



**A Dissertation Submitted to**

**Shanghai Jiao Tong University for Bachelor Degree**

**RESEARCH ON GRID SCHEDULING  
MECHANISM DESIGN FOR VIRTUAL POWER  
PLANT CLUSTER**

**Author: Zeng Deyang**

**Supervisor: Li Jiamei**

**School of Electronic Information and Electrical Engineering**

**Shanghai Jiao Tong University**

**Shanghai, P.R.China**

**May, 2024**

## 摘 要

随着新能源占比逐渐升高，新型主体的规模逐渐扩大，作为电力系统安全运行核心的电网调度决策将向精细化发展，对于调度主体差异化特征的辨识要求也将更高。本文基于主体差异化的思想，从虚拟电厂与传统电厂的调节质量差异出发，建立了调节质量综合评价体系，将调节质量引入调峰出清，并最终构建了面向虚拟电厂集群的电网调度框架。

本文主要工作如下：

（1）建立了虚拟电厂与传统电厂的调节质量评价体系。首先，解构调节质量，提出了调节特性的概念；然后，对调节特性进行可量化指标描述与指标赋权，建立了调节质量多维度多指标综合评价体系；最后，以最大化调节质量为目标，进一步提出了虚拟电厂聚合优化模型。

（2）提出了考虑市场主体调节质量的调峰出清机制。首先，在虚拟电厂参与调峰市场背景下，将市场主体的调节质量作为参数引入出清数学模型；然后，提出了出清结果的经济性、质量性评价指标，以及折衷经济性与质量性的决策依据；最后，由VCG拍卖机制，设计了鼓励各主体积极参与质量申报的补偿机制。

（3）构建了面向虚拟电厂集群的电网调度框架。首先，在虚拟电厂聚合优化模型的基础上，提出了综合型虚拟电厂与特征型虚拟电厂的概念；然后，在多虚拟电厂参与电网调度的背景下，明确了虚拟电厂集群的含义，并提出了虚拟电厂集群的组织架构；最后，基于集群资源管理理论，建立云端集群管理平台，并搭建了面向虚拟电厂集群的电网调度框架。

**关键词：**主体差异化，调节质量，调节特性，聚合优化，调度框架

## ABSTRACT

With the increasing proportion of renewable energy and the gradual expansion of new market players, grid scheduling decisions, as the core of safe operation of the power system, will develop towards refinement. There will be higher requirements for identifying the differentiated characteristics of scheduling entities. Based on the idea of subject differentiation, starting from the difference in adjustment quality between virtual power plants and traditional ones, this paper constructs a regulating quality evaluation system, introduces regulating quality into peak shaving clearing, and finally constructs a grid scheduling framework for virtual power plant cluster.

The main works of this paper are summarized as follows:

(1) An evaluation system for the regulating quality of virtual and conventional Power Plants has been established. Firstly, the concept of regulating characteristics is introduced by deconstructing regulating quality. Then, a multi-dimensional and multi-indicator comprehensive evaluation system for regulating quality is built through quantifiable indicator descriptions and weighting of these regulating characteristics. Finally, with the goal of maximizing regulating quality, a further aggregating optimization model for virtual power plants is proposed.

(2) A peak shaving clearing mechanism considering the regulating quality of market entities is put forward. In the context of virtual power plants participating in the peak shaving market, the regulating quality of market entities is introduced as a parameter into the clearing mathematical model. Subsequently, economic and qualitative evaluation indicators for clearing results are presented, along with a decision basis that balances economy and quality. Lastly, a compensation mechanism is proposed based on the VCG auction mechanism to encourage active participation in quality declaration by various entities.

(3) A grid scheduling framework for virtual power plant cluster is constructed. Initially, the meaning of virtual power plant cluster is clarified in the backdrop of multiple virtual power plants participating in grid scheduling. Then, based on the aggregated optimization model of virtual power plants, the concepts of integrated virtual power plants and characteristic virtual power plants are introduced. Finally, leveraging cluster resource

management theory, a cloud cluster management platform is established, and a grid scheduling framework tailored for virtual power plant cluster is set up.

