基于定制化套餐的虚拟电厂辅助服务激励机制与关键技术

李嘉媚[1]，江佳美[1]，杨秋楠[1]，艾　芊[1]，王　帝[1]，蔡　娜[2]
（1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室（上海交通大学），上海市 200240；
2. 昆明电力交易中心有限责任公司，云南省昆明市 650100）

摘要： 虚拟电厂通过聚合分散的用户资源提供电力辅助服务，能够带来显著的安全、经济效益。由于虚拟电厂运营商不直接拥有资源的所有权，激励机制成为其实现与用户友好互动的关键。文中以电力辅助服务套餐的形式构建虚拟电厂激励机制，相较于其他方法，套餐形式能够更好地兼顾多方诉求，吸引海量用户参与。首先，梳理了中国虚拟电厂相关市场规则与运营方案，明确了政策的引领方向，并以此为基础分析了中国虚拟电厂的盈利条件；其次，综述了虚拟电厂激励机制的内涵及其工程实践、分类与具体表现形式，分析了以套餐形式建立电力辅助服务激励机制的合理性与有效性；在此基础上，围绕定制设计、参数决策与动态修正3个关键环节，提出了虚拟电厂电力辅助服务套餐定制的总体实现架构，并剖析了其中的关键问题与难点；最后，针对上述3个环节，综述了相关的研究进展，并基于此提出了具体的解决方案，为虚拟电厂商业模式创新提供了可行路径。

关键词： 虚拟电厂；激励机制；定制化套餐；辅助服务；用户资源；新型电力系统

0　引言

2020年9月，中国提出2030年前碳达峰、2060年碳中和的目标。作为主力军的电力行业，深化电力体制改革势在必行。2023年7月，中央全面深化改革委员会第二次会议强调，需加快构建清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力系统。当前，高比例新能源的快速发展、新型电力负荷的大量涌入、极端天气的频发，持续挑战着电力系统的运行灵活性，安全保供和供需平衡难度持续增大。电力辅助服务作为保障电力系统安全稳定高效运行的基础，成为构建新型电力系统的重要支撑。2023年9月，《电力需求侧管理办法（2023年版）》[1]指出，要全面推进需求侧资源参与电能量和辅助服务市场常态化运行。2024年2月，国家发展改革委会同国家能源局发布《关于建立健全电力辅助服务市场价格机制的通知》[2]，指出要持续推进电力辅助服务市场建设，推动用户侧经营主体公平参与辅助服务市场。因此，如何充分挖掘用户侧资源参加电力辅助服务，是新型电力系统发展的关键问题。

虚拟电厂是聚合分布式资源的虚拟实体，依托调控中心和电力交易平台，通过优化控制和数据通信技术，在自身安全稳定的前提下参与电网运行。不同于传统发电厂，虚拟电厂具有资产虚拟、资源多样及运行灵活的特性。2024年10月，国家发展改革委联合六部委发布《关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见》[3]，支持虚拟电厂等新型经营主体发展壮大，建立和完善适应可再生能源特性的电力辅助服务市场交易机制。2024年12月，国家发展改革委和国家能源局印发《电力系统调节能力优化专项行动实施方案（2025—2027年）》[4]，指出要深入挖掘负荷侧资源调节潜力，明确以虚拟电厂等方式参与系统调节的方案。上述政策文件表明，虚拟电厂在新型电力系统的核心功能定位在于聚合用户侧资源，通过电力辅助服务市场交易参与系统调节。

虚拟电厂运营商不拥有用户分布式资源的实际所有权，其只能通过多样化的商业模式对用户进行激励，从而参与外部电力辅助服务市场。因此，如何设计高效的用户侧虚拟电厂激励机制，以充分挖掘用户侧提供电力辅助服务的能力，是促进新型电力系统安全稳定、经济高效发展的关键挑战。近年来，国内外围绕虚拟电厂开展了一系列研究，并对相关成果进行了阶段性总结。文献[5]聚焦于资源动态聚合与可信量化，综述了虚拟电厂外特性建模、资源组合、服务能力的可信量化等方面的研究进展。文献[6]聚焦于可信交易，开展了交易组织架构、隐私

收稿日期：2025-04-30；修回日期：2025-07-11。
上网日期：2025-08-22。
云南省重大科技专项计划项目（202302AF080006）。

保护方案与基于智能合约的交易流程等方面研究。文献[7]归纳总结了虚拟电厂运行控制方式和优化调度策略。文献[8]从市场组成、市场准入、报价出清、结算4个角度比较分析了国内外虚拟电厂参与调峰调频服务市场的机制。文献[9]从资源发掘、市场交易、运营调度及信息通信角度，介绍了上海市虚拟电厂的建设工作以及创新应用。

考虑到虚拟电厂运营商不拥有用户侧资源的实际所有权，面向电力辅助服务的虚拟电厂激励机制是其商业运营的核心技术。然而，现有研究鲜少聚焦于面向电力辅助服务业务并广泛适用的虚拟电厂用户侧激励机制。综上，本文围绕虚拟电厂激励机制的构建这一关键挑战展开研究，梳理当前虚拟电厂相关政策环境并分析其盈利性，综述虚拟电厂激励机制的内涵、分类与具体表现形式，论述以套餐合约形式建立虚拟电厂用户侧激励机制的合理性与有效性。在此基础上，本文从定制设计、参数决策与动态修正3个重点环节，剖析其中的关键问题与难点，并综述相关关键技术的研究进展，提出具体的解决思路，为虚拟电厂电力辅助服务激励套餐定制提供技术支撑。

1　政策环境与盈利性分析

1.1　政策环境

虚拟电厂的盈利能力高度依赖于其在外部电力市场中的交易表现，而市场规则规定了其盈利的途径与方式。同时，运营方案则明确了其内部运营的权利与责任。任何内部激励机制的设计都必须以外部市场盈利为导向，并以满足运营合规为基本前提。为此，本节对典型省份市场规则与运营方案进行梳理，旨在为后续内部激励机制的研究确定政策环境基础。本文选取甘肃[10]、广东[11-12]、山东[13]和四川4个典型省份，从虚拟电厂种类划分、交易类型、准入条件、参数管理、出清管理、结算与退出机制等核心维度开展市场规则的对比分析，具体见表1。从代理方式、代理关系、结算方式等方面总结与对比了各典型省份虚拟电厂运营方案，具体见表2。

1.2　盈利性分析

当前，中国虚拟电厂正处在由邀约型向市场型发展的过渡期。鉴于国外虚拟电厂市场化运营成熟度较高，本文选取以电力辅助服务为核心盈利来源的澳大利亚特斯拉虚拟电厂（SA VPP）为参照，通过横向对比发展环境，深入剖析中国虚拟电厂实现盈利的边界条件。

SA VPP由南澳政府、特斯拉公司及电力零售商Energy Locals合作推出，为参与的住宅用户免费配备5 kW光伏系统与13.5 kW·h的Powerwall储能，其成本主要由政府补贴覆盖的前期投资（每户约1.5万至2万澳元）和包含平台运营、用户服务及设备维护在内的持续运营成本构成。SA VPP市场收入高度依赖于澳大利亚应急频率控制辅助服务（frequency control ancillary service，FCAS），占比约90%，而能量市场收入仅占10%。得益于新能源的大规模并网，南澳应急FCAS市场均价由2016年前的4澳元/MW上涨至2021年的23澳元/MW，极端情况下价格可达16 600澳元/MW[14]。正是这种高均价、高波动的价格机制为SA VPP创造了盈利空间。以5 MW申报容量计，SA VPP在2020年3月因电网事件获得了高达117.36万澳元的单月收入，并实现了167.8万澳元的年收入，参与用户亦能享受约22%～23%的电费折扣[15]。由此可见，政府的前期补贴、不断上涨的电力辅助服务价格与极高的价格上限，是SA VPP实现商业闭环并良性发展的核心前提。

中国价格机制相对保守，以电力调频服务市场较为领先的广东省为例，广东省调频市场的容量价格为每日3.56元/（MW·h），里程价格区间仅为5.5～15元/MW。这种较为保守的价格区间设置和较低的价格上限，与澳大利亚FCAS市场存在显著差异，在一定程度上制约了虚拟电厂的盈利能力。因此，放宽电力辅助服务市场价格区间、提高价格上限是中国虚拟电厂实现盈利的必要条件之一。此外，中国目前也在积极地为虚拟电厂初期投资建设提供补贴，扩大虚拟电厂盈利空间。例如，上海市发布《上海市新型电力系统调节能力奖励资金管理办法》[16]，根据调节能力给予虚拟电厂每年50元/kW的奖励，奖励上限为150万元/年，奖励期为3年；深圳市印发《深圳市支持虚拟电厂加快发展的若干措施》[17]，经评审后给予单个虚拟电厂项目最高不超过1 500万元的支持。

2　激励机制

2.1　激励机制内涵与工程实践

通过激励机制，虚拟电厂吸引、聚合用户提供电力辅助服务，因而激励机制是其高效运营的关键技术[18]。激励机制的内涵不仅包括基于市场效益分配的服务结算，还包括为抢占市场份额的超前补贴。在基于市场效益分配的服务结算方面，目前的工程实践多分为约定价格与利润分成两类。美国特斯拉Powerwall虚拟电厂根据用户每月服务量，以固定价格按月度结算[19]；深圳市虚拟电厂前海能源与用户按照约定比例共享虚拟电厂参与电力系统运

表1　典型省份市场规则总结对比

Table 1　Summary and comparison of market rules of typical provinces in China

省份	虚拟电厂种类划分	交易类型	准入条件	参数管理	出清管理	结算管理	退出机制
甘肃	电源型/负荷型/混合型	电源型仅辅助服务和需求响应，负荷型可参与的市场交易类型与售电公司或电力批发用户一致	调节能力不低于5 MW，连续调节时间不低于1 h，偏差率在±20%间	省级负荷管理中心定期评估虚拟电厂运行、设备、聚合及调节能力，不合格者限期整改；关键指标变更时，虚拟电厂申请测试，中心15 d内完成并同步至交易平台	电源型按新能源规则同步出清，负荷型按售电公司规则同步出清；混合型分发电单元与用电单元，分别按电源型和负荷型规则出清	批发市场独立结算，零售侧按协议分成	自愿+强制双轨制，违规2次取消资格
广东	负荷类、发电类	电源型仅参与辅助服务和需求响应；负荷型根据售电公司规则交易；混合型分设发电与用电单元，按类型分别参与各市场交易	在电能量市场，虚拟电厂于220 kV及以上节点聚合，调节能力不低于1 MW，持续响应时间不低于1 h；需求响应市场：以地市聚合，调节能力不低于5 MW，持续响应时间不低于1 h	广东省电力负荷管理中心制定细则，统筹虚拟电厂管理，协同交易规则；组织市级中心进行资质审核、系统接入、能力认定及基线考核，支撑市场交易	现货市场中节点报量报价：负荷类申报24 h负荷及调节上下限，发电类申报96点功率曲线，需求响应依指令执行并按有效响应容量结算	现货偏差按节点电价结算，辅助服务分摊	退出需要缴清费用，履行完合同后退出，无故不得退出
山东	发电储能类、全电量负荷类、调节量负荷类	发电储能机组直接参与电能量和辅助服务市场；全电量负荷机组通过代理进行电能量零售交易；调节量负荷机组主要参与辅助服务市场和需求响应市场	调节能力不低于5 MW，连续调节时间不低于1 h	虚拟电厂运营商通过交易平台申请调节能力验证，由电力调度机构和电网企业审核，内容包括聚合资源、方式及调节能力，并出具证明提交交易机构	发电储能机组按节点价出清，负荷类机组统一负荷侧出清，调节量机组申报可调节能力，按响应能力独立排序中标	发电按节点电价，负荷按套餐或调节收益，独立辅助/响应结算	正常退出公示10 d，强制退出3年禁入
四川	无明确划分	需求侧响应、中长期、现货及辅助服务电力市场并存；参与中长期与现货交易需持售电资质	调节能力不低于5 MW，连续调节时间不低于1 h，偏差率在±20%间	虚拟电厂须在15个工作日完成包含调节容量、持续时间、调节速率、响应时间、调节精度等指标并上传	按报量报价参与需求响应竞价、中长期及现货市场交易，享受限价放宽和优先出清；中长期交易以独立单元参与，现货交易可选报量报价或报量不报价模式	以户号为单元上网/下网计量，按套餐条款分账	自愿+强制双轨制

