与智能电网相结合，实现智能

调度和管理，促进电力供需平衡，提高电力系统的稳定性和可靠性，保障企业正常生产，满足园区经济高速增长的需求。

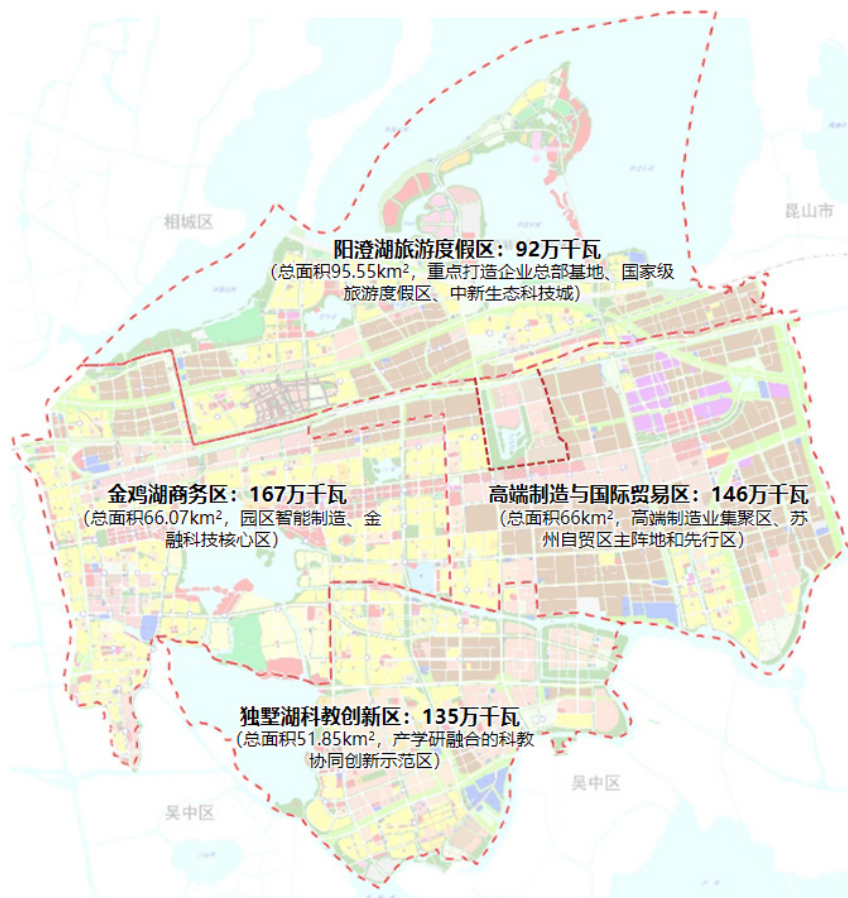


图 3-1 苏州工业园区各功能区基本情况

3.1 苏州工业园区资源分析

基于苏州工业园区电力供需两侧现状，目前园区电力系统中虚拟电厂可调节的资源主要包括可调节负荷和分布式电源，见图 3-2，而在储能方面尚未形成规模，故本次虚拟电厂建设潜力分析重点聚焦工业、建筑和交通三大领域的可调节负荷。

可调节负荷资源是指在电力系统中能够通过控制、调整或管理其电力消耗行为来实现对电力需求进行灵活调节的负荷。这些资源可以在需要时减少或增加其电力消耗，以适应电力系统的供需平衡和优化运行。

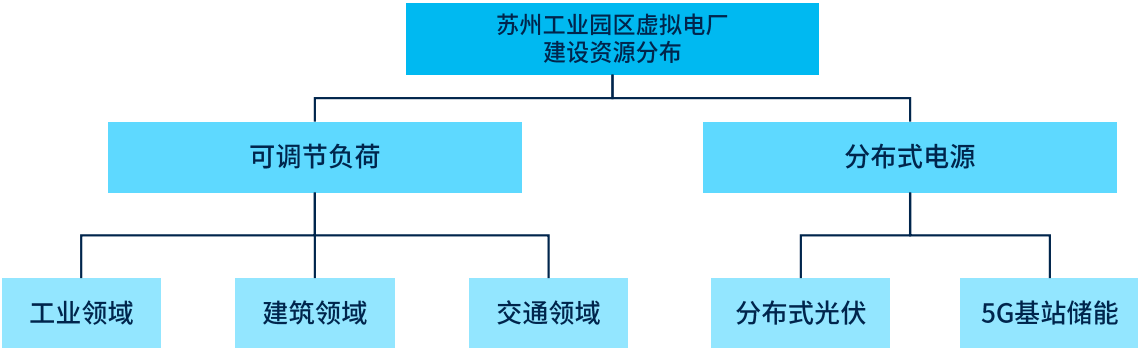


图 3-2 苏州工业园区虚拟电厂建设资源分布

3.1.1 可调节负荷资源潜力影响因素分析

在实际运行层面，用户能否参与虚拟电厂以及参与度的大小，除了与外部刺激（主要是电价和其他激励信号）密切相关外，主要由其负荷可调节性、可调节能力等负荷特性决定。

负荷可调节性指的是用户负荷在时间和大小上可以进行调整的程度，根据用户生产生活条件限制，用电设备可分为可调节负荷和不可调节负荷^[8]。不可调节负荷是指在电网高峰时段下，用户负荷中心不可以调节的负荷部分，该部分负荷要求的供电可靠性高，一旦改变会对用户生产生活或者电网安全性带来严重影响。可调节负荷是指电网高峰时段下，用户负荷中心可以调节的负荷部分。从调节负荷的角度，一般认为，可调节负荷具备较大的虚拟电厂资源潜力，如空调、照明、工业生产设备等。这些负荷可以通过调整运行时间、功率需求或启停控制等方式，实现对电力需求的灵活调整。