**Key words:** subject differentiation, regulating quality, regulating characteristics, aggregating optimization, scheduling framework

目 录

摘 要 .....I

ABSTRACT ..... II

第一章 绪论 ..... 7

    1.1 研究背景 ..... 7

    1.2 国内外研究现状 ..... 8

        1.2.1 虚拟电厂资源聚合与优化调度 ..... 8

        1.2.2 虚拟电厂参与市场 ..... 9

        1.2.3 多虚拟电厂或虚拟电厂集群 ..... 10

    1.3 本文主要贡献与创新 ..... 11

    1.4 本文组织结构 ..... 12

第二章 虚拟电厂与传统电厂的调节质量评价体系 ..... 14

    2.1 研究对象的拆解 ..... 14

    2.2 调节质量的解构 ..... 14

        2.2.1 灵活性维度 ..... 15

        2.2.2 可靠性维度 ..... 16

        2.2.3 稳定性维度 ..... 16

        2.2.4 经济性维度 ..... 17

        2.2.5 环保性维度 ..... 17

        2.2.6 综合评价体系 ..... 18

    2.3 评价指标的赋权 ..... 19

        2.3.1 模糊层次分析法 ..... 19

        2.3.2 熵权法 ..... 20

        2.3.3 组合权重 ..... 21

2.4 调节特性的对比 .....	21
2.5 聚合优化的建模 .....	22
2.5.1 目标函数 .....	22
2.5.2 约束函数 .....	22
2.6 算例分析 .....	23
2.6.1 数据准备 .....	23
2.6.2 权重计算 .....	25
2.6.3 评分计算 .....	26
2.6.4 调节特性对比 .....	27
2.6.4 深入分析 .....	29
2.7 本章小结 .....	31
<b>第三章 计及市场主体调节质量的调峰出清机制 .....</b>	<b>33</b>
3.1 出清优化的建模 .....	33
3.1.1 目标函数 .....	33
3.1.2 约束条件 .....	33
3.2 解空间的评价 .....	35
3.3 决策点的选取 .....	36
3.4 替代效应的分析 .....	38
3.5 补偿机制的设计 .....	39
3.6 算例分析 .....	40
3.7 本章小结 .....	45
<b>第四章 面向虚拟电厂集群的电网调度框架 .....</b>	<b>47</b>
4.1 虚拟电厂的差异化 .....	47
4.2 虚拟电厂集群的组织架构 .....	48
4.3 电网调度框架 .....	49
4.4 本章小结 .....	51
<b>第五章 全文总结 .....</b>	<b>52</b>

5.1 主要成果 .....	52
5.2 研究展望 .....	52
参 考 文 献 .....	<b>53</b>
致 谢 .....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

在人类掌握可控核聚变技术之前，能源短缺将始终是人类亟待解决的问题之一。电能作为二十一世纪人类现代社会发展的核心能源形式，驱动着工业机械、照明系统、通讯设备以及所有的家用电器，革新的发电技术与电能的高效利用将是能源短缺背景下的永恒命题。随着可再生能源、微型发电、储能以及智能电网等技术的发展，位于用户端的小型发电单元，例如屋顶光伏、风电、储能电池等逐渐受到关注，这些资源被称为分布式资源（Distributed Energy Resource, DER）。分布式能源具有灵活、环保、经济的优势，但其数量多、规模小、信息不透明导致管理困难，并且稳定性不足导致难以直接接入电网或使得电网维稳成本增加，建立分布式能源的聚合管理形式成为有效利用分布式能源的关键。

脱胎于 1997 年 Shimon Awerbuch 博士的著作《虚拟公共设施：新兴产业的描述、技术及竞争力》中对虚拟公共设施的定义，虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP）的概念逐渐进入大众视野，不同于传统电厂作为物理存在自身管理并运行实体的发电终端，虚拟电厂以软件平台的形式聚合各类分布式资源，通过先进的通信、调控手段使经过聚合后的整体具有加入电网、参与电网调度的能力<sup>[1]</sup>，大大降低了分布式资源的利用门槛，虚拟电厂概念的出现使得分布式资源在电网中的规模化接入成为可能。