表2　典型省份运营方案总结对比

Table 2　Summary and comparison of operation schemes of typical provinces in China

省份	运营规则
甘肃	1)参与调节性市场和电能量市场前，分别与聚合发、用电户签订代理协议(零售合同)，选定零售套餐 2)调节性市场代理关系需与管控平台绑定，并至少绑定1个月，初期采用固定分成比方式结算 3)电能量市场代理关系通过电力交易平台建立，并同步至管控平台统一管理
广东	1)根据电能量、需求响应、辅助服务等不同交易品种，通过交易平台与电力用户、分布式发电分别签订资源代理合同 2)合同内容包括可调控设备、调节方式、响应时间、电能量价格、收益分成、考核分摊等条款 3)同一合同周期内，电力用户只能与一家虚拟电厂运营商建立聚合关系。选择参与非电能量市场的电力用户，与虚拟电厂运营商的聚合关系可与电能量零售代理关系不同；而选择通过虚拟电厂参与电能量交易的电力用户，则须保持聚合关系与电能量交易代理关系一致
山东	1)全电量负荷类机组的电量将根据与虚拟电厂运营商签订的电力零售合同进行结算，包括电能量和调节收益两部分 2)调节量负荷类机组需与虚拟电厂运营商签订调节收益分成协议 3)灵活调节类零售套餐由虚拟电厂运营商与聚合资源签订。若聚合资源为分布式发电和储能，则根据合同模板在零售平台约定收益分配；若为直接参与市场交易的用户，则在电能量套餐基础上约定收益分配；若为电网企业代理购电用户，则按合同模板约定调节量收益等
四川	1)参与需求侧响应、电能量市场和辅助服务市场时，与聚合发、用电户签订相关代理套餐(零售套餐) 2)支持同一发、用电户在调节性市场被虚拟电厂运营商代理，同时在电能量市场被售电公司代理

行调节的总利润[20]；国网电动汽车（山西）服务有限公司虚拟电厂为充分发挥分时价格引导作用，将虚拟电厂与聚合用户的结算模式优化为“分时价格＋红利分享”[21]。

另一方面，为抢占市场份额或快速积累可调度资源而采用的“超前补贴”在国际市场上更为常见，主要体现在提供硬件折扣乃至免费安装服务、前期高额激励或签约奖励，旨在降低用户参与门槛，加速资源聚合。在美国得州，Sonnen为用户提供无前期费用的太阳能板和储能安装服务，储能可接入虚拟电厂参与电网调度[22]；佐治亚电力虚拟电厂为低到中等收入用户提供1 000美元/kW的前期高额激励[23]；澳大利亚Origin Loop虚拟电厂为新加入的用户提供200澳元的签约奖励金[24]。需要说明的是，后文所论述的激励机制主要针对服务结算方面，但本文所讨论的套餐合约方式也可通过增加附加模块提供超前补贴。

2.2　激励机制分类

激励机制可以分为统一激励与差异化激励两类。在统一激励机制下，所有用户按照相同的激励单价结算服务费用[25-27]。由于用户行为与属性的差异性，面对同样的激励价格时用户的响应能力不同[28]。因而，可考虑用户行为与属性的差异性，建立差异化的激励机制，以寻求虚拟电厂运营商的更优效益。当前，关于差异化激励机制的研究主要关注于根据用户的用能特性对用户分类，从而制定精细化价格。文献[29]从温度敏感性与滞后性两方面入手，对用户在极端温度下的用能特性进行分类，从而制定面向调峰电力辅助服务的用户差异化服务价格。文献[30]从每小时负荷值、负荷范围与负荷偏差三方面分析用户用能特性，进而为每个用户制定精细化价格。

用户聚合于虚拟电厂的过程将会是一个动态的双边博弈问题，虚拟电厂运营商通过设定多样化激励机制来吸纳用户，用户通过选择虚拟电厂平台与激励方案来实现聚合[31]。当前，发展迅猛的电商平台一方面根据用户价值对用户分层，从而对不同级别用户提供不同的资源倾斜，实现高效、精准化运营；另一方面为用户提供个性化的服务，以促进用户留存。受此启发，进一步建立协调各方诉求的虚拟电厂差异化、多样化激励机制，能够提高参与主体的积极性与运营的稳定性，具有实际意义。

2.3　激励机制具体表现形式

虚拟电厂激励机制的具体形式一般可分为套餐合约型[32]、动态定价型[33]和利益分配型[34]，具体对比见表3。

表3　激励机制具体表现形式总结比较

Table 3　Summary and comparison of specific forms of incentive mechanisms

表现形式	基本定义	时间跨度	适用场景	盈利模式	特点
套餐合约	运营周期前签订合同，运营周期后按套餐规则统一结算	月度、季度、年度等中长期	适合海量用户场景，运营方可设置多类套餐，用户自行选择	可支持差价收益与利益分成	易于标准化管理，灵活设置多样化套餐便于兼顾多方诉求
动态定价	事前广播激励单价，用户自主响应，事后按单价结算	小时、日等短期	小规模用户，需频繁交互与动态调整	多为差价收益	需高频沟通，交互成本高
利益分配	市场交易后按各用户边际贡献度进行结算	日、星期等短期	小规模用户，需准确量化贡献度	多为利益分成	需事后核算贡献，管理复杂

套餐合约型是指虚拟电厂与用户就激励单价与其他规则在运营周期前签订合同约定，运营周期后按照套餐方案进行结算；动态定价型是指虚拟电厂事前向所有用户广播激励单价，由各用户自主响应邀约，事后按激励单价对用户进行结算；利益分配型是指虚拟电厂参与市场交易后，按照每个用户的边际贡献度对其进行结算。动态定价型一般需要在交易周期内与用户多次谈判，而利益分配型需要在交易周期后认定每个用户的边际贡献度，这两种方法难以适用于存在海量用户的场景。而对于套餐合约型，虚拟电厂运营商预先设置套餐品类供用户自行选择，用户根据套餐规则提供服务，虚拟电厂运营商根据价格进行结算，更便于兼顾多方诉求，更适用于存在海量用户的场景，也是售电公司[35]、电动汽车充电站[36]、电信运营商[37]等商业主体开展运营的主要手段。正因易于标准化管理、落地操作性强等优势，甘肃省、山东省、四川省等地的虚拟电厂运营管理方案中也明确规定虚拟电厂内部的交易结算以套餐形式实现。因此，本文以套餐合约为载体展开进一步研究。尽管已经有电力套餐的研究与实践，但当前多关注于电能量零售套餐。电力辅助服务套餐与电能量零售套餐存在根本差异。前者聚合主体为购买方，用户为出售方，交易商品为用户的调节能力；而后者聚合主体为出售方，用户为购买方，交易商品为电量。然而，二者也存在共通之处，即均面向终端电力用户，故电力辅助服务套餐设计的部分技

术方法可以借鉴电能量套餐的设计。例如,用户细分、个性化偏好诉求提取与套餐定制方法等。

3　总体实现架构

虚拟电厂电力辅助服务套餐的定制主要包括以下3个重要环节:定制设计、参数决策与动态修正。首先,设计多类型虚拟电厂电力辅助服务套餐标准化模板,确定每类套餐的具体模块;在此基础上,基于各类标准化套餐模板,制定各类套餐的模块参数;最后,在每个运营周期后对定制套餐进行动态修正,动态修正内容可包括套餐种类、套餐模块与套餐参数,以使套餐方案更高效,具体路线图见图1。

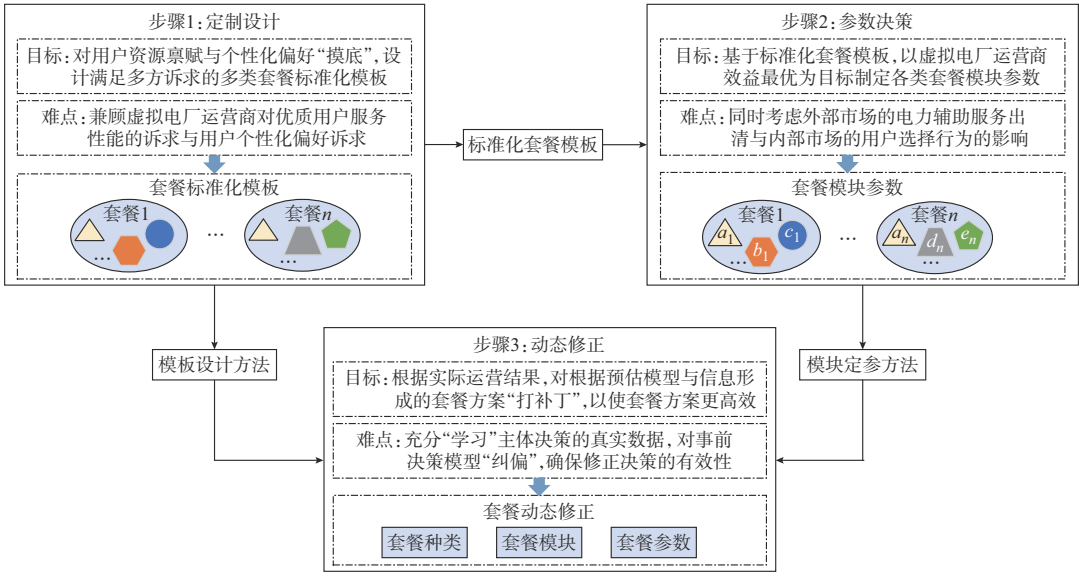

图1　虚拟电厂电力辅助服务套餐定制路线图

Fig. 1　Customization roadmap of power ancillary service packages for virtual power plant

