

[虚拟电厂]

分区虚拟电厂可调负荷参与辅助服务市场的交易机制

文/兴胜利 李荷婷 何平 顾杨青 白锐
国网苏州供电公司

基于面向电网网架的分层分区原理，在聚合模型的基础上，以市场出清的经济最优为目标、中标功率等为约束，设计出分区虚拟电厂可调负荷参与日前辅助服务竞价市场的交易机制，提供了关于虚拟电厂分区建设与辅助服务市场机制设计的政策建议，并通过案例进一步验证了模型可行性。

近年来，人们对环境问题的关注不断增加，环境意识的普及引导了更多绿色和分布式能源的应用。随着电动汽车的大规模发展，其也可作为分布式能源，与储能电池、可中断负荷等统一并入电网。但能源资源的多元化使得电力市场调度更加复杂，虚拟电厂技术的提出与发展，为这一难题提供了良好的解决方案，它将多元电力资源统一调度，并作为特殊的发电单元参与电力市场。

所谓“虚拟”，是指它并不存在传统意义上的实体电厂，但它的意义和作用却远超实体电厂。对大电网来说，虚拟电厂是一个可视化的智能互动型组织，可作为区域性源网荷的智能管理体系，既可根据负荷数据，优化多种分布式能源计划发电模式，促进新能源消纳；也可调度多种电力资源，包括需求侧资源、储能单元和分布式能源等，并对不同区域间各个种类的电力资源进行数据管理和指令控制，采用与传统发电单元相互配合或以负荷聚合形式参与电力市场辅助服务应用，对维护电力系统的安全稳定运行具有重要作用。

当前，我国辅助服务市场尚处于发展初期，相应的辅助服务交易品种、市场机制仍在探索阶段。随着大规模新能源发电并入电网，电力市场改革不断推进，市场资源也更加丰富。为维护电力可靠供应，

电能质量有效保障，辅助服务市场的新一轮变革也显得愈发重要。相比于我国，国外包括美国、英格兰、澳大利亚、北欧等地的电力辅助服务市场发展较早，辅助服务产品以及交易模式等都较为成熟。

我国的辅助服务品种体系与发展历程具有明显的中国特色，与国外具有显著差异。在现行电力辅助服务市场探索初期，我国主要以调峰服务、调频服务开展。且不同地区的辅助服务市场机制存在差异，例如不同地区的补偿机制设置差别较大，广东地区补偿费用包括调频容量补偿和调频里程补偿，山西、山东地区仅考虑调频容量补偿。再如不同地区调频参与主体以及参与方式也有所差异，广东地区纳入了储能系统参与调频辅助服务，储能单元可作为独立主体或与传统发电单元联合的形式参与电力市场辅助服务；而山西地区则进一步补充扩大了参与主体，包括电力用户、售电主体、储能系统和新能源机组等均允许参与调频市场。

然而，之前的研究都是基于某种可调资源的调节特性，对其参与辅助服务市场的相关交易行为或调度模型进行研究，但在实际操作中，若对全域所有的可调资源进行优化调用，将大幅提升电力调度及数控操作的实现难度。本文基于虚拟电厂可调资源的分区原理，研究其参与辅助服务市场的交易机