负荷可调节能力指的是用户负荷实际上能够调整的范围和幅度，其调节能力大小与用户终端设备功率、设备使用频次、保留负荷等密切相关；由于用户响应行为具有间歇性特征，因此用户负荷的季节性、周期性、日负荷特性等均影响到可调节时段和响应时间^[8]。同时，用户负荷与电网高峰负荷的关系，也会影响用户的可调节能力等，见图 3-3。

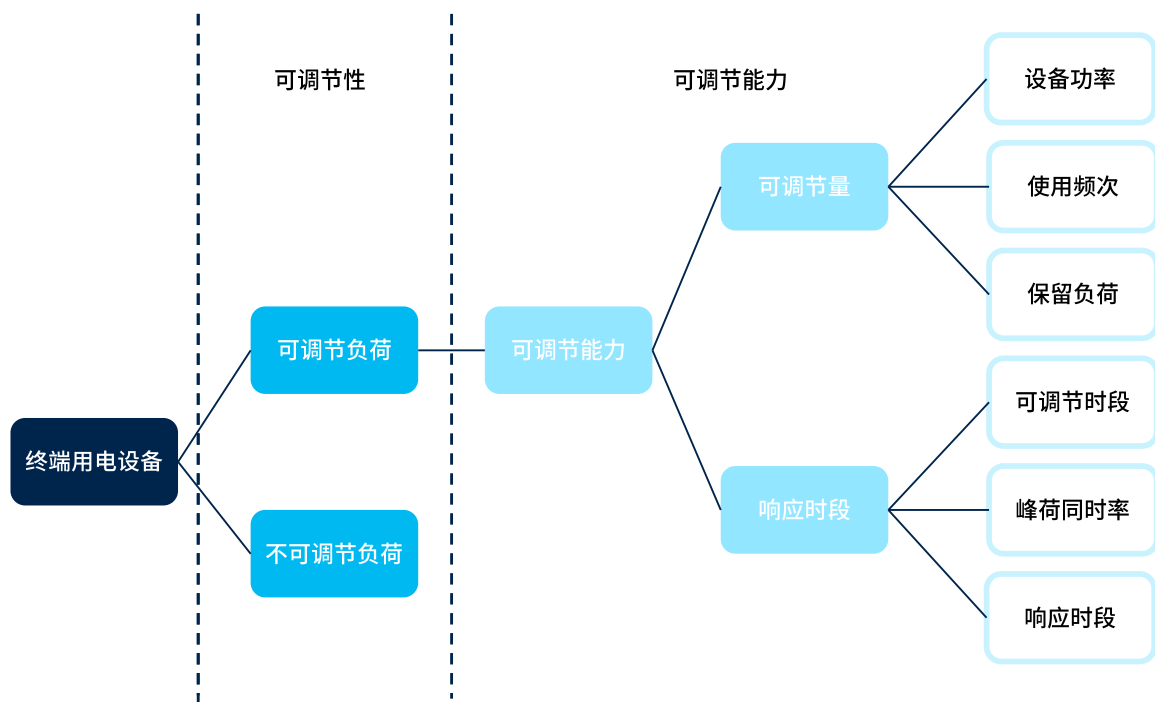


图 3-3 可调节负荷资源影响因素

3.1.2 重点领域的资源潜力分析

从重点领域看，同一行业中用户具有相似的负荷特性，其可调节资源具有一定的共性。

(1) 工业领域：主要用电设备为电锅炉、电窑炉、电传送装置、电机等生产装备，以及电梯、照明、空调等辅助生产设备等。根据用电特性，可分为连续性用户和不连续用户^[8]。

①连续生产电力用户，包括化工、水泥、冶金等行业，此类用户用电量，生产班制连续，主要生产设备长时间投运，对电力稳定、安全供应的要求较高；

②非连续生产电力用户，包括机械、纺织、食品等行业，此类电力用户生产班制不连续，具有较大的需求响应资源潜力。

(2) 建筑领域：主要用电设备包括空调、照明、电梯、水泵、电采暖等用能设备。根据用户特征又可分为公共建筑、商业建筑和民用建筑类型：

①公共建筑，包括政府机关、医院、学校等，此类电力用户用电可靠性要求等级较高，用电高峰较为集中，多为白天，机关和学校多为工作日；医院等公共机构对电力的可靠性要求高于机关和学校。