下面对3个环节展开具体论述。

1)定制设计

面向电力辅助服务业务,虚拟电厂运营商是聚合方、购买方。电力辅助服务市场的准入、出清、结算、考核都与虚拟电厂的电力辅助服务聚合性能指标直接相关,因而催生出虚拟电厂运营商的诉求,即在避免低质量用户"搭便车"的同时,提升高质量用户的参与意愿。海量用户是供应方、出售方。行为经济学表示个体在经济活动中不会完全追求经济的最大化,具有一定的主观性,用户提供电力辅助服务具有个性化偏好诉求。同时,由于用户电气属性、内生属性等存在异质性,需进一步考虑海量用户个性化偏好诉求的差异性。因此,在套餐定制设计环节,须兼顾虚拟电厂运营商和海量用户的差异化、多样化诉求,"拟定"各类套餐模块,形成多类标准化套餐模板。

2)参数决策

在外部市场侧的电力辅助服务出清、在运营商侧的投标与激励、在用户侧的自主交易选择是内在耦合、相互影响的。一方面,不同于电能量市场,电力辅助服务市场交易量小并计及市场主体的服务性能指标,须考虑虚拟电厂的投标策略与其电力辅助服务聚合性能指标对市场出清的影响。而市场出清价格与中标情况又会影响虚拟电厂运营商对用户的激励策略。另一方面,虚拟电厂运营商对用户的激励策略直接影响用户的交易选择行为,从而影响虚拟电厂在外部电力辅助服务市场中的策略性行为与其电力辅助服务聚合性能指标。因此,各类套餐模块参数的制定须计及3个过程之间的联动,保证虚拟电厂运营商激励决策的全局性。

3)动态修正

在虚拟电厂周期性市场交易结束后,需要对虚拟电厂整体的运营情况进行综合评估,通过复盘总结优化套餐结构,不断提升激励效果,为下一个周期的运营奠定基础。虚拟电厂运营商的事前决策多基于常规机理模型与预测信息,存在大量假设与简化。然而,在后评估与修正阶段,虚拟电厂运营商可获得大量其他主体的真实决策数据,不仅包括具有个性化偏好、认知水平不高、与常规机理建模偏差较大的聚合用户,还包括具有隐私保护、依赖于预测信息建模的其他竞争主体。因此,后评估与修正环节须充分"学习"主体决策的真实数据,对事前决策模型"纠偏",确保动态修正的有效性。

4　套餐定制设计

4.1　营销学理论基础

套餐设计问题本质上隶属于营销学领域，主要涉及如何根据不同客户群体的需求特征与价值贡献，制定标准化且具有差异化的产品或服务方案。在营销学理论体系中，套餐设计通常被视为市场细分与客户关系管理策略的重要组成部分，旨在通过精准匹配客户偏好与资源供给，提升客户满意度与企业整体运营效益。市场细分理论认为，在任何一个看似统一的市场中，客户在需求偏好、购买行为、价格敏感度等方面存在显著差异。通过对客户群体的细致划分，可以更精准地识别不同群体的需求特征，进而制定更具针对性的产品或服务方案，以提高市场响应效率和资源配置效果。而客户价值理论进一步指出，客户对企业创造的价值具有异质性，即不同客户对企业整体绩效的贡献水平不同。通过识别高价值客户与一般价值客户，并据此进行资源倾斜与策略调整，可以在提升客户满意度的同时，优化企业收益结构和运营效率。此外，服务组合设计理论作为营销学体系中的另一重要组成部分，强调企业应根据市场细分结果和客户价值特性，合理规划服务种类、设计服务模块，并通过优化组合来满足多样化需求，提升资源配置效率与市场覆盖率。

基于营销学中的市场细分理论、客户价值理论与服务组合设计理论，套餐标准化模板的定制设计可通过用户细分、用户分层、模块最优组合3个步骤实现。根据用户细分与用户分层结果，构建差异化、多样化的套餐模块。在此基础上，通过套餐模块的优化组合，形成面向不同用户群体的标准化套餐模板。一方面，结合市场细分理论，不同用户群体在服务偏好、服务能力等方面存在显著差异，故需要通过细分用户群体来识别用户的个性化偏好诉求与调节能力，设计满足用户个性化偏好诉求的套餐，实现虚拟电厂运营商与用户共赢；另一方面，结合客户价值理论，不同用户对虚拟电厂的价值贡献具有差异性，故在套餐设计过程中，需要通过用户分层，向不同价值的用户提供不同的套餐，降低虚拟电厂运营商内部激励成本，同时，提升虚拟电厂的电力辅助服务聚合性能，增加外部电力辅助服务市场收益。

4.2　用户细分

用户在经济活动中会呈现逐利性，但也会受到自身主观因素的影响[38]。例如，部分用户关注在电力辅助服务业务周期内参与方式是否灵活、便捷[39]。因此，虚拟电厂运营商须进行用户细分，挖掘每类用户的个性化偏好诉求，从而设计面向用户的定制化、多样化激励套餐，提高终端用户的参与积极性。文献[40]考虑细分用户的调频方式偏好与隐私保护偏好，提出了电动汽车集群调频控制策略。尽管当前针对满足细分用户个性化偏好诉求的电力辅助服务激励套餐较少，但是在电动汽车充电套餐[36]、售电公司的购售电套餐[41]等方面已有部分研究。文献[36]考虑细分用户的态度偏好，提出了电动汽车差异化充电套餐设计方法。文献[41]考虑细分用户的风险偏好、价格偏好与舒适度偏好，提出了售电公司购售电策略。面向大量潜在用户，虚拟电厂运营商设计满足细分用户个性化偏好诉求的激励套餐的关键在于两方面：一是需要根据可获取的数据信息对用户进行细分；二是提取细分用户的典型个性化偏好。

用户细分方法主要分为无监督方法与有监督方法。无监督方法以聚类算法为主要手段[42-44]；而有监督算法旨在建立用户数据与标签之间的映射关系，常采用深度学习方法[45-46]。虚拟电厂运营商可结合潜在用户的规模大小、表后电气属性数据与可获取的内生属性数据，对大量潜在用户进行多次细分，如图2所示。考虑到一次细分标准是用户规模，因而无须借助聚类算法，仅需设定相应的指标门槛值并判断是否达到门槛值，即可完成用户群体的一次细分。用户的电气属性数据可反映用户的调节能力，内生属性数据与用户的个性化偏好直接相关，因而用户群体二次细分与三次细分的依据是电气属性数据与内生属性数据。在二次细分与三次细分中，需要通过数据降维，借助聚类算法，完成用户群体细分。由于不同的聚类算法适应于不同的数据结构，须考虑电气属性数据与内生属性数据的结构，选择与之相适应的不同聚类算法。基于用户群体细分结果对每一群体中典型用户的个性化偏好与电力辅助服务性能进行评估，从而提取每类用户的典型特征，作为设计标准化套餐模板的依据。

对于细分用户个性化偏好的提取方法，文献[47-48]基于问卷调研与多代理表征，研究了用户关于购买电动汽车与参与电网调控的个性化偏好。虚拟电厂运营商可通过设计问卷的形式，调研典型用户个性化偏好诉求，问卷信息主要有诉求采集与重要性排序两部分。其中，诉求采集可通过设置相关问题收集用户个性化偏好诉求，作为套餐模块设计的依据；重要性排序是对采集到的用户个性化诉求进行偏好排序，作为后续最优模块组合的依据。

4.3　用户分层

对于虚拟电厂运营商来说，参与聚合的用户具有数目多、性能差异大等特征，既包括具有空调、洗

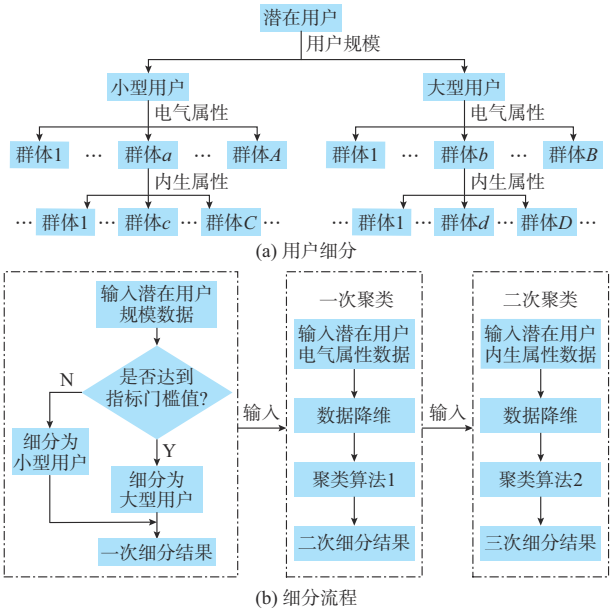

图 2　虚拟电厂用户细分示意图

Fig. 2　Schematic diagram of user segmentation for virtual power plant

衣机等可控负荷的居民用户[49]，也存在以集中供冷/热、电动汽车充电为主的商业用户[50]，还包括具有大型工业负荷、可控电源的工业用户[51]。因此，对于自负盈亏的虚拟电厂运营商而言，为了更好地作为一个独立的市场主体参与市场交易，有必要提高对内部资源的聚合管理能力并获得聚合特性[52]。此外，电力辅助服务市场出清时往往根据电力辅助服务性能指标对各市场主体的投标价格进行修正，该综合性能指标体现了市场主体与该类型电力辅助服务的契合度，契合度越高的市场主体中标的概率越高[8]。因此，虚拟电厂运营商有必要精准评价用户的服务性能，对用户价值进行分层，巩固优质用户留存并约束低质用户行为，从而提升自身的竞争优势。文献[53]提出了考虑动态过程的用户响应潜力评估指标。文献[54]考虑用户调峰性能的差异性，构建了用户优选指标体系并进行综合评价。然而，不同类型电力辅助服务对市场主体的性能要求有明显差异[8,55]，有必要在用户电力辅助服务性能通用评价指标的基础上，探究面向不同类型电力辅助服务的用户性能评价方法。面向电力辅助服务的用户性能通用评价指标包括响应容量、响应时延、响应速率、响应持续时间、响应精度与响应不确定性。虚拟电厂运营商可通过主观赋权法与客观赋权法相结合的方法确定各项指标权重系数，形成用户电力辅助服务性能评价结果，从而实现用户分层。具体步骤如下：

1)利用主观赋权法确定各项指标权重系数向量 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{SW}}$：虚拟电厂运营商根据不同类型的电力辅助服务性能要求做出评价，确定权重系数向量。不同类型的电力辅助服务对于各项指标的要求并不相同。例如，调峰电力辅助服务一般具有较长的响应持续时间、较大的响应容量准入门槛要求；而调频电力辅助服务一般对响应时延、响应速率与响应精度的要求较高。因此，虚拟电厂运营商面向不同类型电力辅助服务设定的各评价指标权重系数也不尽相同。如前所述，针对调峰电力辅助服务，响应持续时间与响应容量的指标权重系数相对较大，而调频电力辅助服务中响应时延、响应速率与响应精度的指标权重系数相对较大。

2)利用客观赋权法确定各项指标权重系数向量 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{OW}}$，从而修正指标权重系数：充分考虑用户资源禀赋的差异性，差异小的性能评价指标被赋予更小的权重，从而使评价模型更具有针对性，主要步骤包括数据标准化、计算信息熵、确定指标权重系数。