制，更具可行性与合理性。

数学模型

1. 面向网架分区的虚拟电厂聚合机制设计

针对全域分散的可调节负荷资源特性，对虚拟电厂建设提出了分层分区的管理模式，对设备重过载等局部问题，基于电网网架拓扑，进行灵活资源

的分层分区聚合调用，并以能源、工业、建筑、交通、农业和居民生活等行业分类为框架，以源性与荷性特征实现分布式点滴资源的有效聚合。

图1所示为电网分层分区简单示意图。当某个变电站出现过载等问题时，可通过聚合其所辖区域内的用户侧可调负荷进行虚拟电厂的构建，基于运行需求优化配置虚拟电厂的容量。

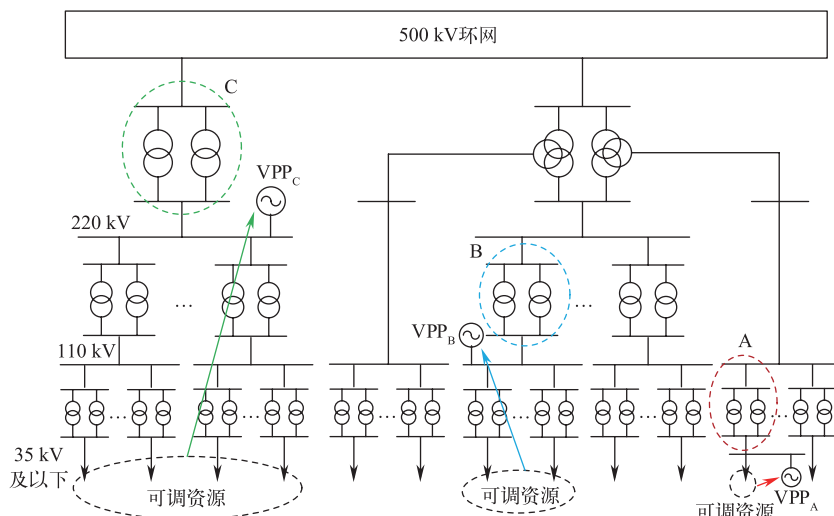


图1 虚拟电厂分层分区构建示意图

当110 kV变电站A可能面临负载率过大等问题时，将变电站A所辖供电区域内的可调资源进行聚合构建，和变电站A同时向下级进行供电，缓解变电站A的过载问题，220 kV变电站B与500 kV变电站C同理。当500 kV网架节点（如图1中的500 kV变电站C）机组负载率过高时，其下属虚拟电厂分区的用电负荷将向临近分区进行负荷转移，此时，转移负荷应满足联络线的输电线路功率约束为

$$P_l(t) \leq P_l^{\max} \quad (1)$$

式中， $P_l(t)$ 为时段 t 线路 l 的转移负荷功率； $P_l^{\max}$ 为线路 l 的传输功率。

若负荷转移后尚不能缓解上级500 kV网架节点机组的负荷过载问题，则其下属的虚拟电厂分区发起区内调节。

2. 面向网架分区的可调负荷参与辅助服务市场交易机制设计

(1) 辅助服务市场准入机制

可调负荷辅助服务市场成员包括市场主体、电网企业和市场运营机构。市场主体为具有独立法人资格、独立财务核算、信用良好和能够独立承担民

事责任的经济实体，包括负荷聚合商和电力用户。负荷聚合商是指某一区域内各类响应资源进行统一管控和运营的主体。负荷聚合商或大用户按照响应资源所属地区、是否具备直控能力等条件分别聚合形成虚拟电厂，参与市场交易。参与市场交易的电力用户应该符合国家相关产业、环保政策等方面的要求，具备分量分时计量与数据传送条件，数据准确性与可靠性应能满足交易要求。市场运营机构包括电力调度机构和电力交易机构。

(2) 辅助服务市场交易流程

本文主要就日前辅助服务市场进行研究，市场主体参与交易的整体流程如图2所示。调度机构根据市场主体上报的预测用电数据和实际用电数据，评估实际调节情况和有效调节电量，按日前市场出清价和有效调节电量对市场主体予以补偿。调度机构、电网企业为售电公司代理的用户提供补偿参考数据。