随着技术的发展，将会有越来越多的虚拟电厂作为新型主体加入电网，其与传统电厂相异的外特性将使得传统电网调度机制越来越难以适用，虚拟电厂规模化接入带来的能源结构、电网结构的改变不可忽视。未来可利用的分布式资源类型或将不断丰富，对不同类型资源的聚合使得虚拟电厂的外特性也将具有一定程度的多样化特征，这将给电网调度机制的设计带来不小挑战。各具特长的虚拟电厂间协同运作，在丰富电网调度生态的同时呈现出一定的产业集群效应，交互机制的渐趋成熟催生出虚拟电厂集群（Virtual Power Plant Cluster, VPPC）的概念，其作为虚拟电厂发展过程中的特殊阶段将逐渐成为未来电网调度机制研究的中心。

## 1.2 国内外研究现状

对于虚拟电厂的研究大体可以分为对内、对外两个方向。对内，即虚拟电厂自身对于分布式资源的聚合、调度两个方面；对外，即虚拟电厂参与电网调度与电力市场的机制。对于虚拟电厂集群的研究同样大体可以分为对内、对外两个方向。对内，即虚拟电厂集群内部虚拟电厂间的能量交互；对外，即虚拟电厂集群参与电网调度与电力市场的机制。

### 1.2.1 虚拟电厂资源聚合与优化调度

关于虚拟电厂的资源聚合与优化调度，不同研究文献的抓手也各不相同。

着眼于某一类或某几类特殊的分布式资源，探究其聚合为虚拟电厂时的特性。在资源聚合方面，文献[2]通过调节潜力评估与外特性建模，表明了变频空调聚合体参与主动配电网优化调度的可行性；文献[3]聚焦于电动汽车，基于其负荷剖面的充电特性提出了电动汽车聚类方法；文献[4]则设计了虚拟电厂聚合电动汽车参与碳市场的流程，并分析了电动汽车在提升虚拟电厂稳定性、环保性上的作用；文献[5]就小型火电机组并网难的问题，提出并仿真验证了火电与储能聚合参与调峰的优越性；文献[6]探究了聚合小型可再生能源与同步电机的虚拟电厂在各种运行状况下的稳定性；文献[7]聚焦于多太阳能电站的聚合，提出了虚拟电厂光伏聚合框架并优化了聚合功率特性；文献[8]提出了一种基于聚合等值算法与凸胞边缘检测法的灵活聚合方法，并解决了聚合风、储虚拟电厂的运行多目标优化问题；文献[9]构建了基于可控负荷的收益-成本分析模型，并量化了不同响应模式带来的影响。在优化调度方面，文献[10]考虑了小水电出力的时空耦合特性，提出了小水电富集型虚拟电厂的优化调度策略；文献[11]挖掘电动汽车的调控潜力，通过状态推演实现电动汽车-虚拟电厂的优化运行；文献[12]建立了风光出力模型与典型场景，并构建了考虑碳因素的优化调度模型；文献[13]基于 K 均值与改进 BP 神经网络，提出了一种精度较高的光伏预测方法用于虚拟电厂调度；文献[14]提出了考虑电池储能和电动汽车的分层随机优化模型，提高了决策实时性，并提出了基于固态变电站的拍卖算法以协调虚拟电厂和电池群；文献[15,16]聚焦于热电联合虚拟电厂，在构建碳循环虚拟电厂数学模型的基础上进行多目标优化求解，文献[17]则进一步求解了含冷热电联供的调度框架。