②商业建筑，包括宾馆、餐饮、娱乐等行业，用户用电量较大，用电高峰较为集中，多为晚上，具有较大的节约电力资源潜力。

③居民建筑，主要以居民用电为主，用户用电量较大，增长快，负荷变化大，通常形成一到两个负荷高峰。

(3) 交通领域：以电动车、港口岸电以及充电设施为代表，用户用电量较大，用电高峰较为集中，特别是电动私家车出行多为早晚高峰，其充电时段的选择具有较大的调节潜力。

综合各重点领域负荷特性，工业中非连续生产行业，建筑领域的商业建筑，其可调节能力、价格敏感度高，可调节负荷资源潜力大；连续工业、充电设施其次。而公共建筑和民用建筑，资源开发潜力难度较高，见表 3-1 和图 3-4。

表 3-1 重点领域负荷特性分析^[8]

领域	可靠性要求	日负荷特性	单个用户可调节能力	价格敏感度
工业领域				
连续生产	高	连续	高	低
非连续生产	较高	间歇	高	高
建筑领域				
公共建筑	高	较连续	低	低
商业建筑	不高	间歇	较高	中
居民建筑	高	间歇	低	低
交通领域				
充电设施	较高	间歇	低	高

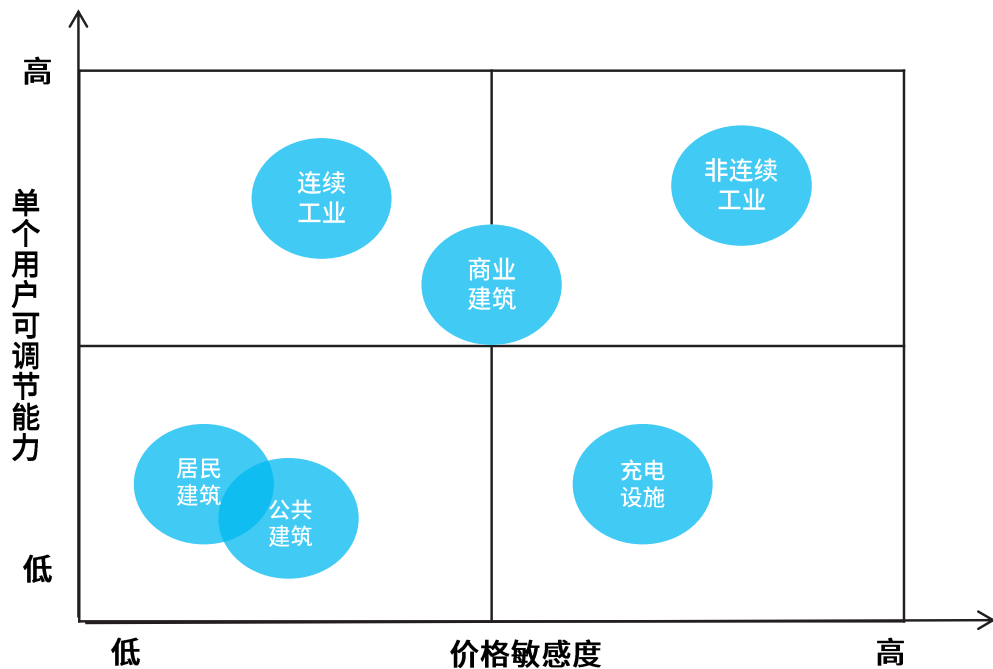


图 3-4 重点领域可调资源四象限分析^[9]

3.1.3 各领域可调节负荷资源

工业、建筑和交通是苏州工业园区虚拟电厂可调节负荷资源分析的重点领域，其分析计算步骤分为行业最大可调节能力计算、行业可调节负荷计算两大过程，分析方法的技术路线参考附录 A。

（1）工业领域

①工业行业最大可调节能力计算

2022 年苏州工业园区工业领域全年用电量为 97.35 亿千瓦时，占全区全社会用电量的 62.5%。工业电力消费大户包括电子信息、纸业、化工等行业（不含电力生产企业）。

本研究选取了各行业典型企业调研，并就企业产能利用率、生产班次、年度检修时间等相关问题展开了交流。通过对同行业内不同企业调研结果进行分析，经加权计算得出工业各行业的平均运行负荷率（ S_{usen} ）和最低负荷率（ S_{minn} ）。此外，根据行业经验和调研结果发现，各行业每年的检修时间基本为 1 个半月。

根据公式计算（参见附录 A），工业各行业最大可调节能力，即 $(P_{max,n} - P_{min,n})$ ，得到工业行业的最大可调节能力约 64.0 万千瓦，其中装备制造、石化及化工、木材加工及家具制造位列前三，其最大可调节能力分别为 35.9 万千瓦、9.8 万千瓦和 7.2 万千瓦。

②工业行业参与度分析

装备制造、印刷等行业的单个用户可调节能力大，价格敏感度高，属于 A 象限，参与度赋值为 50%；而钢铁、石化及化工、医药制造等行业虽然单个用户可调节能力大、但价格敏感度较低，属于 C 象限，参与度赋值为 20%。

③工业行业可调节负荷计算

根据赋值结果，按照公式（1-1），计算得到苏州工业园区工业领域可调节负荷在 24.4 万 kW。其中，“装备制造业”“石化和化工行业”“木材加工及家具制造”位列前三，可调节负荷分为 18.0 万千瓦、2.0 万千瓦、1.4 万千瓦。