(3) 辅助服务市场交易机制

调度机构根据电网需要发布次日基线，并组织负荷聚合商进行市场申报，申报信息包括：

1) 可调节容量。虚拟电厂可响应容量为组合的

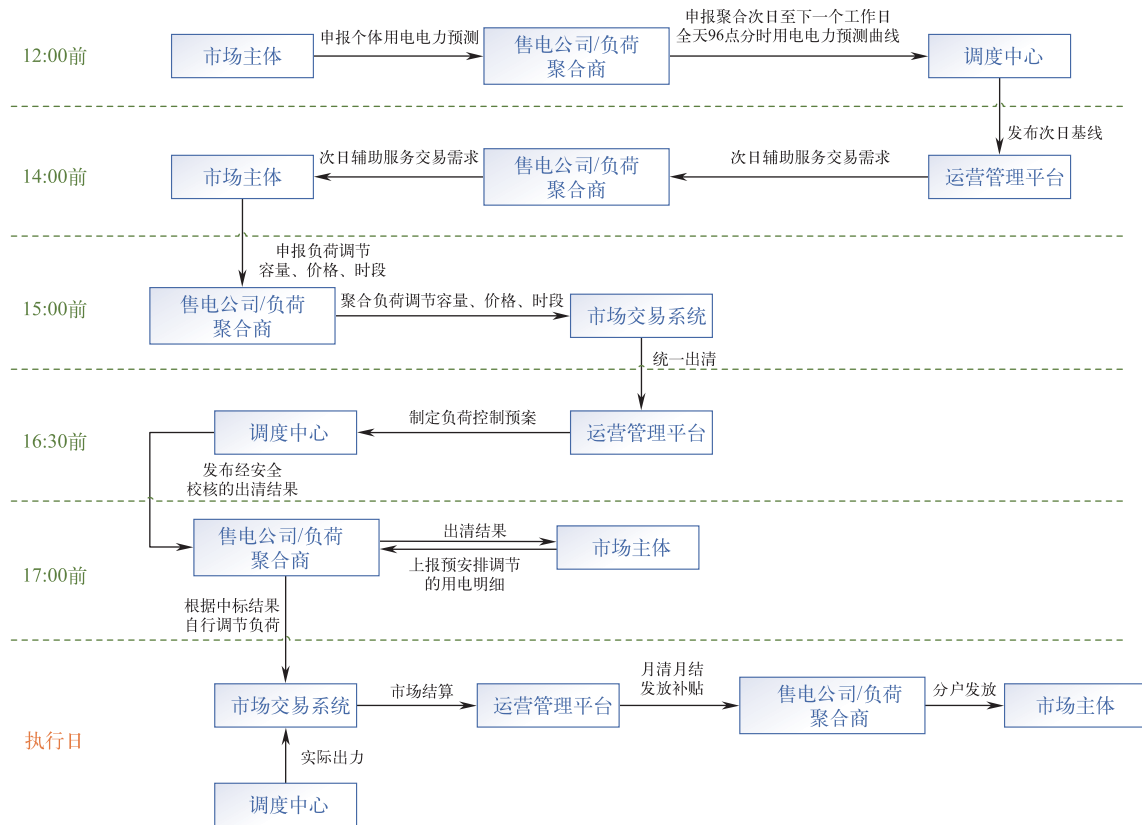


图2 可调负荷参与辅助服务市场的整体流程图

各响应资源可响应容量之和，单位为MW。

2) 可调节时段。现阶段可响应时段默认为所发布的需求响应时段。

3) 申报价格。市场建设初期，设置申报价格上限，即当调度发布的需求时段大于或等于4 h，申报价格上限为1 000元/MW·h；当调度发布的需求时段小于4 h，申报价格上限为2 000元/MW·h。

在日前的辅助服务市场出清层面，结合各分区负荷聚合商的虚拟电厂申报价格，以市场调用成本最低为优化目标进行出清，目标函数表示为

$$\min C = \sum_t c_{\text{bid}}(t) P_{\text{bid}}(t) \Delta t \quad (2)$$

式中， C 为调用虚拟电厂资源的成本； $c_{\text{bid}}(t)$ 为时段 t 市场出清价格； $P_{\text{bid}}(t)$ 为时段 t 虚拟电厂的中标响应功率； Δt 为时间间隔； T 为虚拟电厂参与电网调度的时段数。

约束条件如下。

中标功率约束

$$P(t) = \sum_i u_i(t) P_{\text{bid}}(t) \quad (3)$$

式中， $u_i(t)$ 为0-1状态变量，表示时段 t 分区 i 虚拟机组是否中标； $P(t)$ 为时段 t 该分区的调节负荷总需求。

出清价格约束

$$C_{\text{bid}}(t) = \max \{u_1(t)c_1(t), u_2(t)c_2(t), \dots, u_i(t)c_i(t)\} \quad (4)$$

式中， $c_i(t)$ 为时段 t 各负荷聚合商的报价。

各节点虚拟机组中标容量约束

$$0 \leq P^{\text{bid}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{bid}}(t) \quad (5)$$

式中， $P^{\text{bid}}(t)$ 为时段 t 负荷聚合商的申报容量； $P_{\text{max}}^{\text{bid}}(t)$ 为时段 t 负荷聚合商可申报的最大容量。

市场主体的调节负荷评价考核按交易单位开展。虚拟电厂执行后的第3个工作日，调度中心根据电力公司推送的运行日结算基线负荷和实际测量负荷，评价虚拟电厂执行效果。实际调节容量等于结算基线负荷与实际测量负荷之差，按小时计算。

若该小时实际调节容量大于等于中标调节容量的70%且小于120%，该小时实际调节容量全部计入有效调节容量；若该小时实际调节容量大于中标调节容量的120%，该小时有效调节容量计为中标调节容量的120%。对于实际调节容量未达到中标调节容

量的70%，视为无效调节。相关参数设置可视辅助服务市场运行情况调整。

每个连续调节时段内的虚拟电厂中标并提供有效调节容量的交易单元按小时计算响应费用，并采用月清月结方式，市场主体用电数据以电网企业提供的计量数据为准，市场运营机构负责记录市场主体辅助服务交易、调用和计算等情况。电力市场用户可调负荷参与辅助服务市场补偿费用由所有市场化用户按照当月实际用电量占比分摊，具体计算公式为

