

基于负荷聚合商的需求侧应用方法研究

文/任正某¹ 王 剑² 王金锋¹ 姜炎君¹ 孙晓晨¹

1. 国网陕西省电力有限公司经济技术研究院; 2. 国网电力科学研究院(武汉)能效测评有限公司

能源体制变革与电力市场化改革的持续推进给我国传统电力系统的运营带来巨大冲击与挑战。负荷聚合商作为电力系统运营商与零散电力用户间的中介, 能够实现对零散中小负荷资源的高效整合, 在需求侧有较大的应用潜力。阐述了负荷聚合商的概念及其当前在国内外的应用研究发展现状与主要应用方式, 对推动新型智能电网的建设具有重要意义。

随着能源体制变革与电力市场化改革的持续推进, 我国电网正面临用电负荷飞速增长、新能源大规模入网及电力资源配置落后等一系列问题, 这给传统电力系统的生产运营带来了巨大挑战。在能源低碳转型的大背景下, 如何构建广泛互联、调度灵活和安全稳定的新型电力系统, 是走能源高质量发展道路过程中的“必答题”。电力需求响应作为调节电力系统平衡的重要手段, 具有削峰填谷、缓解电网压力和保障电网安全等重要作用, 已经成为推动新型电力系统架构过程中的重要调控手段。

目前, 电力需求响应的市场参与主体仍以电力大客户为主, 负荷资源数量庞大, 但分布较为离散, 中小负荷用户往往难以达到需求响应市场的准入门槛, 这就需要负荷聚合商 (Load Aggregator, LA) 的参与来充分整合各类需求响应资源, 发挥潜在可调节负荷资源的作用。既能够充分发挥负荷聚合商在负荷聚集、能效管理中的功能作用, 有效推进需求响应业务常态化、规模化开展, 又有利于电网公司和政府开展针对性的负荷聚合商培育工作, 并依托负荷聚合商开展各类综合能源服务业务。

负荷聚合商发展现状

1. 负荷聚合商概况

负荷聚合商, 本质上是一种专业化的需求响应资源整合者, 通过评估电力用户的需求响应潜力, 使零散、闲置和分布广泛的中小负荷也能够参与到电力系统运营中。从电力系统运行的角度来看, 负荷聚合商的功能类似于虚拟电厂, 通过对需求侧资源的合理优化与配置来平抑间歇性负荷波动, 降低电力系统峰谷差, 从而维护电力系统的安全稳定运行, 具有良好的经济效益。从负荷的角度来看, 一方面, 负荷聚合商能够帮助电力客户灵活管理自己的负荷, 使原本达不到需求响应最低水平的中小负荷资源也能达到电力交易的准入门槛, 既帮助整合闲置的负荷资源, 也为中小负荷用户提供了参与电力市场与电网协调管理的机会; 另一方面, 负荷聚合商能够通过专业化手段来评估需求响应潜力, 帮助中小负荷用户挖掘自身的需求响应潜力, 倡导科学用电模式, 提升终端设备的用电效率。

2. 国外发展现状

国外关于负荷聚合商的应用研究相对我国起步较早, 在平衡峰谷电量需求、整合负荷侧资源以及提升电力系统稳定性等方面发挥了关键作用。英国

Flextricity公司将小型发电机、备用电源、大型工业用户及大型商业用户等集合起来，整合有弹性的负荷资源并销售给电力市场，根据电力用户的个性化需求签订合同并协商市场价格。法国Votails公司通过智能设备远程监测遥控各类负荷资源的具体状况，并将负荷资源整合出售给电力市场，既帮助维护电力市场的供需平衡，又提高了电网及聚合商的整体利益。美国PJM电力市场中的削减服务提供商将负荷聚合商、配电公司及能够提供需求响应服务的企业三者联系起来，整合零散的需求响应资源并向终端用户提供出售电能等服务。