(2) 建筑领域

①建筑领域最大可调节能力计算

建筑领域电力负荷呈现明显的季节性特征。尤其是空调负荷，是拉高夏季电网峰值的最主要类型。同时，由于公共建筑和民用建筑，资源开发潜力难度较高，故本次计算重点关注制冷季（夏季）商业建筑（办公 / 商场 / 综合）中空调的可调节负荷资源潜力。

截至 2022 年底，苏州工业园区共计拥有各类商业建筑面积约 1000 余万平方米，其中办公建筑、商场建筑和综合建筑的比重约为 7.1:1:2.6。根据对苏州工业园区上述三类建筑中典型建筑的调研结果，这三类建筑空调每月的运行时间约为办公建筑 200 小时，商场建筑 360 小时，综合建筑 275 小时。按照公式（参考附录 A），计算得出 2022 年苏州工业园区商业建筑在制冷季的平均用电负荷分别为 12 万千瓦、1.4 万千瓦、3.2 万千瓦。三者合计得到建筑领域最大可调节能力为 16.6 万千瓦。

②建筑领域参与度分析

商业建筑（办公 / 商场 / 综合）的单个用户可调节能力大，价格敏感度高，属于 A 象限，对其参与度赋值为 45%。

③建筑领域可调节负荷计算

根据赋值结果，按照公式（1-1），计算得到苏州工业园区建筑领域可调节负荷在 7.47 万千瓦。其中，办公建筑、商场建筑、综合建筑可调节负荷分别为 5.39 万千瓦、0.64 万千瓦、1.44 万千瓦，见表 3-2。

表 3-2 园区各类商业建筑的可调节负荷

建筑类型	最大可调节能力 (千瓦)	参与度	可调节负荷 (千瓦)
办公建筑	11.98	45%	5.39
商场建筑	1.41	45%	0.64
综合建筑	3.21	45%	1.44
总计	16.60	/	7.47

(3) 交通领域

①交通领域最大可调节能力计算

苏州工业园区充电基础设施以车用充电站、充电桩为主。根据规划，2025 年底，园区将建有公用充电桩 3660 个、专用充电桩 607 个、私人充电桩 3 万个，容量总需求达 37.64 万千伏安，同时系数取 0.6 测算，用电负荷约为 12.04 万千瓦。截至 2022 年底，园区共有各类充电桩 10000 个左右，其中公用、专用和私人充电桩数量比例约 5:1:21。按照类比估算，目前园区充换电设施中三类充电桩用电负荷约 3.0 万千瓦、2.5 万千瓦和 0.98 万千瓦。三者合计，得到园区充换电设施最大可调节能力约为 6.4 万千瓦。

②交通领域参与度分析

根据对园区充电站和私人用户的调研结果，用户普遍对电价的敏感度高，价格波动可直接影响用户的充电行为，因此车用充电桩属于 B 象限，参与度赋值为 30%。

③交通领域可调节负荷计算

根据赋值结果，计算得到苏州工业园区交通领域可调节负荷在 1.9 万千瓦。其中公共桩、专用桩、私人充电桩可调节负荷分别为 0.9 万千瓦、0.7 万千瓦、0.3 万千瓦，见表 3-3。

表 3-3 园区各类充电设施的可调节负荷

充电设施类型	最大可调节能力（千瓦）	参与度	可调节负荷（千瓦）
公共充电桩	29550	30%	8865
专用充电桩	24981	30%	7494
私人充电桩	9825	30%	2948
合计	64356	/	19307

（4）各领域可调节负荷资源汇总

综上，工业、建筑（空调）、交通（充电设施）三大领域的可调节负荷之和为 33.76 万千瓦，其中，工业为 24.36 万千瓦，建筑（空调）为 7.47 万千瓦，交通（充电设施）为 1.93 万千瓦。

3.1.4 各领域调节电网高峰负荷能力

（1）苏州工业园区电网负荷特性分析

从全年来看，参考江苏省全年日最高、最低负荷曲线，江苏省夏季（7、8 月）负荷明显高于其他季节^[10]。2022 年，苏州工业园区全年最大负荷出现在 7 月，达 314.8 万千瓦。因此，夏季是苏州工业园区电网削峰最迫切时刻。从工作日来看，参考江苏省工作日典型负荷虚线，全天形成两个高峰时刻，早高峰 10 点至 11 点，晚高峰 13 点至 16 点 30 分。

（2）各领域负荷与电网高峰负荷的关系

工业领域方面，苏州工业园区工业负荷占比较大，但工业负荷受季节变化影响小。工业负荷与夏季电网高峰负荷一般相关。

建筑领域（空调）方面，负荷的季节性特征明显，空调负荷与夏季电网高峰负荷强相关。

交通领域（充电设施）方面，负荷规模小，且不呈现明显的季节变化。负荷与夏季电网高峰负荷弱相关。

综合上述分析，对行业负荷与电网高峰负荷的关系进行赋值，见表 3-4。

表 3-4 园区各领域负荷与电网高峰负荷的关系赋值

序号	类型	典型行业	
1	强相关	建筑领域（空调）	1
2	一般相关	工业负荷	0.6
3	弱相关	交通领域（充电设施）	0.2

(3) 各领域负荷与电网高峰负荷的关系

根据赋值结果，根据公式（1-2），计算在电网高峰时段行业实际可调节能力为 22.5 万千瓦，其中工业为 14.6 万千瓦、建筑领域（空调）为 7.5 万千瓦、交通领域（充电设施）为 0.4 万千瓦，见表 3-5。