将研究对象进一步一般化、抽象化，研究资源的共性与个性，在更高的视角对资源进行特性辨识与分类聚合。在资源聚合方面，文献[18]聚焦于可控负荷，提出指标

对可控负荷的特性差异进行量化,并改进 NJW 谱聚类算法实现了可控负荷分类聚合;文献[19]聚焦于用户的调峰性能,以逼近理想解的距离确定聚合用户的优先级;文献[20]通过建立灵活性资源可调能力评估体系,构建了包含等效发电机、储能的聚合参考模型;文献[21]建立了分布式资源响应能力指标评价体系,量化了虚拟电厂响应能力的动态变化;文献[22]介绍了智能家居适用的电能数据聚合平台。在优化调度方面,文献[23]分别聚焦于环境和主体的不确定性,提出了多能源虚拟电厂的运行优化模型;文献[24]则聚焦于源-荷双侧的多重不确定性,提出虚拟电厂的运行模型;文献[25]对分布式资源进行广义电源类型的划分,提出了分布式资源动态组合的响应策略;文献[26]构建了涉及多类分布式资源的通用模型,并分析了不同聚合能源对调度的影响。

从整体聚合模型的机制、算法以及实践中的某个痛点入手,提出新的解决方案。在资源聚合方面,文献[27]通过设计二元一致性算法,提出了分布式资源聚合以及优化运行的算法流程;文献[28]从算法原理特性出发,分别分析了技术型和商业型虚拟电厂的聚合算法;文献[29]基于鲁棒优化,提出了多时间尺度鲁棒聚合模型,以折衷虚拟电厂的鲁棒性和经济性;文献[30]提出了一种帕累托寻优方法,能够有效地找到虚拟电厂聚合模型更全面的纳什均衡点;文献[31]确立了分布式资源自组织聚合的基础与条件,基于帕累托规则提出了虚拟电厂自组织策略,能显著降低优化计算量;文献[32]就虚拟电厂响应无序难以提供稳定调节服务问题,提出了虚拟电厂聚合资源动态响应策略,在响应队列中引入优先级;文献[33]聚焦于虚拟电厂对资源的控制,提出了一种基于网络通道的连接延迟测量方法;文献[34]分析并对比了面向新型电力系统分布式资源聚合架构典型分类的技术特征;文献[35]从资产配置的视角看待资源响应计划的分配,建立了经济性目标的优化组合模型;文献[36]以虚拟电厂与分布式资源双向选择、互相匹配为出发点,提出了基于 Gale-Shapley 算法的匹配机制。在优化调度方面,文献[37]通过一致性算法提高的调度模型求解效率,并解决了通信延迟和噪声问题;类似于区块链思想,文献[38]提出了虚拟电厂的去中心化优化方法,并与中心化优化方法进行对比;文献[39]通过细时间粒度的在线分布式优化,提出了虚拟电厂自主趋优的运行方法;文献[40]就虚拟电厂云服务计算框架可能导致的隐私问题,提出了线性映射信息伪装算法;文献[41]则在提高需求响应精细化的方向做出了贡献,构建长短期记忆网络反映用户的需求响应倾向。

### 1.2.2 虚拟电厂参与市场

关于虚拟电厂参与电网调度与电力市场的机制。

着眼于包含特定资源类型的虚拟电厂参与市场的机制，文献[42]提出了考虑火电和可控负荷参与市场的深度调峰日前市场机制；文献[43]探讨了风电场、电动汽车和柔性负荷参与电力市场的影响，最小化风力发电容量与市场最终清净电量的偏差；文献[44]讨论了涉及光伏、风电和微型涡轮发电机的虚拟电厂的电力交易方案，并比较了对四种算法（PSO、ABC、MRFO、RUN）的优化时间；文献[45]考虑多元不确定性，建立热电联合虚拟电厂的竞标策略。

聚焦于不同市场商业模式间的差异，对于虚拟电厂参与特定市场进行研究，文献[46–49]对虚拟电厂参与不同市场的协同优化方法与机制进行了探讨；文献[50]聚焦跨境连续日内市场，提出了包含水电、风电、火电的虚拟电厂在跨境连续日内市场的多阶段随即规划模型；文献[51]以国外电力市场为例，从多个方面分析了需求响应型虚拟电厂参与电力市场的机制；文献[52]聚焦于虚拟电厂代理参与调峰市场，设计了多种商业模式；文献[53]多角度分析了各地虚拟电厂参与辅助服务市场机制的建设状况，并介绍了国外的相应市场机制。