3. 国内发展现状

国内众多学者也针对负荷聚合商在需求响应资源整合、调节机制、调节潜力挖掘与运营模式等方面开展了研究。谭鸣骢等基于电网、配电系统运营商与负荷聚合商三者间的互动关系与交易模式，通过设计需求响应双层优化调度模型验证挖掘负荷聚合商的调节潜力。张铁峰等通过构建需求响应潜力评估模型及基于精细化潜力评估的负荷聚合商优化调度模型精准反馈电力用户与设备的需求响应潜力。蒋国栋等通过建立虚拟电厂双层优化模型对以虚拟电厂形式参与激励型需求响应三种形式下的负荷聚合商、储能装置和用户进行了效益分析，证明了以虚拟电厂方式参与激励型需求响应能提升负荷聚合商和储能装置的经济收益。

负荷聚合商业务类型

1. 基础信息预测

在所有涉及负荷聚合商的业务类型中，基础信息预测是根本和前提，具体细分为负荷预测、电价预测、分布式能源出力预测以及需求响应可调度容量预测四种类型。其中，负荷预测是指在一定条件和要求下，预测未来特定时期内的负荷，按照预测时间的长短，可分为超短期、短期、中期及长期负荷预测。电价预测是根据市场走向和变化，制定实际合理的投标策略，一方面实现利润的最大化，另一方面转移负荷到低电价时期，以达到降低购电成本和削峰填谷的目的。分布式能源出力预测的主要作用是提高新能源发电在电力行业的竞争力，帮助制订分布式资源的调度计划，辅助负荷聚合商做出最优投标策略。需求响应可调度容量预测是指一

些灵活性资源在需求侧内发挥调节作用，主要目的是为需求响应项目在制定、效益评估时提供更为科学的决策依据，辅助负荷聚合商制定合理的竞价策略。

2. 市场交易

负荷聚合商在市场交易过程主要体现在用户侧和市场侧两个层面，具体交易机制如图1所示。

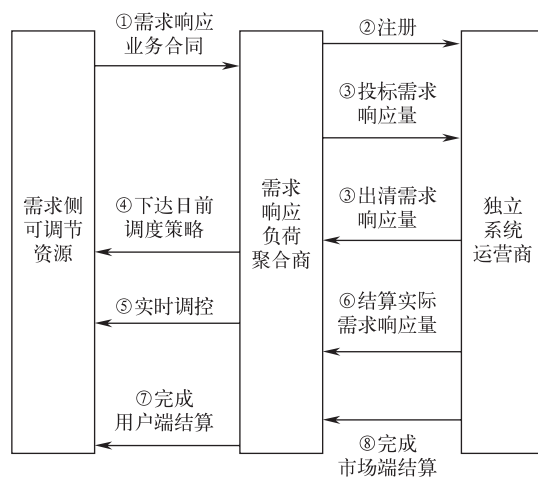


图1 负荷聚合商交易机制

1) 用户侧层面。负荷聚合商和用户签订需求合同，包括有效时间、需求响应时间和容量及补偿规则等。在需求响应日之前，负荷聚合商会根据中标结果，提前做好需求响应相关事宜并安排好相关用户用电计划；在需求响应执行当天，负荷聚合商会做好用户负荷的调节和管控；在需求响应结束之后，负荷聚合商会根据签订协议内容及需求响应量制定补偿标准并进行补偿结算。

2) 市场侧层面。负荷聚合商提前在市场中注册需求响应服务业务，系统运营商会根据电网实际供需发布需求响应时间段和需求量，参与需求响应的负荷聚合商会根据运营商发布的信息进行竞标，系统运行商会进行市场出清并确定安全校验的结果。项目结束后，负荷聚合商计算柔性用户响应后实际用电数据并预测偏差率，将基线负荷修正值报送给系统运营商。系统运营商按照评估，综合日前市场出清价和实际调节电量，对负荷聚合商进行补偿。

3. 补偿结算

补偿结算是指根据事后需求响应的实际响应量和签订协议的响应量，负荷聚合商可以得到的报

酬，其主要依据是需求响应量。需求响应量是指用户基线负荷和实际测量数据之间的差距，而用户基线负荷是指用户在不参与需求响应本应消耗的负荷，也是负荷聚合商事后对用户参与需求响应的激励补贴结算的依据，如图2所示。用户基线负荷的常用估算方法主要包括平均法、对照平均法和回归法。美国多家独立系统运营商采用平均法估算用户基线负荷；回归法通过分析历史负荷、天气、温度、湿度和风速等多种因素，采用线性或者非线性的方式进行拟合；对照组法将用户按照是否参与激励型需求响应分为两组，其中不参与的属于对照组，其基本思想是利用对照组用户在需求响应时段的负荷数据估算需求响应用户的基线负荷。