表 3-5 园区各领域可调节负荷资源潜力

序号	典型行业	行业可调节负荷 (万千瓦)	相关度	行业可调节能力 (万千瓦)
1	工业领域	24.36	0.6	14.62
2	建筑领域（空调）	7.47	1	7.47
3	交通领域（充电设施）	1.93	0.2	0.39
合计				22.48

3.2 园区虚拟电厂建设资源汇总

建设虚拟电厂，除了上面提到的可调节资源，还有分布式发电和储能。目前园区内部分企业建设有分布式光伏电站，利用“闲置屋顶”产出“清洁电力”，截至 2020 年投运项目 151 个，装机容量 13.6 万千瓦，已全部实现并网，每年可提供 1.36 亿千瓦时电力。目前园区在电网侧和用户侧储能方面尚未形成规模，但拥有相当规模的 5G 基站储能资源，可作为虚拟电厂的建设资源，聚合起来参与电网调度。截至 2022 年 3 月，已建成 5G 基站 3944 个。按照单站功耗 2.7 千瓦计算，苏州工业园区 5G 基站储能大约为 1 万千瓦。

因此，综合各类型可调资源，得到苏州工业园区虚拟电厂建设资源共计约 37.14 万千瓦，其中可调节负荷资源为 22.5 万千瓦，分布式能源为 13.6 万千瓦。2022 年苏州工业园区最高用电负荷 314.8 万千瓦，园区虚拟电厂可建设资源约占最高用电负荷的 11.8%，见表 3-6。

表 3-6 园区虚拟电厂建设资源情况

资源类型	重点领域	可调节资源（万千瓦）
可调节负荷	工业领域	14.62
	建筑领域（空调）	7.47
	交通领域（充电设施）	0.39
分布式能源	分布式光伏	13.60
	基站储能	1.06
合计		37.14

4 研究发现有建议

4.1 研究发现

(1) 长三角地区电力供需存在缺口，需要增加供给并合理调配需求侧资源

长三角地区整体电力需求明显超过电力供给，除了安徽作为电力输出省份之外，上海、江苏和浙江都存在较大的电力缺口。同时，电力的峰谷差异愈发明显，"十三五"期间，江苏的最高负荷在峰值负荷以上的平均持续时间达到了 35.6 小时，迫切需要像虚拟电厂这样的电力供需调节手段。

在供应侧，尽管这些地区近年来一直在积极推广清洁能源，且核能、风能和太阳能等的比例不断增加，但总体上仍然高度依赖火电，这导致碳排放仍然较高。因此，这些地区需要结合本地优势，持续优化发电装机结构，增加清洁能源的比例。在需求侧，长三角地区的迅猛发展，电力需求大幅增长，尤其是电动汽车充电设施的增加对电网的稳定性造成了巨大挑战。总体而言，目前长三角地区迫切需要解决如何增加供给并合理调配需求侧资源的问题，而虚拟电厂提供了一个很好的解决方案。

(2) 长三角地区虚拟电厂项目类型齐全，具备互相借鉴和协同发展的潜力

长三角地区的虚拟电厂项目类型多样，各地立足自身优势，侧重不同的发展方向，具备互相借鉴和协同发展的潜力。上海和江苏在需求侧管理方面起步较早，拥有成熟的负荷管理机制，在负荷型虚拟电厂方面具有丰富的实践经验。例如，上海的黄浦区虚拟电厂已经实现了大规模楼宇负荷资源的精细管理，而江苏的大规模源网荷友好互动系统是国内首套基于实时可中断负荷的快速响应负荷管理系统。此外，江苏还在储能方面投入较多，建设了世界规模最大、功能最全的电网侧储能电站，积累了丰富的经验。而浙江和安徽在混合型虚拟电厂方面具有更多的实践经验，浙江的华能虚拟电厂广泛整合了分布式电源、新型储能、充换电站、楼宇空调等多元化可调节资源，成为国内首个接入调度系统并参与实时响应调节的虚拟电厂。安徽省，作为火力发电重要省份，其太阳能和风能等新能源的发展也较为出色，具备较多的新能源并网经验。因此，长三角地区的虚拟电厂项目类型多样，各地在整合本地储能和分布式发电资源并网后，可以实现互补和协同发展，共同应对可再生能源消纳和应急供电任务，减少运营成本，提高电网运行可靠性，提高新能源使用比例，实现长三角地区的绿色低碳目标。