R_{i调节费用}=k_i \times \sum P_{i有效调节容量} \times C_{bid}(t) \tag{6}

式中，P_{i有效调节容量}为交易单位的有效调节容量；k_i表示用户i补偿费用分成比例，一类用户的k_i为1，二类用户的k_i为办理市场准入时提交并与售电公司确认的辅助服务市场补偿费用的分成比例。

3. 虚拟电厂参与辅助服务市场评价指标

(1) 市场竞争评价

1) 市场力。市场供需情况直接影响了市场价格，市场供给越紧张，市场参与者的市场力越大。市场供需比DSR为

DSR=\frac{Q_D}{Q_S} \tag{7}

式中，Q_D和Q_S分别表示预测的市场总需求和总供给。

2) 响应评价

R_{VPP}=\frac{L_{VPP}}{B_{VPP}} \tag{8}

式中，L_{VPP}和B_{VPP}分别表示实际调节容量与中标调节容量。

(2) 综合效益评价

1) 经济效益

R_{ec}=C_P+C_E+\Delta R_C \tag{9}

式中，C_P和C_E分别表示可避免容量成本和可避免电量成本；\Delta R_C表示降低备用容量效益。

2) 环境效益。环境效益主要指CO_2、SO_2等污染气体的减排量与减排价值的乘积，为

R_{en}=N_{CO_2} \cdot V_{CO_2}+N_{SO_2} \cdot V_{SO_2}+N_{NO_x} \cdot V_{NO_x} \tag{10}

式中，R_{en}表示每年总减排效益；N_{CO_2}、N_{SO_2}、N_{NO_x}表示CO_2、SO_2、NO_x的减排量；V_{CO_2}、V_{SO_2}、V_{NO_x}表示CO_2、SO_2、NO_x的单位减排价值。

算例分析

假设某分区内的电网负荷削峰和填谷调节需求

分别为50 000 kW、30 000 kW，区内共有3家负荷聚合商，负荷聚合商可调节的区内可调负荷可看作一台虚拟电厂机组，故调度中心发布区内电网负荷调节需求后，3家负荷聚合商可进入辅助服务日前市场进行报价，申报情况汇总见表1、表2。假设调度发布的需求时段为5 h，按照辅助服务市场规则，市场的申报价格上限为1 000元/MW·h。

表1 分区内辅助服务市场可调节削峰负荷申报信息

企业名称	申报时间	日前削峰	
		申报价格/([元/kW·h])	申报容量/kW
负荷聚合商1#	14:02:38	0.96	20 000
负荷聚合商2#	14:04:20	0.98	40 000
负荷聚合商3#	14:12:31	0.95	15 000

表2 分区内辅助服务市场可调节填谷负荷申报信息

企业名称	申报时间	日前削峰	
		申报价格/([元/kW·h])	申报容量/kW
负荷聚合商1#	14:05:23	0.98	20 000
负荷聚合商2#	14:04:40	0.99	17 000
负荷聚合商3#	14:04:31	0.98	12 000

结合辅助服务市场出清模型，按照申报价格由低到高、申报时间由先到后、申报容量由大到小，对市场分别进行出清，中标情况见表3。管理平台根据市场出清结果制订负荷控制预案并通知调度平台及相应市场主体，调度机构发布经安全校核的市场出清结果。

表3 辅助服务市场可调节负荷出清结果

企业名称	日前削峰		日前填谷	
	出清价格/([元/kW·h])	中标容量/kW	出清价格/([元/kW·h])	中标容量/kW
负荷聚合商1#	0.98	20 000	0.98	18 000
负荷聚合商2#	0.98	15 000	-	-
负荷聚合商3#	0.98	15 000	0.98	12 000

在以经济成本最小化作为市场出清目标的前提下，当市场主体的报价过高想作为边际出清机组，抬高市场出清结算价格，是需要承担较大风险的，这将在一定程度上影响其中标结果与预期收益。比如在表1、表2的报价信息中，负荷聚合商2#报价均为市场最高，在辅助服务市场削峰负荷竞价时，由于分区内的削峰需求较大，负荷聚合商2#以末尾中标成为边际出清的虚拟机组，市场以其报价进行出

清，一定程度上抬高了市场的出清结算价格；但是在辅助服务市场填谷负荷竞价时，由于分区内的填谷需求较小，负荷聚合商2#未能成功中标，故损失了较大的市场收益。分区内3家负荷供应商实际削峰、填谷的调节负荷情况见表4。