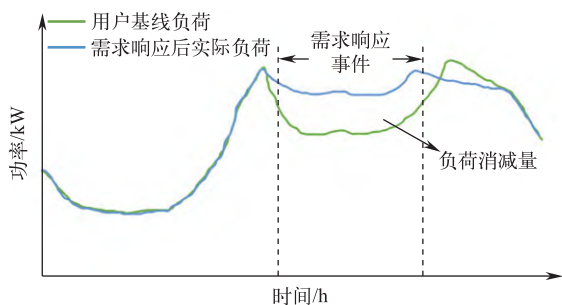


图2 需求响应事件发生前后负荷曲线对比示意图

负荷聚合商在需求响应侧的应用

1. 电动汽车消纳风电

随着以风电为代表的新能源在电网中的占比不断提升，其波动性与随机性导致目前弃风光现象较为严重，如何快速提升风电消纳水平已成为当前亟需解决的问题。近年来持有量快速增加的电动汽车因其具有“移动储能”能力，为平抑电网负荷曲线、提升风电消纳量和电网运行稳定性提供了新的发展思路。目前，已有较多研究表明基于充电需求与电价激励政策等因素引导电动汽车的充放电行为或依据风电消纳程度、电网运行现状等因素对电动汽车进行有序集群管理有助于其参与新能源电网的协同调度，提升电能利用率。由于电动汽车的充电需求与风电发电均具有不确定性，引入具有集中消纳风电能力的负荷聚合商作为中介能够帮助整合零散的中小负荷，形成负荷聚合商、风电场与电动汽车用户三者间的合作模式。其中，风电场负责向负荷聚合商提供实时准确的风电消纳量等信息，负荷

聚合商通过整合当前的负荷需求与风电消纳量，能够以较低的价格购入风电场所需要消纳的电量，再依据当前电动汽车的充电需求灵活调度电量给电动汽车用户使用。负荷聚合商、风电场与电动汽车用户三者协同运营的模式，既帮助风电场有效缓解弃风电问题，也为负荷聚合商与电动汽车用户带来经济利益。

2. 超短期负荷预测

需求侧用户的参与度是提高电网运行效率和稳定性的重要解决方案之一，但目前电力市场电价和激励政策还不成熟，基于需求价格的需求响应模型还在理论研究之中，并且模型的适用性有待进一步论证。基于负荷聚合商的需求响应，可以实现不同需求响应资源的实时调度，提高参与者的灵活性和协调性。目前，基于广义需求侧资源的超短期负荷预测主要有以下三个步骤：一是确定可削减负荷信号，其主要原理是借助负荷聚合商机构，聚合可以响应负荷削减计划的中小型用户，和电力系统运营商签订可削减负荷合同，根据用户在日前市场中的最大化收益确定负荷削减的最优时段，从合同价和实时价的差价中获取利润；二是确定可转移负荷信号，负荷转移条件下用户可以选择不同电价指导方案安排用电计划，将用户减少的用电量转移到相邻的谷荷时间段，起到移峰填谷的作用；三是确定能源存储系统信号，能源存储系统是电力生产配置和能源优化的关键，也是提高电网需求侧管理稳定性的要求。

3. 智能电网调度

负荷聚合商的出现，将大量离散的中小柔性负荷进行分类聚合，使原本无法达到电力市场准入门槛的中小负荷用户也能够有能力参与到智能电网市场的调度中，大大提升了中小负荷的参与度与利用率。作为中小负荷用户与电网侧之间的中介，负荷聚合商一方面针对电网用电高峰期制订专业的用能消减计划，以电力公司调度成本最低为目标，在不同用能时间段下放不同的市场投标价来达到盈利的目的；另一方面通过电价补偿、需求侧放电竞价等激励机制引导用电时段分散的中小负荷用户有序参与到电网调度的市场中，最终形成中小负荷用户、智能电网侧和负荷聚合商三者间的稳定合作机制，其总体框架如图3所示。