3)采用线性加权的方法，综合主观指标权重系数向量 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{SW}}$ 与客观指标权重系数向量 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{OW}}$，确定用户电力辅助服务性能评价指标权重系数向量 $\boldsymbol{\omega}$，如式(1)所示。

$$\boldsymbol{\omega}=\vartheta\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{SW}}+(1-\vartheta)\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{OW}} \tag{1}$$

式中：ϑ 为线性加权系数。

4)根据性能评价指标权重系数向量 $\boldsymbol{\omega}$ 与用户归一化后的各项指标值，形成用户电力辅助服务性能评价得分，如式(2)所示。

$$z_i^{\mathrm{O}}=\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z}_i^{1} \tag{2}$$

式中：z_i^{O} 和 $\boldsymbol{z}_i^{1}$ 分别为用户 i 的电力辅助服务性能评价得分与归一化后的指标值向量。

5)根据用户的电力辅助服务性能评价得分，虚拟电厂运营商划分用户层级，提供不同的电力辅助服务套餐，以满足虚拟电厂运营商自身诉求。

4.4　模块最优组合

服务组合设计理论强调，通过形成一系列满足用户需求的套餐产品，可以显著提升用户的满意度与信任度，最终增强用户对企业的忠诚度以及选择的倾向性[56]。此理论为大规模定制提供了用户驱动的个性化解决方案，在制造、电子商务、电动汽车、电信等多个行业中得到了广泛应用。在制造业，文献[57]根据用户个性化需求和产品模块信息，提出了基于因子分解的定制化产品配置推荐模型，用于高效设计定制化产品。文献[58]提出了模块化产品与可重构制造系统并行优化配置的方法，在考虑用户个性化需求的前提下最小化制造成本。在电子商务领域，文献[59]为了权衡满足用户个性化需求并

保证企业盈利性差异化目标，提出了动态定制的概念，即根据市场条件和用户需求的变化，灵活调整定制策略。在电动汽车行业，文献[56]提出了面向电动汽车租赁的多目标服务组合优化设计方法，针对推广市场的不同阶段分别制定电动汽车租赁服务组合定制套餐。在电信领域，文献[60]在模块化产品族结构基础上提出了一种定制电信产品配置模型。在电力领域中，套餐定制化设计的相关研究较少，还处于起步阶段。文献[61]针对电动汽车用户提出了一种电价套餐模块化设计方法。

在虚拟电厂电力辅助服务定制化套餐设计中，可根据虚拟电厂运营商用户分层诉求与用户个性化偏好诉求，设计相应的套餐模块。在此基础上，对所设计的套餐模块优化组合，形成多类型标准化套餐模板。在套餐模块优化组合时，目标函数可考虑用户感知绩效、套餐相容度、虚拟电厂服务成本等方面，约束条件则需要考虑每类套餐有对应的服务群体等，具体示意图见图3。

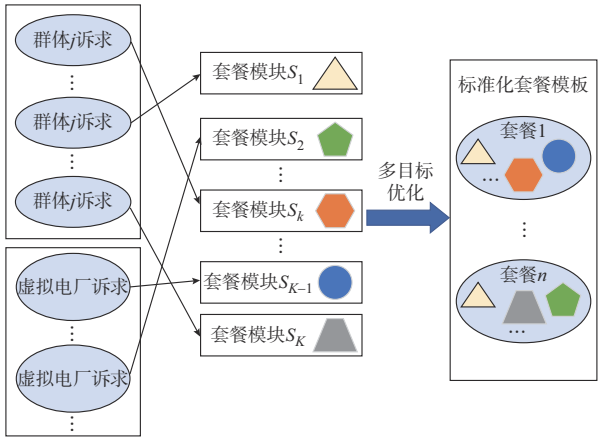

图3　虚拟电厂电力辅助服务套餐模板定制设计示意图
Fig. 3　Schematic diagram of customized template design for power ancillary service packages in virtual power plant

5　套餐参数决策

5.1　联合优化

基于外部电力辅助服务市场价格，虚拟电厂运营商进行用户侧激励套餐参数制定，如何确定参数是其盈利的关键问题。已有研究大多局限于价格参数，将虚拟电厂最优决策问题简化为最优定价问题，通过混合整数非线性规划[62-63]、博弈论等方法建立定价模型。作为一种典型的非合作博弈理论，主从博弈具有分层结构，是研究多层次、多主体决策问题的有力工具[63]。文献[64]提出电力零售商作为领导者、电力用户作为跟随者的定价方法，其中，电力零售商的博弈目标侧重于峰谷差最小，电力用户的博弈目标侧重于用电成本最低。文献[65]中将进行供能与能源转换的多社区综合能源系统运营商作为领导者，通过制定能源价格来实现净利润的最大化，而用户作为跟随者，通过调整其能源消费计划使其总成本最小化。在定价策略中，若价格过低，则用户参与服务的积极性不高，虚拟电厂可能会无法达到电力辅助服务市场的聚合容量准入门槛；反之，若激励用户的成本过高，甚至可能高于其外部电力辅助服务市场收入，则其利润也会有所损失。因此，虚拟电厂运营商最优定价问题须考虑两方面：一方面，在与用户的互动中需要考虑激励价格的有效性，下层海量用户为独立的利益主体，行为受个体效用与有限理性约束，需要考虑个体行为的策略性和随机性[66]；另一方面，应保证在此激励价格下，虚拟电厂在外部市场中通过出售电力辅助服务容量可获得一定利润[67-68]。应充分考虑内部用户交易行为与外部电力辅助服务市场出清的影响，将虚拟电厂运营商的激励策略与投标策略联合研究。

此外，套餐参数变量不仅可包括价格，还可包括其他套餐模块可量化参数，将虚拟电厂套餐参数最优决策问题简化为最优定价问题可能会牺牲虚拟电厂运营商效益。文献[69]以套餐激励价格和用户避峰响应系数为决策变量，设计售电套餐来引导电力用户参与电力需求响应。因此，须全面考虑套餐激励中可量化的多维决策变量，将解空间扩展，进一步提升激励决策效益。

虚拟电厂电力辅助服务套餐参数最优决策问题可建模为多层级多主体博弈问题：上层为虚拟电厂优化运营模型；下层为用户交易行为模型、电力辅助服务市场出清模型，具体结构见图4。一方面，虚拟电厂运营商决定用户侧各类套餐的模块参数，内部用户根据套餐模块参数确定其套餐选择、响应容量等，从而影响虚拟电厂在电力辅助服务市场中的投标价格、容量与电力辅助服务聚合性能指标；另一方面，虚拟电厂在电力辅助服务市场中的投标策略与聚合性能指标将影响电力辅助服务市场的出清结果，从而作用于虚拟电厂各类套餐模块参数。与动态定价不同的是，虚拟电厂套餐参数优化问题涉及较长的套餐签订周期，多为月度、季度等，故需要考虑在套餐签订周期内的N个典型外部市场场景。同时，虚拟电厂内部聚合J个用户群体。综上，虚拟电厂套餐参数优化问题是单领导者、$J+N$个跟随者的主从博弈。

5.2　内部用户交易行为建模

对于用户交易行为的研究，需要建立内部用户的效用函数[70]，完全理性的用户会以自身的效用函

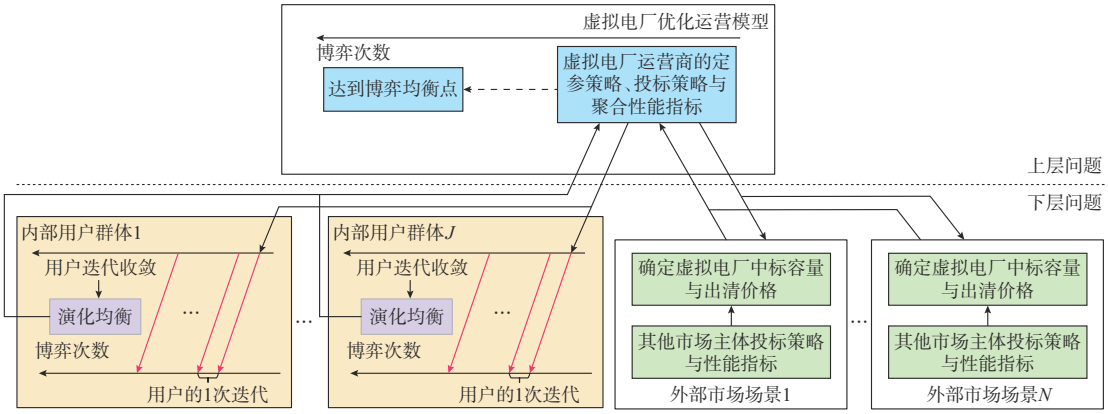

图4　虚拟电厂套餐参数最优决策结构

Fig. 4　Optimal decision structure of package parameters for virtual power plant

数最大化为目标进行交易活动[71]。如前所述，用户的效用函数不仅需要考虑经济效用，还要考虑与用户个性化偏好相关的效用项[72]。文献[73]综合考虑售电合同、公司品牌与供电服务三方面建立用户的效用模型。文献[74]从综合用能成本、供能占有率、供能可靠率与用户舒适度入手，提出用户效用量化方法。文献[75]综合考虑消费者的心理因素和社会网络的影响，建立了消费者关于电动汽车购买意愿的效用函数。为此，综合考虑用户的经济效益与用户的个性化偏好，建立每类用户的效用函数，第j类用户选择套餐n的效用函数$U_{j,n}$可表示如下：

$$U_{j,n}=V_{j,n}+\varepsilon_{j,n}=\sum_{s}\beta_{j,s}B_{j,n,s}+\varepsilon_{j,n} \tag{3}$$

式中：$V_{j,n}$为固定效用项，代表可观测的效用；$\varepsilon_{j,n}$为随机误差项，代表不可观测的效用；$B_{j,n,s}$、$\beta_{j,s}$分别为第j类用户选择套餐n时第s项效用及其对应的系数，具体可包括经济效益、多类型个性化偏好效用。

离散选择模型是一种解释或预测从一组两个或多个离散备选方案中进行选择的方法，可用来刻画用户选择套餐的行为。根据随机效用最大化原理，若在选择情境中存在多个选项，则第j类用户在N'个选项中选择第n个套餐的概率$F_{j,n}$可以表示为：

$$F_{j,n}=\frac{\mathrm{e}^{U_{j,n}}}{\sum_{n}\mathrm{e}^{U_{j,n}}} \tag{4}$$

然而，完全理性的假设会偏离现实生活中用户的决策过程，存在过于理想化的缺陷[76]，建立在“有限理性”与“有限信息”假设上的演化博弈可以在重复博弈的过程中寻找最优均衡点[77]。文献[78]研究电动汽车用户的社会属性与用户之间的相互学习过程，建立了考虑复杂网络的演化博弈模型，博弈均衡点反映了用户对充放电激励的响应。因此，虚拟电厂套餐参数优化模型可被扩展为双层博弈模型：模型下层可以通过演化博弈来分析用户的动态行为；上层可以通过非合作博弈来确定最优套餐参数。为此，可采用演化博弈论建立有限理性用户的套餐选择行为模型，须对式(4)所示的离散选择模型进行修正，得到各类有限理性用户在选择套餐过程中的条件转换概率：

$$\rho_{j,n',n}=\frac{\mathrm{e}^{\eta^{-1}U_{j,n}}}{\sum_{n'}\mathrm{e}^{\eta^{-1}U_{j,n'}}} \tag{5}$$