表4 可调负荷实际调节情况

企业名称		实际调节容量/kW	实际调节容量比例(%)	有效调节容量/kW
负荷聚合商1#	削峰	18 500	92.50	18 500
	填谷	18 500	102.78	18 500
负荷聚合商2#	削峰	19 500	130	$1.2 \times 19\,500$
	填谷	-	-	-
负荷聚合商3#	削峰	14 500	96.67	14 500
	填谷	8 300	69.17	0

负荷聚合商1#的综合调节收益= $(18\,500\text{ kW}+18\,500\text{ kW}) \times 0.98\text{ 元/kW}\cdot\text{h} \times 5\text{ h}=18.13\text{ 万元}$

负荷聚合商2#的综合调节收益= $1.2 \times 19\,500\text{ kW} \times 0.98\text{ 元/kW}\cdot\text{h} \times 5\text{ h}=11.466\text{ 万元}$

负荷聚合商3#的综合调节收益= $(14\,500\text{ kW}+0\text{ kW}) \times 0.98\text{ 元/kW}\cdot\text{h} \times 5\text{ h}=7.105\text{ 万元}$

交易平台据此进行市场结算并提供给运营管理平台，运营管理平台完成交易（含补贴）的市场主体分户计算、审核及发放。

虚拟电厂建设政策建议

1. 关于虚拟电厂分区建设的建议

配电网分区结果主要与网络拓扑结构和网络潮流状态相关。城市配电网采用辐射状供电，为了适应负荷功率的波动，配电网的运行状态常常在较短的时间尺度发生改变。负荷波动有明显的季节特性，负荷曲线随着季节的波动，会产生比较大的改变。此外，随着分布式光伏渗透率不断提高，光伏发电功率对电网潮流的影响也不容忽视。显然，单一时间断面的静态潮流无法满足长时间尺度的电网运行要求，因此需对虚拟电厂的可调负荷资源进行动态分区调整。

2. 关于辅助服务市场建设的建议

(1) 分区竞争的政策建议

本文不同于常规虚拟电厂参与市场竞争的模式，而是按照网架结构对虚拟电厂进行分区划分，并在可调负荷参与辅助服务市场竞争时，以分区的削峰填谷容量为市场需求，分别组织负荷聚合商参

与竞争，有利于市场有序开展，资源最优调度，电网需求有效满足。以上相关工作，需要政策辅以支撑，在满足电网运行安全与技术要求的前提下，不断完善虚拟电厂运营机制。在市场发展前期，可出台相关虚拟电厂补贴政策，例如一次性建设补贴、系统响应参与补贴等。并且，虚拟电厂的分区结构是动态聚合的结果，当发电情况或用电分布发生较大变化时，需根据实际情况及时调整，否则一定程度上会增加可调资源调用成本。

(2) 严防市场串谋的政策建议

电力市场中，市场主体滥用市场力是市场违规的主要情形，串谋是滥用市场力违规的主要表现形式之一。通常，集中竞价中串谋的企业通过平行报价和反向报价来获取更多的利润。传统的欧美电力市场往往以评估市场主体的市场力来抑制串谋，主要有场前指标分析法和事后检查法，加强电力市场信用监管的顶层设计，实时监测发电企业的串谋行为，对信用风险提前做出预警。

针对不同参与主体类别，对发电企业、供电企业、售电企业、负荷聚合商和电力用户等建立各自的信用评价指标体系，保证各类企业信用状况等透明性，市场主体随时接受相关部门的监督。对市场内套利竞价、滥用市场力等不良行为，要及时警告惩罚，严重者应进行市场内部曝光，列入诚信黑名单，并向全社会公示，严防过度竞争、排他垄断、资本投机和无序竞争等风险，保证电力市场的公平公正和自由有序的竞争环境。

结束语

本文基于面向电网网架的分层分区原理，在聚合模型的基础上，以市场出清的经济最优为目标、中标功率等为约束，设计出分区虚拟电厂可调负荷参与日前辅助服务竞价市场的交易机制，提供了关于虚拟电厂分区建设与辅助服务市场机制设计的政策建议。通过案例设计，进一步验证了模型可行性，并得出结论：虚拟电厂的分区结构需要进行动态聚合，根据实际情况及时调整，否则一定程度上会增加调用成本；且在设计辅助服务市场的交易机制时，需充分考虑市场主体串谋的可能性，防止滥用市场力的违规情况导致电价飞涨的情况发生。EA

(收稿日期：2024-1-31)