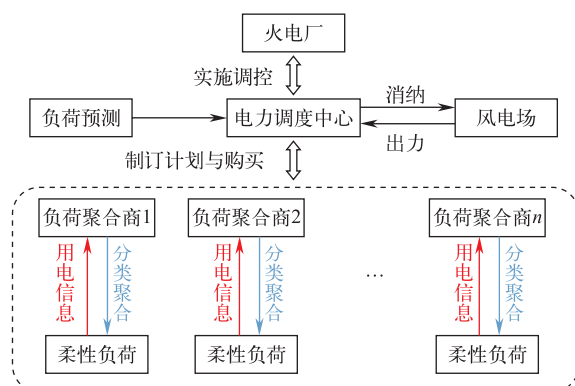


图3 负荷聚合商参与智能电网调度总体框架

4. 最优投标策略

基于负荷聚合商最优投标策略主要有两大类：激励型和价格型。其中，激励型需求响应下的负荷聚合商最优投标策略可以避免电价较高时间段带来的经济损失，而负荷聚合商可以在此时间段内激励需求响应用户进行削减，通过平移负荷减少损失。具体是建立无需求响应投标模型和有需求响应投标模型，并设计补偿机制实现最优投标策略。价格型需求响应下的负荷聚合商最优投标策略是调整用户负荷模式的有效方式之一，基于鲁棒优化方法并考虑用户响应行为不确定性的负荷聚合商的最优投标模型，利用协同优化调度储能、分布式光伏和风机等多样化资源条件下，解决负荷聚合商市场投标和分布式资源联合调度问题，主要过程是建立目标函数，确定约束条件，并进行算法求解。**EA**

参考文献

- [1] 李明. 适应能源电力新形势的“供电+能效服务”模式创新发展研究[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(1): 2-6.
- [2] 赵佳. 智能电网需求侧用户响应潜力评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [3] 蒋浩然. 面向负荷聚合商的需求响应资源调控策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [4] 侯昊冉. 计及负荷聚合商的综合能源系统优化运行[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [5] 贾海清, 林延平, 刘茹, 等. 考虑需求侧无功不确定性的负荷聚合商运营优化模型[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 17-23.
- [6] 高赐威, 李倩玉, 李慧星, 等. 基于负荷聚合

商业的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 78-86.

- [7] 张晓东, 艾欣, 潘玺安. 考虑用户可调度潜力的负荷聚合商优化调度策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023(1): 28-27, 47.
- [8] 张开宇. 智能电网环境下负荷聚合商的市场化交易策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [9] 谭鸣骢, 王玲玲, 蒋传文, 等. 考虑负荷聚合商调节潜力的需求响应双层优化模型[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 1-11.
- [10] 张铁峰, 姜喜燕, 张灏璠. 考虑精细化潜力评估的负荷聚合商优化调度[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(3): 15-21.
- [11] 蒋国栋, 韩韬, 罗首权, 等. 基于虚拟电厂优化算法的负荷聚合商收益分析[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(6): 75-80, 86.
- [12] 邢晶, 张隽, 李远卓, 等. 面向调度考虑不可控广义需求侧响应资源的负荷预测[J]. 华北电力技术, 2017(11): 18-24.
- [13] 田雨, 李如锋. 基于电价与激励的需求侧资源可调度容量评估技术[J]. 电器与能效管理技术, 2016(21): 63-70.
- [14] 葛鑫鑫. 考虑需求响应的负荷聚合商日前市场最优投标策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [15] 李东东, 王博伦, 邹思源. 聚合商模式下电动汽车消纳风电研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(9): 1346-1355.
- [16] 张宇, 何衍林, 吴铁洲, 等. 应用于风电消纳的负荷聚合商协同运营策略[J]. 中国科技论文, 2020, 15(10): 1190-1195.
- [17] 陈丽娜, 张智晟, 于道林. 基于广义需求侧资源聚合的电力系统短期负荷预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 45-51.
- [18] 高利, 万君. 基于SOC的储能削峰填谷控制策略[J]. 电气应用, 2022, 41(7): 91-97.
- [19] 罗微, 谭锡林, 蔡莹, 等. 面向智能电网的自适应调度管理机制研究[J]. 电气应用, 2021, 40(12): 56-60, 65.