关注虚拟电厂给市场带来的影响，或是针对虚拟电厂投标策略或利益分配寻找新的解决方案，文献[54]量化了虚拟电厂的调频性能，在虚拟电厂日前投标鲁棒优化策略中考虑了主体调频性能；文献[55]则关注虚拟电厂在灵活性上的优势，考虑灵活溢价设计了市场主体的灵活申报模式；文献[56]引入了信息缺口决策理论，用于模拟市场价格以及可再生能源发电的不确定性；文献[57]提出了基于创建过量区、非过量区两种时区类型的需求响应方法，并优化了虚拟电厂与用户的经济效益；文献[58]提出了以优势约束为中心的虚拟电厂投标风险管理模型，该模型能够更好地控制下行、尾部风险并降低计算成本；文献[59]视虚拟电厂为包含多层利益主体的联盟，构建并求解了两阶段鲁棒优化模型，随后提出了多层利益分配方法；文献[60]将虚拟电厂日前投标类比为投资组合，以夏普比率最高为目标进行决策；文献[61]基于条件风险价值理论，提出虚拟电厂日前优化运行模型，并采用夏普利值法对各成员进行期望成本分配；文献[62]提出了虚拟电厂运营商在日前联合辅助服务市场的协同优化战略，提高了虚拟电厂收益。

### 1.2.3 多虚拟电厂或虚拟电厂集群

关于虚拟电厂集群内部多虚拟电厂间的协同交互。关注典型场景，文献[63]基于能源交互，实现了由传输线相连的两个虚拟电厂的优化运行。聚焦于虚拟电厂特性，文献[64]依据需求响应能力指标对虚拟电厂进行分类聚合，以支撑其分层分区互补调

控。在多虚拟电厂优化模型、机制上,文献[65]基于多代理系统,建立虚拟电厂控制架构,并提出多虚拟电厂参与电力市场时的双层协调机制;文献[66]则通过双层决策模型提出利用多虚拟电厂共享储能促进风光消纳的策略;文献[67]建立了分别侧重于电能互济与功率平衡的日前、日内两阶段联合优化模型,提出了多时间尺度调度策略以显著提升整体经济性。在通过算法、理论寻求新解决方案的方向;文献[68]聚焦于多虚拟电厂协同运作的信任问题,基于区块链技术构建了交易框架,并改进了共识算法;文献[69]基于拉格朗日对偶松弛理论,提出了多虚拟电厂分布式协调优化调度方案,实现“信息分离、决策协同”的目标。

关于虚拟电厂集群参与电网与电力市场的机制。聚焦于典型场景,文献[70]分析多虚拟电厂间协同管理的经济、环保效益问题,考虑绿证-碳交易,提出了多虚拟电厂混合博弈优化调度方法;文献[71]针对区域内多虚拟电厂参与市场,引入主体直接交易机制,以分散式控制结构组织多主体间协作、竞争。从多主体博弈的角度,文献[72]则基于非合作博弈理论和鲁棒优化思想,提出日前市场多虚拟电厂竞标博弈方案,并设计了非合作博弈框架与交易流程;文献[73]则建立多虚拟电厂与运营商的一主多从博弈模型,研究其定价行为与能量管理,并基于 Kriging 元模型提出主从博弈均衡算法。

### 1.3 本文主要贡献与创新

虚拟电厂,作为各种分布式资源的聚合体,经常与传统电厂进行对比。然而,这种对比通常仅停留在表面,是否能进一步量化这两者之间的差异呢?在以往对虚拟电厂特征辨识和资源聚合的研究中,与传统电厂的外特性差异通常仅用定性描述。这种描述对于资源类型差异大的主体可能适用,但对资源类型相近的主体则不够准确。随着虚拟电厂聚类资源的不断丰富,外特性的差异化在电网调度决策的精细化过程<sup>[74]</sup>中将变得不可或缺。基于主体差异化的需求,聚焦于主体的调节质量,本文做了如下工作:

- (1) 从五个维度解构调节质量,并提出调节特性的概念;
- (2) 构建虚拟电厂与传统电厂的调节质量多维度多指标综合评价体系;
- (3) 采用 FAHP-EWM 主客观联合赋权法对指标进行赋权;
- (4) 通过雷达图具象化体现虚拟电厂与传统电厂的调节特性差异;
- (5) 建立以最大化调节质量为目的的虚拟电厂分布式资源聚合优化模型。

调节质量和调节特性不仅可用来区分虚拟电厂与传统电厂,还可用于区分不同的虚拟电厂。作为主体属性,自然联想到,调节质量这一新参数将如何影响市场出清呢?以往关于虚拟电厂参与电网调度的研究中,激励机制设计主要侧重于外部激励。具有较高调节质量的虚拟电厂类主体参与市场时,若将市场主体的调节质量参数纳入出清模型,虚拟电厂此类高质量资源主体的出清交易量与收益水平将得到提高,符合其利益诉求,能够从内部激励其积极参与市场申报,促进高质量资源的消纳。基于内部激励、促进消纳的构想,以电力系统调峰市场为例,本文做了如下工作:

- (1) 改进传统调峰市场出清模型,纳入市场主体调节质量参数;
- (2) 提出不同质量约束下出清结果的经济性、质量量化指标;
- (3) 权衡出清结果量化指标,提出决策点选取依据;
- (4) 从 VCG 机制入手,量化参与质量申报后的机组竞争力变化;
- (5) 设计能够适当平衡收益并激励各主体参与质量申报的补偿机制。

在虚拟电厂集群中,一个有效的区分机制对于提高整体效率和发挥个体优势至关重要。那么,这种包含多个虚拟电厂的组织形式能否有效地对内部成员进行区分呢?以往对多虚拟电厂或虚拟电厂集群的研究多关注于内部或多主体间的博弈竞争,而从电网角度出发,关于如何调度这些主体的研究相对较少。在满足基本调度需求的前提下,面对特性各异的调度主体,对于多种调度方案的取舍体现出电网调度的偏好性,而这离不开有效的集群管理系统。基于集群管理的思想,从传统的云-群-端调度架构出发,本文做了如下工作:

- (1) 基于聚合优化模型,引入综合型虚拟电厂与特征型虚拟电厂的概念;
- (2) 依托资源集群管理理论,构建集群组织架构,并提出云端管理平台;
- (3) 纳入集群特征,构建面向虚拟电厂集群的电网调度框架。

## 1.4 本文组织结构

总的来说,全文以“主体差异化”为线索,逐步构建起面向虚拟电厂集群的电网调度框架,所谓主体差异化,即量化差异、引入差异、区分主体的过程,其本质上也是在确定不同需求场景下各主体的调度优先级。本文第二、三、四章分别对应上一小节的三段工作内容。

第二章提出调节质量与调节特性的概念,这是主体差异化的依据,也是量化差异的过程,从调节特性到调节质量,从具象到抽象,刻画了不同电厂多维度的差异。在

建立调节质量评价体系后，进一步提出以最大化调节质量为目的的聚合优化模型，则是为第四章埋下的伏笔。

第三章将调节质量引入出清模型，分析这种差异会给市场带来怎样的影响，在市场中，产品的差异化往往意味着竞争优势，而竞争格局的改变会同时带来收益水平的变化。经济性与质量性的权衡取舍不仅仅局限于有虚拟电厂参与的调峰市场，质量性可以是任何调节特性，权衡亦将普遍存在于面向集群的调度决策中。

第四章提出综合型虚拟电厂和特征型虚拟电厂的概念，这是区分主体的过程，并在之后搭建起对内的集群组织架构，以及对外的集群调度框架，基于传统的云-群-端电网调度架构，最终实现了主体差异化从微观到宏观的辐射。