式中：$\rho_{j,n',n}$为第j类有限理性用户选用套餐n的条件转换概率，具体含义为第j类用户从套餐n'转移到套餐n的比例；η为噪声水平。

5.3　外部电力辅助服务市场出清建模

关于外部电力辅助服务市场建模的研究，主要可以分为是否计及虚拟电厂投标对市场出清过程的影响两类。当不考虑影响时，虚拟电厂在电力辅助服务市场中作为价格接受者，根据预测的市场出清价格形成虚拟电厂在电力辅助服务市场中的投标策略。而市场出清价格是由市场主体投标策略和市场需求所决定的，具有不确定性。因此，该类研究也简化为市场价格不确定性的建模研究，主要可分为以下3类：1)鲁棒优化方法，可基于区间扰动信息，在最恶劣的扰动条件下做出最优决策[79]；2)随机优化方法，基于不确定因素的概率分布生成典型场景，根据典型场景与场景概率做出最优决策[34]；3)信息间隙理论，是一种处理不确定性的非概率、非模糊方法，可在不确定变量的概率分布以及波动范围均未知的情况下量化变量的不确定性，并且可以根据决策者的偏好提供不同的决策方案[80]。

然而，不同于能量市场，电力辅助服务市场的交易量较小，这使得虚拟电厂具备影响市场出清过程的能力[81]。策略性行为是指市场主体为提高收益所采取的旨在影响市场环境的行为总称。因此，有

必要考虑其投标对市场出清过程的影响，研究虚拟电厂电力辅助服务市场策略性行为的建模方法。目前，对于该问题的研究主要分为两类：一是建立双层优化模型，上层是虚拟电厂的优化运营模型，下层是电力辅助服务市场出清模型；二是基于价格配额曲线（price quota curve，PQC）构建虚拟电厂的投标约束，电力辅助服务市场的逐时价格配额曲线是分段递减的阶梯式曲线，市场出清价格可视为虚拟电厂投标容量的分段递减函数，虚拟电厂的投标价格即为市场出清价格[82]。此外，电力辅助服务市场综合考虑市场主体的报价与电力辅助服务性能形成排序价格，按照排序价格对市场主体由低到高排序确定中标市场主体，使电力辅助服务性能好的市场主体更有可能被选中[83]。因此，虚拟电厂电力辅助服务市场策略性行为建模还需计及虚拟电厂电力辅助服务聚合性能的影响。

1）双层优化方法

双层优化方法中，不同类型电力辅助服务的市场出清模型会存在一定差异，在此仅展示可体现共性的下层电力辅助服务市场出清模型：

$$\min M(\boldsymbol{P}_o^{\mathrm{Win}};\ \boldsymbol{\pi}_o^{\mathrm{Bid}},\mu_o) \tag{6}$$

$$\text{s.t.}\quad \boldsymbol{G}(\boldsymbol{P}_o^{\mathrm{Win}};\ \boldsymbol{P}_o^{\mathrm{Bid}},\boldsymbol{\pi}_o^{\mathrm{Bid}},\mu_o)=0 \tag{7}$$

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{P}_o^{\mathrm{Win}};\ \boldsymbol{P}_o^{\mathrm{Bid}},\boldsymbol{\pi}_o^{\mathrm{Bid}},\mu_o)\leqslant 0 \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{P}_o^{\mathrm{Win}}$为电力辅助服务市场主体$o$的中标容量；$\boldsymbol{P}_o^{\mathrm{Bid}}$、$\boldsymbol{\pi}_o^{\mathrm{Bid}}$、$\mu_o$分别为电力辅助服务市场主体$o$的投标容量、价格和性能指标；$M(\cdot)$为双层优化方法函数，$\boldsymbol{G}(\cdot)$为其等式约束，$\boldsymbol{H}(\cdot)$为其不等式约束。

2）PQC法

由于电力辅助服务市场出清、结算环节与市场主体的性能指标紧密相关，故不同虚拟电厂聚合性能指标下的PQC具有一定差异，如附录A图A1所示。基于PQC，可建立虚拟电厂电力辅助服务收益函数F^{S}（式（9））、PQC的相关约束（式（10）、式（11）），使虚拟电厂投标价格与投标容量满足PQC函数，PQC法得到的相关约束条件可直接嵌入上层虚拟电厂优化运营模型中。因此，当利用PQC法时，虚拟电厂电力辅助服务套餐参数优化决策问题中下层仅存在用户交易行为模型。

$$F^{\mathrm{S}}=\Phi(\boldsymbol{P}_{\mathrm{VPP}}^{\mathrm{Bid}},\boldsymbol{\pi}_{\mathrm{VPP}}^{\mathrm{Bid}},\mu_{\mathrm{VPP}}) \tag{9}$$

$$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{VPP}}^{\mathrm{Bid}},\boldsymbol{\pi}_{\mathrm{VPP}}^{\mathrm{Bid}},\mu_{\mathrm{VPP}})\leqslant 0 \tag{10}$$

$$\boldsymbol{\kappa}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{VPP}}^{\mathrm{Bid}},\boldsymbol{\pi}_{\mathrm{VPP}}^{\mathrm{Bid}},\mu_{\mathrm{VPP}})=0 \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{P}_{\mathrm{VPP}}^{\mathrm{Bid}}$、$\boldsymbol{\pi}_{\mathrm{VPP}}^{\mathrm{Bid}}$、$\mu_{\mathrm{VPP}}$分别为虚拟电厂的投标容量、价格和聚合性能指标；$\Phi(\cdot)$为PQC函数，$\boldsymbol{K}(\cdot)$为其等式约束，$\boldsymbol{\kappa}(\cdot)$为其不等式约束。

6　套餐动态修正

6.1　适应性后评估

在交易周期结束后，对虚拟电厂整体的运营情况进行复盘有助于形成“先试水、后补漏”的闭环链路，通过对内部用户效益和虚拟电厂运营商效益进行后评估，再根据结果对套餐进行修正，将显著利好各涉及主体在后续运营周期的成效。

用户对套餐的评估结果决定了其在后续运营周期内是否有意愿继续参与虚拟电厂调控，由于用户对需求的描述具有模糊性、动态性和不确定性，现有研究大多通过用户满意度进行评估。多重维度表征的用户满意度评估方法已在社交网络[84]、电商平台[85]、电力[86]等领域取得应用，研究具体包含如下方面：

1）建立覆盖不同维度的用户满意度指标，在不同场景下用户满意度指标的选取具有一定的差异性。文献[86]所提满意度指标主要考虑用户消耗电量中绿电所占比例；文献[87]所提满意度指标计及用户收益、用电方式和发电方式。

2）采集计算满意度指标所需的数据，数据类型分为显式和隐式两种。其中，显式数据通过问卷调查直接获取用户评分，隐式数据则根据用户的购买、点击、收藏等实际行为间接获取[35]。

3）基于采集数据，识别关键满意度指标。文献[88]基于Shapley值算法，对181份满意度测评问卷中的关键满意度指标进行提取，并形成针对性改进策略；文献[89]运用决策实验室分析（DEMATEL）方法，通过分析各满意度指标之间的关系来识别关键影响指标。然而，上述方法无法评估实际结果与预期设想的差距及其对用户未来决策的影响，有必要进一步开展面向用户满意度的研究。前景理论中的价值函数作为序数效应函数的替代，着重说明行为人如何进行效用评价，可以用来评估实际结果与预期设想的差距对用户未来决策的影响，作为用户价值评判、投资决策的依据[90]。因此，可采用前景理论，考虑用户对套餐的感知与期望，量化评估用户对于套餐方案调整的需求。

对虚拟电厂运营情况进行后评估能够精准掌握套餐的执行效果，通过动态修正具体环节能够精确挖掘各类用户的调节潜力，使虚拟电厂的综合效益获得最大化提升。在评估方法方面，层次分析法[91]、云模型[92]、熵权法[93]、灰色关联分析[94]等已经取得广泛应用。同时，针对虚拟电厂评估的研究，在运行风险[95-96]、用户遴选[97-98]、经济效益[99]等方面已有一定成果积累。

6.2　动态修正推演

在电力系统运行中，基于后评估的决策动态修正机制已成为不断提升决策效果的重要研究方向，在调度[100]、交易[101]、预测[102]中均有一定的应用，其核心思想是通过构建“决策-执行-反馈-优化”闭环机制，利用历史数据与实时信息迭代更新策略。目前，相关研究大多仅依据后评估结果，以最小化偏差等方式直接修正决策，鲜少对修正后的物理系统开展模拟推演验证，难以全面考量系统在新决策下的变化趋势。现有模拟推演研究主要基于应用理论分析与给定机理模型仿真。文献[103]基于系统动力学，建立了面向新能源投资租赁模式的多时间尺度零售行为推演。文献[104]基于多智能体深度强化学习，对发售电集团内部的发电公司和售电公司进行合谋行为推演。然而，在虚拟电厂运营场景中，此类方法存在显著局限性。一方面，未充分考虑用户的个性化偏好与有限理性特征，难以准确刻画其决策逻辑[105]；另一方面，忽略竞争主体间不完全信息的影响，导致推演结果与实际偏差较大。人工智能代理是一种能够通过感知环境信息进行动态决策并执行动作的智能体，具备在特定任务或领域中自主学习和持续优化的能力。其核心特征在于通过人工智能技术，精准提取复杂环境中的关键信息，并基于先验知识、决策策略与实时反馈不断优化决策机制[106]。目前，人工智能代理凭借其高效的环境感知、动态决策与自适应性，已广泛应用于游戏、自动驾驶、对话系统等复杂场景，为多主体博弈与系统优化提供了解决方案。在每个运营周期后，虚拟电厂运营商均可获得主体的真实决策数据，以此训练人工智能代理可有效学习用户的选择响应行为与竞争主体的博弈策略，使人工智能代理的推演行为动态收敛于物理实体的真实决策轨迹，基于人工智能代理建立的虚拟电厂运营模拟推演可实现更加精准的评估与验证。

虚拟电厂套餐的动态修正推演流程见图5，可总结如下：融合用户效益的后评估结果和虚拟电厂运营商效益的后评估结果，并将其与预期效益进行对比，若达到预期值，则不进行后续的动态修正过程，否则进入动态修正环节；在动态修正环节，结合效益后评估结果，辨识关键修正因素；选取并修正部分关键因素，通过多人工智能代理模拟推演修正关键因素后的虚拟电厂运营情况；将模拟推演后的虚拟电厂运营效益与预期进行对比，若达到给定值则结束整个动态修正流程，并输出优化后的调整方案，若未达到则重新进行动态修正；重复上述步骤直至达到预期值。