(3) 长三角地区虚拟电厂技术特点鲜明，分布式能源的协调控制和精准预测能力有待提高

虚拟电厂的业务架构复杂，涉及多个层次和复杂的流程，需要依赖多种技术来支持。长三角地区的虚拟电厂项目在技术方面取得了显著进展，但仍然面临一些挑战。各项目都致力于技术创新，围绕信息安全、调度优化、快速响应等领域取得了重要的创新成果。例如，浙江华能虚拟电厂通过全流程全闭环 AGC 实时调节实现功率控制秒级响应，而安徽合肥虚拟电厂引入了“5G+ 量子”技术，提高了负荷响应速度和操作安全性。南京江北虚拟电厂也实现了分布式能源出力的实时调节，以参与电网调峰服务。然而，分布式能源、储能系统以及可控负荷的协调控制仍然是长三角地区虚拟电厂发展的关键和难点。尤其是在双碳战略下，长三角地区已经拥有相当规模的分布式能源，但各项目在资源的优化调度方面仍有待提高。由于用电设备的数据采集能力不足，数据积累有限，精准预测新能源资源的出力与波动与国外虚拟电厂仍存在一定差距。

(4) 电力市场环境有待完善，盈利不具备可持续性

我国的电力市场改革尚未完成，虚拟电厂作为独立的市场主体参与辅助服务方面仍然面临一些门槛和政策要求。目前，三省一市的虚拟电厂项目中的用户有限，大多数仍然是由政府邀请的需求侧响应或者提供辅助服务的用户。这使得虚拟电厂的盈利模式缺乏可持续性。尽管一些项目参与调峰辅助服务，但由于政策补贴型需求响应的频次和金额有限，虚拟电厂运营商暂时无法仅依赖此业务盈利，这降低了市场主体的积极性。同时，虚拟电厂还需要克服与电力市场各个环节之间的现实差距。

(5) 虚拟电厂的商业模式复杂，目前处于探索阶段

虚拟电厂的商业模式是复杂的，涉及多个层次和多个主体。目前，国内虚拟电厂项目主要由地方政府主导，并由电网公司建设和运营，缺乏统一的省级平台以及成熟的聚合商和服务商。整体的商业模式仍然处于探索阶段。虚拟电厂运营模式有三层架构，包括电力交易运营机构、负荷聚合商（虚拟电厂运营商）和各类电力用户和能源设备资产。在这个模型中，负荷聚合商与能源资产持有方之间的权责互动和利益分配是关键。与售电业务的商业模式相似，虚拟电厂的商业模式同样有三层主体，都聚焦于整合和代理终端电力用户参与批发市场竞争。然而，虚拟电厂的商业模式更加复杂，因为它涉及到高成本的接入、复杂的资源需求、高技术要求以及复杂的互动耦合性。虚拟电厂的商业模式需要进一步完善和精细化。

(6) 苏州工业园区可调节资源潜力高、企业数字化程度高，具有很好的虚拟电厂建设基础

苏州工业园区拥有较大的可调节资源潜力，包括工业、商业建筑（空调）、交通三类用电领域的丰富可调节负荷资源以及相当规模的分布式能源，预估资源潜力达37.1万千瓦。此外，园区作为国内领先的国家级开发区，历来重视电力低碳化数字化转型创新，在政府侧，现已完成园区能源公共服务平台的建设，覆盖区内企业的用能情况，率先建成全省首个开门接电示范区；在企业侧，从自身发展需求和政策引导下，企业历来重视在数字化方面的转型，已集中完成的各类数字化转型项目3000余个，实现规模以上工业企业全覆盖，加强了对设备和能耗的监控能力，为挖掘可调节负荷资源潜力，奠定了良好的建设基础。

4.2 发展建议

为充分发挥虚拟电厂对长三角地区电力系统的支撑作用，实现可调节资源纳入新型电力系统调控运行，下一步还可以在政策制定、关键技术、市场机制及商业模式方面进行突破。

（1）政策制定

一是加强顶层设计，明确虚拟电厂的定义、范围、发展定位、发展目标和实施策略，梳理各方的职责。建议借鉴江苏的虚拟电厂发展模式，由政府主导平台建设并提供公平、开放、免费服务，社会资本主导虚拟电厂建设和运营，培育市场化的“聚合商”，以促进技术创新和成本降低。

二是建立虚拟电厂标准体系，打破数据交互壁垒，建立多方协作机制和标准体系。国家标准如《虚拟电厂管理规范》和《虚拟电厂资源配置与评估技术规范》可以为虚拟电厂建设提供统一的管理规范。

（2）关键技术

一是优化虚拟电厂的调控优化、分析预测等核心技术，拓展多样形态的资源动态，完善可调节资源协同优化调控的标准体系。强化信息 - 物理 - 社会耦合视角下的动态特性量化分析能力。例如合肥虚拟电厂使用 5G+ 量子技术实现了虚拟电网的再增速，并且提高了虚拟电网运行的安全性。

二是提高虚拟电厂对不同资源对象的辨识和配置效率，实现海量分布式资源的即插即用和高频并发处理，加强通信承载能力。例如江苏源网荷友好互动系统在 2017 年 5 月 24 日在苏州对 245 户大用户开展了实切验证，实现精准切负荷 300 万千瓦，用户侧零误跳完成实切演练，充分证明了其数据处理的准确性。

三是研究虚拟电厂接入的安全校核方法和动态评估技术，整合动态全局加密技术，以提高运行控制的可靠性和安全性，例如合肥虚拟电厂的量子技术，实现了量子加密，大幅提升虚拟电厂运行安全。