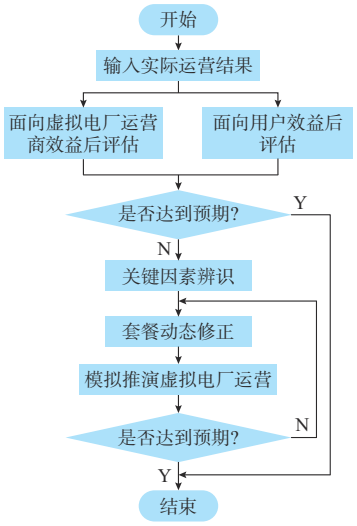

图5　基于效益评估与模拟推演的套餐动态修正流程图
Fig. 5　Flow chart of package dynamic adjustment based on benefit evaluation and simulation deduction

7　结语

虚拟电厂通过聚合管理用户侧资源来提供电力辅助服务是提升电网经济安全稳定性、支撑中国新型电力系统建设的关键手段。考虑到虚拟电厂运营商不拥有用户侧资源的实际所有权，面向电力辅助服务的虚拟电厂激励机制是其商业运营的核心技术。本文梳理了相关的市场规则与运营方案，分析了中国虚拟电厂实现盈利的边界条件，综述了激励机制的内涵、分类与具体表现形式。进一步地，本文以电力辅助服务套餐作为激励机制的载体，更适用于存在海量用户的场景，具有商业化推广的前景。从定制设计、参数决策与动态修正3个关键环节出发，提出了虚拟电厂电力辅助服务套餐定制的总体实现架构，剖析了其中的关键问题与难点，包括协调多方诉求、保证优化的全局性以及亟须评估修正闭环反馈。针对上述关键环节，围绕营销学理论基础、用户细分、用户分层、模块最优组合、联合优化、内部用户交易行为建模、外部电力辅助服务市场出清建模、适应性后评估以及动态修正推演9个关键技术，综述了相关研究成果。在此基础上，本文提出了适用于虚拟电厂电力辅助服务套餐定制的关键技术解决方案，助力虚拟电厂创新发展，充分挖掘用户侧调节潜力，支撑新型电力系统建设。

此外，为验证本文提出的定制化套餐激励机制的有效性，后续将对相关验证与分析进行详细阐述，即通过用户聚类、定制化套餐设计、用户套餐选择预测和主从博弈套餐参数优化，验证并分析定制化套餐在提升用户参与度和虚拟电厂收益方面的显著效果，以展现本文技术框架在实践中的具体应用。

附录见本刊网络版，点击 http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20250430006，或扫描英文摘要后二维码，可阅读全文。

参 考 文 献

[1] 国家发展改革委.关于印发《电力需求侧管理办法（2023年版）》的通知[EB/OL].[2025-03-20].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202309/t20230927_1360902.html.
National Development and Reform Commission. Notice on issuing the "Measures for Power Demand-side Management (2023 edition)"[EB/OL].[2025-03-20].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202309/t20230927_1360902.html.

[2] 国家发展改革委，国家能源局.关于建立健全电力辅助服务市场价格机制的通知[EB/OL].[2025-04-10].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202402/content_6931026.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on establishing and improving the price mechanism for the power ancillary services market[EB/OL].[2025-04-10].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202402/content_6931026.htm.

[3] 国家发展改革委.关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见[EB/OL].[2025-04-10].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202410/t20241030_1394119.html.
National Development and Reform Commission. Guiding opinions on vigorously implementing renewable energy replacement actions[EB/OL].[2025-04-10].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202410/t20241030_1394119.html.

[4] 国家发展改革委.电力系统调节能力优化专项行动实施方案（2025—2027年）[EB/OL].[2025-04-10].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202501/content_6996643.htm.
National Development and Reform Commission. Implementation plan for the special action on optimizing power system regulation capacity (2025—2027)[EB/OL].[2025-04-10].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202501/content_6996643.htm.

[5] 陈启鑫，高洪超，冯成，等.虚拟电厂动态构建与可信量化：理论分析与关键技术[J].电力系统自动化，2022，46(18)：26-36.
CHEN Qixin, GAO Hongchao, FENG Cheng, et al. Dynamic construction and trustworthy quantification of virtual power plant: theoretical analysis and key technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 26-36.

[6] 左娟，艾芊，王帝，等.面向虚拟电厂的电力调峰市场隐私保护交易策略[J].电力系统自动化，2024，48(18)：149-157.
ZUO Juan, AI Qian, WANG Di, et al. Privacy preservation trading strategy for power peak-shaving market with participation of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 149-157.

[7] 陶伟健，艾芊，李晓露.虚拟电厂协同调度及市场交易的研究现状及展望[J].南方电网技术，2024，18(12)：62-76.
TAO Weijian, AI Qian, LI Xiaolu. Research status and prospects of collaborative scheduling and market trading of virtual power plants[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(12): 62-76.

[8] 李嘉媚，艾芊，殷爽睿.虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J].中国电机工程学报，2022，42(1)：37-56.
LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-56.

[9] 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.
ZHAO Jianli, XIANG Jiani, TANG Zhuofan, et al. Practice exploration and prospect analysis of virtual power plant in Shanghai[J]. Electric Power, 2023, 56(2): 1-13.

[10] 甘肃省工业和信息化厅，国网甘肃省电力公司.甘肃省虚拟电厂建设与运营管理实施方案（试行）（征求意见稿）[EB/OL].[2025-04-28].https://gxt.gansu.gov.cn/gxt/c107573/202411/174021268.shtml.
Gansu Provincial Department of Industry and Information Technology, State Grid Gansu Electric Power Company. Gansu virtual power plant construction and operation management implementation plan (trial) (draft for comments)[EB/OL].[2025-04-28].https://gxt.gansu.gov.cn/gxt/c107573/202411/174021268.shtml.

[11] 广东省发展和改革委员会，广东省能源局.广东省虚拟电厂参与电力市场交易实施方案[EB/OL].[2025-04-28].https://drc.gd.gov.cn/snyj/tzgg/content/post_4526577.html.
Guangdong Provincial Development and Reform Commission, Guangdong Provincial Energy Administration. Implementation plan for virtual power plant participation in Guangdong electricity market transactions[EB/OL].[2025-04-28].https://drc.gd.gov.cn/snyj/tzgg/content/post_4526577.html.

[12] 广东省能源局.广东省电力市场运行规则（征求意见稿）[EB/OL].[2025-04-28].https://nfj.nea.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/scjg/202408/P020240809773345980756.pdf.
Guangdong Provincial Energy Administration. Guangdong electricity market operation rules (draft for comments)[EB/OL].[2025-04-28].https://nfj.nea.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/scjg/202408/P020240809773345980756.pdf.

[13] 山东省发展和改革委员会，山东省能源局.山东电力市场规则（试行）[EB/OL].[2025-04-28].https://sdb.nea.gov.cn/dtyw/tzgg/202404/t20240419_261034.html.
Shandong Provincial Development and Reform Commission, Shandong Provincial Energy Administration. Shandong electricity market rules (trial)[EB/OL].[2025-04-28].https://sdb.nea.gov.cn/dtyw/tzgg/202404/t20240419_261034.html.

[14] CHAUDHRY A. Report on FCAS events and BESS investment returns in Australia[EB/OL].[2025-06-07].https://www.powertechenergy.com.au/a/report-on-fcas-events-and-bess-investment-returns-in-australia.

[15] FU J Y, ZHOU T, ZHAO X T, et al. Practice and enlightenment of Australian virtual power plant participating in market operation[J]. E3S Web of Conferences, 2023, 466: 01009.

[16] 上海市发展和改革委员会.上海市新型电力系统调节能力奖励资金管理办法[EB/OL].[2025-06-09].https://fgw.sh.gov.cn/fgw_gfxwj/20250519/463852516eb64060b6962fb68c2b75fb.html.
Shanghai Municipal Development and Reform Commission.

Management measures for reward funds of regulating capacity in Shanghai's new power system [EB/OL]. [2025-06-09]. https://fgw.sh.gov.cn/fgw_gfxwj/20250519/463852516eb64060b6962fb68c2b75fb.html.

[17] 深圳市发展和改革委员会.深圳市支持虚拟电厂加快发展的若干措施[EB/OL].[2025-06-09].https://fgw.sz.gov.cn/gkmlpt/content/11/11351/post_11351896.html.
Shenzhen Municipal Development and Reform Commission. Several measures to accelerate the development of virtual power plants in Shenzhen [EB/OL]. [2025-06-09]. https://fgw.sz.gov.cn/gkmlpt/content/11/11351/post_11351896.html.

[18] NOSRATABADI S M, HOOSHMAND R A, GHOLIPOUR E. A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 341-363.

[19] Wikipedia. Virtual power plant [EB/OL]. [2025-06-09]. https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_power_plant.

[20] 张蕊,陈旭.电动汽车不光会用电,也能卖电赚钱!揭秘虚拟电厂[EB/OL].[2025-06-09].https://www.nbd.com.cn/articles/2022-10-13/2497879.html.
ZHANG Rui, CHEN Xu. Electric vehicles not only consume electricity but can also earn money by selling it! Demystifying virtual power plants [EB/OL]. [2025-06-09]. https://www.nbd.com.cn/articles/2022-10-13/2497879.html.

[21] 冉涌,李慧勇,冯煜.国网山西电力:创新虚拟电厂市场化运营模式[EB/OL].[2025-06-09].http://www.sx.sgcc.com.cn/homepage/wbw/articles/202412/a1161517.html.
RAN Yong, LI Huiyong, FENG Yu. State Grid Shanxi Electric Power: innovative market-oriented operation model for virtual power plants [EB/OL]. [2025-06-09]. http://www.sx.sgcc.com.cn/homepage/wbw/articles/202412/a1161517.html.

[22] SEPA. 2025 Q1 VPP & DER policy updates[EB/OL]. [2025-06-09]. https://sepapower.org/knowledge/2025-q1-vpp-der-policy-updates/.

[23] MURRAY C. VPP roundup: what VPP programmes and software have to offer[EB/OL]. [2025-06-09]. https://www.energy-storage.news/vpp-roundup-what-vpp-programmes-and-software-have-tooffer/.

[24] Energy Matters. Understanding virtual power plants (VPPs) in Australia [EB/OL]. [2025-06-09]. https://www.energymatters.com.au/renewable-news/understanding-virtual-power-plants-vpps-in-australia/.

[25] NGUYEN D T, NGUYEN H T, LE L B. Dynamic pricing design for demand response integration in power distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3457-3472.

[26] QIU H F, GU W, WANG L, et al. Trilayer Stackelberg game approach for robustly power management in community grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(6): 4073-4083.

[27] ZHANG R F, JIANG T, LI G Q, et al. Stochastic optimal energy management and pricing for load serving entity with aggregated TCLs of smart buildings: a Stackelberg game approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(3): 1821-1830.

[28] 姜昊,王玉峰.基于在线学习的面向居民用户激励型需求响应[J].电工电能新技术,2023,42(6):23-33.
JIANG Hao, WANG Yufeng. Incentive demand response for residential users based on online learning [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(6): 23-33.

[29] CHEN W, QIU J, CHAI Q M. Customized critical peak rebate pricing mechanism for virtual power plants [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2169-2183.

[30] LAI S Y, QIU J, TAO Y C, et al. Customized pricing strategy for households based on occupancy-aided load disaggregation [J]. IEEE Transactions on Energy Markets, Policy and Regulation, 2023, 1(2): 118-130.

[31] 谢敏,黄莹,李弋升,等.分布式能源动态聚合于虚拟电厂的演化博弈决策方法和机理分析[J].电网技术,2023,47(12):4958-4977.
XIE Min, HUANG Ying, LI Yisheng, et al. Evolutionary game decision and mechanism analysis of dynamical aggregation of distributed energy resources into virtual power plant [J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4958-4977.

[32] WANG F, GE X X, LI K P, et al. Day-ahead market optimal bidding strategy and quantitative compensation mechanism design for load aggregator engaging demand response[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5564-5573.

[33] LI J M, AI Q, YIN S R, et al. An aggregator-oriented hierarchical market mechanism for multi-type ancillary service provision based on the two-loop Stackelberg game[J]. Applied Energy, 2022, 323: 119644.

[34] 李嘉媚,艾芊.考虑调峰辅助服务的虚拟电厂运营模式[J].电力自动化设备,2021,41(6):1-13.
LI Jiamei, AI Qian. Operation mode of virtual power plant considering peak regulation auxiliary service[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 1-13.

[35] 张智,王韵楚,林振智,等.基于套餐隐式评分与用户画像的电力套餐推荐方法[J].电力系统自动化,2023,47(4):91-101.
ZHANG Zhi, WANG Yunchu, LIN Zhenzhi, et al. Electricity plan recommendation method based on implicit score of electricity plan and user portrait [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 91-101.

[36] 王华昕,张高丽,刘隽,等.计及用户贡献度的电动汽车主从博弈差异化充电套餐设计[J].电力自动化设备,2022,42(10):21-29.
WANG Huaxin, ZHANG Gaoli, LIU Jun, et al. Design of differentiated charging package for electric vehicle based on Stackelberg game considering user contribution [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 21-29.

[37] 张铁军,雒兴刚,蔡莉青,等.基于顾客选择行为的移动资费套餐优化模型[J].系统工程理论与实践,2014,34(2):444-450.
ZHANG Tiejun, LUO Xinggang, CAI Liqing, et al. Optimization model for mobile billing suite based on customer choice analysis [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(2): 444-450.

[38] JHALA K, NATARAJAN B, PAHWA A. Prospect theory-based active consumer behavior under variable electricity pricing [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2809-2819.

[39] 宋梦,周佳妮,高赐威,等.CPSS视角下城市建筑与配电网高韧性协调运行:研究述评与展望[J].电力系统自动化,2023,47(23):105-121.
SONG Meng, ZHOU Jiani, GAO Ciwei, et al. High-resilience coordinated operation of urban buildings and distribution networks from cyber-physical-social system perspective: research review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 105-121.

[40] 王明深,潘益,缪惠宇,等.考虑用户多样化需求的电动汽车集群调频控制策略[J].现代电力,2024,41(3):565-573.
WANG Mingshen, PAN Yi, MIAO Huiyu, et al. Frequency regulation strategy of EV aggregator considering various user requirements [J]. Modern Electric Power, 2024, 41(3): 565-573.

[41] 彭一海,刘继春,刘俊勇.两级电力市场环境下考虑多类型零售套餐的售电公司购售电策略[J].电网技术,2022,46(3):944-957.
PENG Yihai, LIU Jichun, LIU Junyong. Electricity purchasing and selling strategies for electricity retailers considering multiple types of retail packages in two level electricity market [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 944-957.

[42] 朱天怡,艾芊,贺兴,等.基于数据驱动的用电行为分析方法及应用综述[J].电网技术,2020,44(9):3497-3507.
ZHU Tianyi, AI Qian, HE Xing, et al. An overview of data-driven electricity consumption behavior analysis method and application[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3497-3507.

[43] MENG F L, MA Q, LIU Z X, et al. Multiple dynamic pricing for demand response with adaptive clustering-based customer segmentation in smart grids[J]. Applied Energy, 2023, 333: 120626.

[44] 孔祥玉,马玉莹,艾芊,等.新型电力系统多元用户的用电特征建模与用电负荷预测综述[J].电力系统自动化,2023,47(13):2-17.
KONG Xiangyu, MA Yuying, AI Qian, et al. Review on electricity consumption characteristic modeling and load forecasting for diverse users in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(13): 2-17.

[45] WANG Y, CHEN Q X, GAN D H, et al. Deep learning-based socio-demographic information identification from smart meter data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2593-2602.

[46] 张春雁,窦真兰,白冰青,等.基于用户分类的综合能源系统低碳运行策略[J].上海交通大学学报,2024,58(1):1-10.
ZHANG Chunyan, DOU Zhenlan, BAI Bingqing, et al. Low-carbon operation strategy of integrated energy system based on user classification [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(1): 1-10.

[47] XUE Y S, WU J A, XIE D L, et al. Multi-agents modelling of EV purchase willingness based on questionnaires[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(2): 149-159.

[48] 马文帅,胡俊杰,房宇轩,等.电动汽车用户参与调控意愿的多代理表征与可信容量量化[J].电力系统自动化,2023,47(18):122-131.
MA Wenshuai, HU Junjie, FANG Yuxuan, et al. Multi-agent representation for willingness of electric vehicle users to participate in regulation and quantification of reliable reserve capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 122-131.

[49] YANG Q, WANG H, WANG T T, et al. Blockchain-based decentralized energy management platform for residential distributed energy resources in a virtual power plant[J]. Applied Energy, 2021, 294: 117026.

[50] 湛归,殷爽睿,艾芊,等.智能楼宇型虚拟电厂参与电力系统调频辅助服务策略[J].电力工程技术,2022,41(6):13-20.
ZHAN Gui, YIN Shuangrui, AI Qian, et al. A strategy for smart building-based virtual power plants participating in frequency regulation auxiliary service [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 13-20.

[51] OSKOUEI M Z, MOHAMMADI-IVATLOO B, ABAPOUR M, et al. Strategic operation of a virtual energy hub with the provision of advanced ancillary services in industrial parks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2062-2073.

[52] 关舒丰,王旭,蒋传文,等.基于可控负荷响应性能差异的虚拟电厂分类聚合方法及辅助服务市场投标策略研究[J].电网技术,2022,46(3):933-944.
GUAN Shufeng, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Classification and aggregation of controllable loads based on different responses and optimal bidding strategy of VPP in ancillary market[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 933-944.

[53] 孔祥玉,刘超,陈宋宋,等.考虑动态过程的可调资源集群多时间节点响应潜力评估方法[J].电力系统自动化,2022,46(18):55-64.
KONG Xiangyu, LIU Chao, CHEN Songsong, et al. Assessment method for multi-time-node response potential of adjustable resource cluster considering dynamic process [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 55-64.

[54] 刘江,郭云鹏,张波,等.基于云模型和改进证据理论的调峰型虚拟电厂聚合用户优选[J].电力系统自动化,2022,46(18):37-45.
LIU Jiang, GUO Yunpeng, ZHANG Bo, et al. Aggregated user selection of peak-regulation virtual power plant based on cloud model and improved evidence theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 37-45.

[55] BARBERO M, CORCHERO C, CANALS CASALS L, et al. Critical evaluation of European balancing markets to enable the participation of demand aggregators[J]. Applied Energy, 2020, 264: 114707.

[56] 李奇,苗瑞,张洁,等.面向电动汽车租赁的多目标服务组合优化设计[J].工业工程,2019,22(4):101-108.
LI Qi, MIAO Rui, ZHANG Jie, et al. A multi-objective optimization design of service portfolio for electric vehicle lease [J]. Industrial Engineering Journal, 2019, 22(4): 101-108.

[57] ZHOU H F, ZHANG S Y, QIU L M, et al. A factorisation-based recommendation model for customised products configuration design [J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(19): 6381-6402.
[58] CAMPOS SABIONI R, DAABOUL J, LE DUIGOU J. Concurrent optimisation of modular product and reconfigurable manufacturing system configuration: a customer-oriented offer for mass customisation [J]. International Journal of Production Research, 2022, 60(7): 2275-2291.
[59] WANG Y, WU J C, LIN L, et al. An online community-based dynamic customisation model: the trade-off between customer satisfaction and enterprise profit [J]. International Journal of Production Research, 2021, 59(1): 1-29.
[60] 丑文亚.基于模块化产品族的定制电信产品结构建模及配置研究[J].电信科学,2013,29(1):149-155.
CHOU Wenya. Research on customized telecommunication product structural modeling and configuration based on modular product family[J]. Telecommunications Science, 2013, 29(1): 149-155.
[61] 肖白,刘佳涛,杨士伟,等.面向电动汽车用户的电价套餐模块化设计[J].电网技术,2024,48(11):4544-4552.
XIAO Bai, LIU Jiatao, YANG Shiwei, et al. Modular design of electricity price package for electric vehicle users[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4544-4552.
[62] YANG J J, ZHAO J H, WEN F S, et al. A model of customizing electricity retail prices based on load profile clustering analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3374-3386.
[63] TUSHAR W, CHAI B, YUEN C, et al. Three-party energy management with distributed energy resources in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2487-2498.
[64] OPREA S V, BÂRA A, IFRIM G A. Optimizing the electricity consumption with a high degree of flexibility using a dynamic tariff and Stackelberg game [J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2021, 190(1): 151-182.
[65] LI Y, WANG B, YANG Z, et al. Hierarchical stochastic scheduling of multi-community integrated energy systems in uncertain environments via Stackelberg game [J]. Applied Energy, 2022, 308: 118392.
[66] CHEN W, QIU J, ZHAO J H, et al. Customized rebate pricing mechanism for virtual power plants using a hierarchical game and reinforcement learning approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 424-439.
[67] XU H C, ZHANG K Q, ZHANG J B. Optimal joint bidding and pricing of profit-seeking load serving entity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5427-5436.
[68] XU H C, SUN H B, NIKOVSKI D, et al. Deep reinforcement learning for joint bidding and pricing of load serving entity[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6366-6375.
[69] 刘秋华,胡苏晨,周维初.售电商参与现货市场下的售电套餐优化设计[J].电力工程技术,2022,41(1):19-25.
LIU Qiuhua, HU Suchen, ZHOU Weichu. Optimal design of electricity plans based on electricity retailers' participation in spot market [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 19-25.
[70] 王静雯,李华强,李旭翔,等.综合能源服务效用模型及用户需求评估[J].中国电机工程学报,2020,40(2):411-425.
WANG Jingwen, LI Huaqiang, LI Xuxiang, et al. Utility model and demand assessment method of integrated energy service[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 411-425.
[71] MANKIW N G. Principles of economics [M]. Boston, USA: Cengage Learning, 2020.
[72] GAO H J, ZHAO Y B, HE S J, et al. Demand response management of community integrated energy system: a multi-energy retail package perspective [J]. Applied Energy, 2023, 330: 120278.
[73] 孙云涛,宋依群,姚良忠,等.售电市场环境下电力用户选择售电公司行为研究[J].电网技术,2018,42(4):1124-1131.
SUN Yuntao, SONG Yiqun, YAO Liangzhong, et al. Study on power consumers' choices of electricity retailers in electricity selling market[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1124-1131.
[74] 黄悦华,王艺洁,杨楠,等.基于演化博弈的用户综合用能行为决策方法研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(23):21-29.
HUANG Yuehua, WANG Yijie, YANG Nan, et al. Research on a decision method of a user comprehensive energy use behavior based on an evolutionary game [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 21-29.
[75] 陆欢,干宏程,王馨玉,等.考虑心理因素及社会网络影响的电动汽车购买意愿研究[J].交通运输研究,2022,8(2):49-56.
LU Huan, GAN Hongcheng, WANG Xinyu, et al. Purchase intention of electric vehicles considering influence of psychological factors and social network [J]. Transport Research, 2022, 8(2): 49-56.
[76] LAI S Y, QIU J, TAO Y C, et al. Pricing strategy for energy supplement services of hybrid electric vehicles considering bounded-rationality and energy substitution effect [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 2973-2985.
[77] 蔡国伟,姜雨晴,黄南天,等.电力需求响应机制下基于多主体双层博弈的规模化电动汽车充放电优化调度[J].中国电机工程学报,2023,43(1):85-99.
CAI Guowei, JIANG Yuqing, HUANG Nantian, et al. Large-scale electric vehicles charging and discharging optimization scheduling based on multi-agent two-level game under electricity demand response mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 85-99.
[78] WU F Z, YANG J, ZHAN X P, et al. The online charging and discharging scheduling potential of electric vehicles considering the uncertain responses of users [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 1794-1806.
[79] 于丹文,杨明,翟鹤峰,等.鲁棒优化在电力系统调度决策中的应用研究综述[J].电力系统自动化,2016,40(7):134-143.
YU Danwen, YANG Ming, ZHAI Hefeng, et al. An overview of robust optimization used for power system dispatch and decision-making [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 134-143.
[80] CHEN L, ZHAO X H, LI D C, et al. Optimal bidding