四是建设统一的虚拟电厂接入平台，实现不同社会资本投资的虚拟电厂平台按照统一的技术规范标准接入，以最优方式配置省内资源。

(3) 市场机制

一是研究虚拟电厂多元主体动态定价技术，综合考虑边际成本、运行情况等多因素，实现不同类型可调节资源价值的最优分配。

二是完善现货电能量市场、辅助服务市场等电力市场的价格形成机制，逐步放宽现货市场价格上限，以鼓励虚拟电厂的进一步投资。

三是完善市场交易体系，设计符合虚拟电厂灵活调节能力的市场交易机制，以支持虚拟电厂的市场化运营，消除或降低最低容量限制，以鼓励虚拟电厂参与市场竞争。

四是引入基于区块链的可信交易技术，以实现信息流、能量流和资金流的可溯源和可认证，从而激活虚拟电厂调节资源的潜力。

(4) 商业模式

一是鼓励符合要求的虚拟电厂参与电力市场，与传统能源进行公平竞争，并鼓励其参与绿色证书交易、绿色电力交易和碳排放交易，以回收投资成本。

二是探索开展能源金融、大数据增值等多类型服务，以拓展虚拟电厂的商业模式。

三是完善商业激励模式，包括资源价值贡献度和用户决策理性的多种合作博弈定价方法，以提高用户资源参与虚拟电厂运营的积极性。

参考文献

- [1] 陈天朗. 中国虚拟电厂市场分析 [EB/OL]. 凤凰网. (2022-09-28) [2023-08-15]. <https://sn.ifeng.com/c/8JeXe8vaH9M>
- [2] 上海市统计局. 上海统计年鉴 2022 [EB/OL]. 上海市统计局官网. (2022) [2023-8-15]. <https://tjj.sh.gov.cn/tjnj/20230206/804acea250d44d2187f2e37d2e5d36ba.html>
- [3] 江苏省统计局. 江苏省统计年鉴 2022 [EB/OL]. 江苏省统计局官网. (2022) [2023-8-15]. <https://tj.jiangsu.gov.cn/2022/indexc.htm>
- [4] 浙江省统计局. 浙江省统计年鉴 2022 [EB/OL]. 浙江省统计局官网. (2022) [2023-8-15]. https://zjjcmspublic.oss-cn-hangzhou-zwynet-d01-a.internet.cloud.zj.gov.cn/jcms_files/jcms1/web3077/site/flash/tjj/Reports1/2022%E6%B5%99%E6%B1%9F%E7%B-%9F%E8%AE%A1%E5%B9%B4%E9%89%B4/indexcn.html
- [5] 安徽省统计局. 安徽省统计年鉴 2022 [EB/OL]. 安徽省统计局官网. (2022) [2023-8-15]. <http://tjj.ah.gov.cn/oldfiles/tjj/tjjweb/tjnj/2022/index.htm>
- [6] 赵建立, 向佳霓, 汤卓凡, 等. 虚拟电厂在上海的实践探索与前景分析 [J]. 中国电力, 2023, 56(2): 1-13.
- [7] 陈璐. 构建“5G+量子加密”的安全实时虚拟电厂调度模式. [EB/OL]. 自然资源保护协会官网 (2023-06-16) [2023-8-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/74WanlLbUbo4eY4KIVSFg>
- [8] 王鹏, 王东容等. 走进虚拟电厂 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [9] 自然资源保护协会. 需求侧资源潜力挖掘方法与实践——以长三角中心城市湖州为例. [EB/OL]. 自然资源保护协会官网. (2022-06-05) [2023-8-15]. <http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2020-06-05/5ed9a98f8f0ad.pdf>
- [10] 国家发展改革委. 各省级电网典型电力负荷曲线. [EB/OL]. 国家发展改革委官网. (2022-08-18) [2023-8-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202012/t20201202_1252094.html
- [11] 上海市国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测中心. 2021 年上海市国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测及分析报告. [EB/OL]. 上海市人民政府官网. (2022-06-20) [2023-8-15]. <https://www.shanghai.gov.cn/gwk/search/content/4cf9912e807f4acca39dbb5d0e1d8d11>

附录 A 虚拟电厂潜力分析方法

1. 分领域可调节负荷潜力方法的技术路线

行业可调节负荷资源潜力计算需要摸清行业特性、电网负荷特性。

行业负荷特性：行业需求响应资源量的大小受到其自身用电特性的制约，如行业是否连续生产、对用电可靠性要求、单个用户负荷大小等必然影响行业参与需求响应的规模；从价格敏感度出发，在同等的激励或电价条件下，必然存在响应程度高的用户和响应程度低的用户。再者，一旦价格或激励到位，会激发用户需求响应工作的自主性，如用户除了直接参与高峰削减外，还会以蓄能方式转移高峰负荷。用户在低谷的蓄能行为会增加区域总的电能消费，但仍有效降低电网高峰负荷。因此，对于区域电力平衡仍有积极和正面的影响。

电网高峰负荷：在实际运行层面，考察用户对电网负荷的实际调节能力，起决定作用的是行业负荷与电网高峰负荷的关系，如果行业负荷具有明显的季节或日高峰负荷特征，且具备实施（实时或约定）需求响应的基本条件，则必然是需求响应的重要实施主体。

综上，行业可调节负荷资源潜力计算的过程主要分为两个阶段。

①计算行业可调节负荷：一是根据行业负荷特性计算其最大可调节能力；二是在此基础上，结合行业参与程度，分析行业可调节负荷。

$$\Delta P_{f,T/n} = \max \Delta P_{f,n} * \mu_n = (P_{\max,n} - P_{\min,n}) * \mu_n \quad \text{公式 (1-1)}$$

式中： $\Delta P_{f,T/n}$ 为区域 n 行业负荷的可调节负荷，kW；

$\max \Delta P_{f,n}$ 为区域 n 行业最大可调节能力，kW；

μ_n 为行业参与度

$P_{max,n}$ 为区域 n 行业最大负荷，kW;

$P_{min,n}$ 为区域 n 行业的最小负荷，kW

公式中行业最大负荷和最小负荷之差 $\max \Delta P_{f,n} = (P_{max,n} - P_{min,n})$ ，可称之为行业最大可调节能力，其大小由行业负荷特性决定。

②计算行业调节电网高峰负荷：在电网运行层面，分析行业负荷与电网高峰负荷的关系，从而得到行业可调节负荷参与电网削峰的实际能力。

$$\Delta P_{f,rea/n} = \beta_{n,h} * \Delta P_{f,T/n} \quad \text{公式 (1-2)}$$

式中： $\Delta P_{f,rea/n}$ 为区域 n 行业运行层面可调节负荷，kW;

$\Delta P_{f,T/n}$ 为区域 n 行业负荷的理论可调节能力，kW;

$\beta_{n,h}$ 为行业负荷与地区电网高峰负荷的相关性，%。

行业层面的可调节负荷资源潜力分析过程如下图所示。

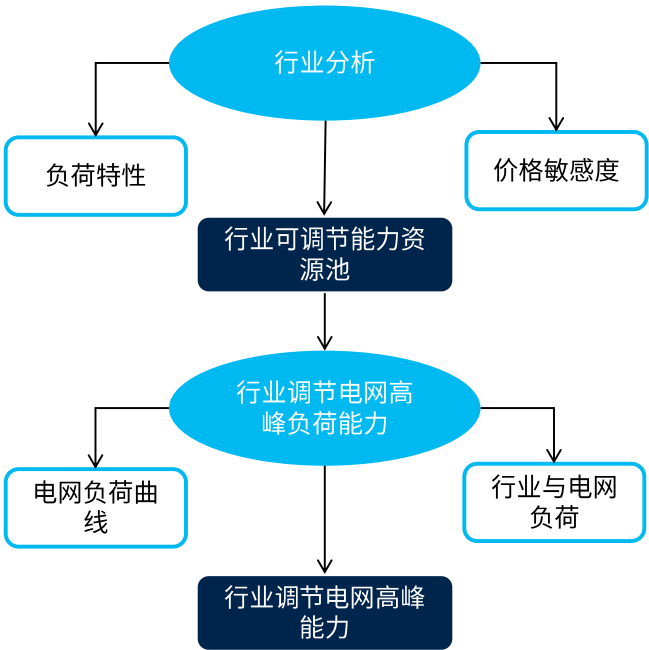


图 1 行业层面可调节负荷资源潜力分析的过程

2. 工业调节能力计算公式

$$P_{max,n} = \frac{E_n}{N_h * S_{use,n} * (1 - S_{r,n})} \quad \text{公式 (1-3)}$$

$$P_{min,n} = P_{max,n} * S_{min,n} \quad \text{公式 (1-4)}$$

式中： $P_{max,n}$ 为工业领域 n 行业的最大负荷，kW；

$P_{min,n}$ 为工业领域 n 行业的最小负荷，kW；

E_n 为工业领域 n 行业的年用电量，kWh；

N_h 为年小时数，假设生产设备连续运行，取 8760 小时；

$S_{use,n}$ 为工业 n 行业的负荷率，为行业平均运行负荷占最大负荷比，%；

$S_{r,n}$ 为工业 n 行业年检修时间占行业总运行天数的比重，%；

$S_{min,n}$ 为工业 n 行业最低负荷占行业最大负荷的比重，%。

式中的行业最大负荷比 $S_{use,n}$ 、最小负荷比 $S_{min,n}$ ，设备检修时间通过行业统计分析或参考行业经验值所得。

3. 建筑领域计算公式

$$P_{max,n} = \frac{E_n}{N_h} = \frac{M_n * S_n}{N_h} \quad \text{公式 (1-5)}$$

式中： $P_{max,n}$ 为制冷季商业建筑领域 n 类建筑的最大负荷，kW；

E_n 为制冷季商业建筑领域 n 类建筑的月用电量，kW；

N_h 为制冷季商业建筑领域 n 类建筑月运行小时数，h；

M_n 为商业建筑领域 n 类建筑的建筑面积， m^2 ；

S_n 为制冷季商业建筑领域 n 类建筑月用电强度, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$;

式中的 S_n 由于缺乏相关数据, 参考毗邻城市上海市同类型建筑的用电强度^[11]。



自然资源保护协会 (NRDC)
中国北京市朝阳区东三环北路 38 号泰康金融大厦 1706
邮编: 100026
电话: 010-59270688
www.nrdc.cn