strategy for virtual power plant using information gap decision theory [C]// 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), June 4-7, 2020, Chengdu, China.

[81] ARTEAGA J, ZAREIPOUR H. A price-maker/price-taker model for the operation of battery storage systems in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6912-6920.

[82] LI J M, AI Q, CHEN M Y. Strategic behavior modeling and energy management for electric-thermal-carbon-natural gas integrated energy system considering ancillary service [J]. Energy, 2023, 278: 127745.

[83] PJM. Regulation market pricing problem statement [R/OL]. [2024-02-18]. https://www.pjm.com/-/media/committees-groups/committees/mrc/20181025/20181025-item-06-regulation-market-pricing-problem-statement.ashx.

[84] PHAN H T, NGUYEN N T, TRAN V C, et al. An approach for a decision-making support system based on measuring the user satisfaction level on Twitter[J]. Information Sciences, 2021, 561: 243-273.

[85] KUMAR A, BALA P K, CHAKRABORTY S, et al. Exploring antecedents impacting user satisfaction with voice assistant app: a text mining-based analysis on Alexa services [J]. Journal of Retailing and Consumer Services, 2024, 76: 103586.

[86] WANG T H, HUA H C, SHI T Y, et al. A bi-level dispatch optimization of multi-microgrid considering green electricity consumption willingness under renewable portfolio standard policy[J]. Applied Energy, 2024, 356: 122428.

[87] 陈钱蓁，高红均，王晓辉，等.面向产消用户的售电公司发-用电多元电力套餐优化[J].电力自动化设备，2023，43(5)：154-162.
CHEN Qianzhen, GAO Hongjun, WANG Xiaohui, et al. Prosumer oriented multiple generation-consumption electricity package optimization for electricity retailers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 154-162.

[88] 崔竞烽，郑德俊，孙钰越，等.用户体验视角下的图书馆微信公众平台满意度研究[J].图书馆论坛，2018，38(3)：133-140.
CUI Jingfeng, ZHENG Dejun, SUN Yuyue, et al. Research on user satisfaction of library we chat public platforms[J]. Library Tribune, 2018, 38(3): 133-140.

[89] 董焕晴，王娜.知识类短视频用户满意度关键影响因素研究[J].情报探索，2023(12)：34-43.
DONG Huanqing, WANG Na. Study on the key influencing factors of user satisfaction of knowledge-based short video[J]. Information Research, 2023(12): 34-43.

[90] 张一帆，潘大志，杨洋，等.工业用户电能质量需求识别与服务策略研究[J].电力需求侧管理，2023，25(5)：110-116.
ZHANG Yifan, PAN Dazhi, YANG Yang, et al. Research on demand identification and service strategy of power quality of industrial users[J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(5): 110-116.

[91] JIANG W, ZHANG S, WANG T, et al. Evaluation method for the availability of solar energy resources in road areas before route corridor planning [J]. Applied Energy, 2024, 356: 122260.

[92] JI Z S, LI W Y, NIU D X. Optimal investment decision of agrivoltaic coupling energy storage project based on distributed linguistic trust and hybrid evaluation method [J]. Applied Energy, 2024, 353: 122139.

[93] KANG D. The establishment of evaluation systems and an index for energy superpower[J]. Applied Energy, 2024, 356: 122344.

[94] WU D L, ZHOU P, ZHOU C Q. Evaluation of pulverized coal utilization in a blast furnace by numerical simulation and grey relational analysis[J]. Applied Energy, 2019, 250: 1686-1695.

[95] 沈思辰，韩海腾，周亦洲，等.基于条件风险价值的多虚拟电厂电-碳-备用P2P交易模型[J].电力系统自动化，2022，46(18)：147-157.
SHEN Sichen, HAN Haiteng, ZHOU Yizhou, et al. Electricity-carbon-reserve peer-to-peer trading model for multiple virtual power plants based on conditional value-at-risk [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 147-157.

[96] ZHANG Y F, LIU F, WANG Z J, et al. Robust scheduling of virtual power plant under exogenous and endogenous uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1311-1325.

[97] 李君卫，余洋，蒋衍君，等.面向电网调峰的负荷友好性评价[J].电力系统自动化，2023，47(20)：115-124.
LI Junwei, YU Yang, JIANG Yanjun, et al. Load friendliness evaluation for peak regulation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(20): 115-124.

[98] 谢畅，王蓓蓓，李然，等.基于信用等级的虚拟电厂需求响应效果后评估[J].电力建设，2017，38(9)：67-72.
XIE Chang, WANG Beibei, LI Ran, et al. Post-evaluation of demand response effects in virtual power plant based on credit rating[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 67-72.

[99] XU Z, GUO Y, SUN H B. Competitive pricing game of virtual power plants: models, strategies, and equilibria [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4583-4595.

[100] 王皓，艾芊，甘霖，等.基于多场景随机规划和MPC的冷热电联合系统协同优化[J].电力系统自动化，2018，42(13)：51-58.
WANG Hao, AI Qian, GAN Lin, et al. Collaborative optimization of combined cooling heating and power system based on multi-scenario stochastic programming and model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 51-58.

[101] 杨洪明，吴静斌.基于可动态调整风险偏好因子的发/售电一体型集团公司中长期交易合作博弈决策[J].电力建设，2023，44(5)：149-160.
YANG Hongming, WU Jingbin. Medium- and long-term trading cooperation game decision of power generating & trading integrated company based on dynamically adjusted risk aversion factor [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 149-160.

[102] 李俊良，焦润海，王双坤，等.一种基于误差在线更新的集成负荷预测模型[J].中国电机工程学报，2023，43(4)：1402-1413.
LI Junliang, JIAO Runhai, WANG Shuangkun, et al. An ensemble load forecasting model based on online error updating

[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1402-1413.
[103] 周家哲,窦迅,李佳承,等.基于新能源投资租赁模式的售电公司零售行为推演[J].电网技术,2022,46(11):4186-4200.
ZHOU Jiazhe, DOU Xun, LI Jiacheng, et al. Retail behavior of power sales companies based on new energy investment leasing model[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4186-4200.
[104] 王蓓蓓,刘飞宇,杨朋朋,等.考虑轻微利他效用的发售电一体化集团成员合谋行为的多智能体深度双Q网络推演研究[J].中国电机工程学报,2023,43(7):2640-2652.
WANG Beibei, LIU Feiyu, YANG Pengpeng, et al. Study on collusion behavior between the members in electricity producers-retailers integration group considering slightly altruistic utility based on multi-agent deep double Q network [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2640-2652.
[105] 薛禹胜,吴巨爱,谢东亮,等.关于在决策推演中计入博弈行为的评述[J].电力系统自动化,2023,47(16):1-9.
XUE Yusheng, WU Juai, XIE Dongliang, et al. Review on considering gaming behaviors in decision-making simulation deduction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 1-9.
[106] 牛泽原,李嘉媚,艾芊.大语言模型在电力系统中的应用初探[J].电网技术,2025,49(4):1327-1336.
NIU Zeyuan, LI Jiamei, AI Qian. Preliminary exploration of the application of large language models in power systems[J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1327-1336.

李嘉媚(1996—),女,博士,助理研究员,主要研究方向:人工智能与电力系统、虚拟电厂。E-mail:lijiamei@sjtu.edu.cn

江佳美(2001—),女,硕士研究生,主要研究方向:人工智能与电力系统、虚拟电厂。E-mail:jiamei123@sjtu.edu.cn

杨秋楠(2002—),女,硕士研究生,主要研究方向:虚拟电厂、套餐设计。E-mail:myjsybjwqt@sjtu.edu.cn

艾　芊(1969—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:虚拟电厂规划与运行、大数据与数字孪生。E-mail:aiqian@sjtu.edu.cn

(编辑　王梦岩)

Incentive Mechanism and Key Technologies of Ancillary Service for Virtual Power Plant Based on Customized Packages

LI Jiamei[1], *JIANG Jiamei*[1], *YANG Qiunan*[1], *AI Qian*[1], *WANG Di*[1], *CAI Na*[2]

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China; 2. Kunming Power Exchange Center Company Limited, Kunming 650100, China)

Abstract: Virtual power plants (VPPs) provide power ancillary services by aggregating distributed user resources, delivering significant safety and economic benefits. Since VPP operators do not directly own these resources, incentive mechanisms become crucial for achieving friendly interactions with users. This paper constructs a VPP incentive mechanism in the form of power ancillary service packages. Compared with other methods, the form of packages can better balance the demands of multiple parties and attract massive user to participate. First, the market rules and operation schemes related to VPPs in China are reviewed, clarifying the policy direction and analyzing the profitability conditions of VPPs based on this foundation. Secondly, the connotations of VPP incentive mechanisms, along with their engineering practices, classifications, and specific manifestations, are summarized, and the rationality and effectiveness of establishing power ancillary service incentive mechanisms through packages are analyzed. On this basis, the overall implementation framework for customizing power ancillary service packages in VPPs is proposed, focusing on three key aspects: customized design, parameter decision-making, and dynamic adjustment. Key issues and challenges within this framework are examined. Finally, relevant research progress regarding these three aspects is reviewed, and specific solutions are proposed, offering a feasible path for innovation in VPP business models.

This work is supported by Major Special Science and Technology Project of Yunnan Province (No. 202302AF080006).

Key words: virtual power plant; incentive mechanism; customized package; ancillary service; user resource; new power system