本文的组织结构如下图所示：

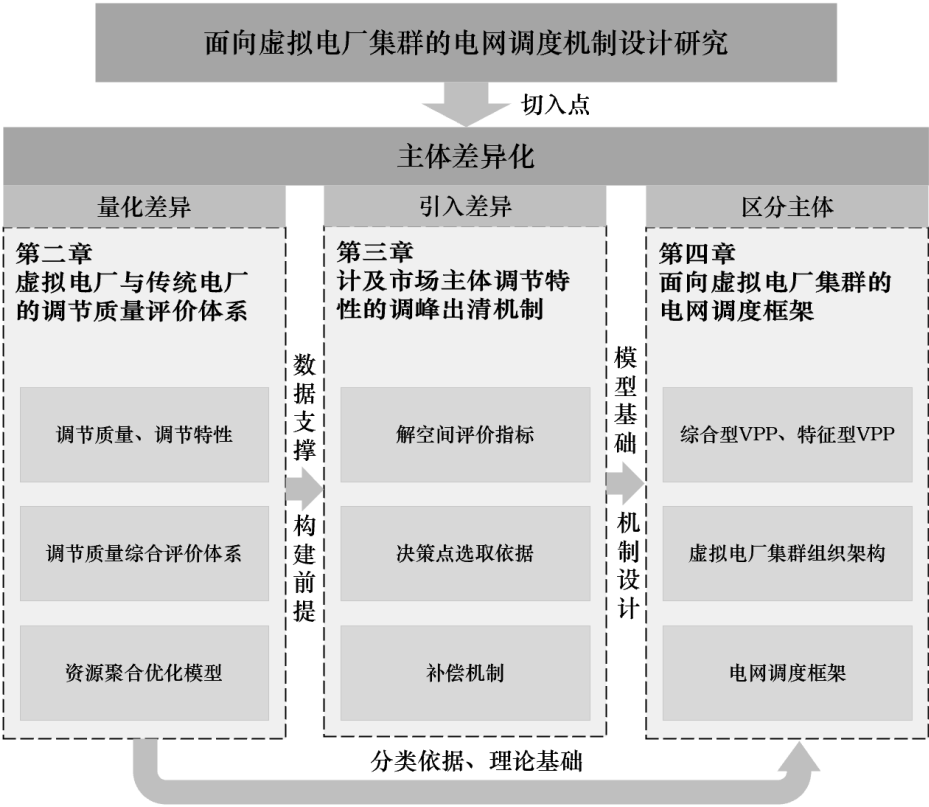


图 1-1 本文的组织结构图

Fig.1-1 Organization of the dissertation

## 第二章 虚拟电厂与传统电厂的调节质量评价体系

### 2.1 研究对象的拆解

本章研究对象为虚拟电厂和传统电厂。

虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP），可视为聚合分布式能源参与电网运行的一种非实体形式。所谓分布式能源，即分散在用户侧的可利用资源，主要包括光伏、风电、微型燃气轮机、蓄电池、电动汽车等，根据其用途不同亦可分为家庭分布式能源和公共分布式能源，前者一般规模较小优先满足家庭用电而余电上网，后者一般规模较大主要通过售电运行。由于所聚合资源的性质不一，虚拟电厂本身同时具有电源特性和负荷特性，本文所指虚拟电厂只考虑其电源特性，故将虚拟电厂视为光伏、风电、燃气轮机、蓄电池四类资源的集合。

传统电厂（Conventional Power Plant, CPP），或称常规电厂。不同于虚拟电厂通过软件平台整合分布式能源，传统电厂直接通过物理设备产生并出售电能。目前人类掌握的三大能源形式：化石能源、可再生能源、核能，分别对应着三大传统电厂：火电厂、水电厂、核电厂。此外，部分水电厂配套建设有抽水蓄能电站用于提高水电的稳定性和动态调节能力，也可将其纳入调节质量评价对象的考虑范畴，故传统电厂视为火电、水电、核电三类资源的统称，并额外考虑抽水蓄能。

综上，从两类研究对象中拆解出八类待评价资源：光伏、风电、燃气轮机、蓄电池、抽水蓄能、火电、水电、核电，之后的分析将聚焦于这八类资源。

### 2.2 调节质量的解构

调节质量（Regulating Quality, RQ）是一个相对抽象的概念，人们通常讨论的是资源在调节场景下表现出的特性，比如光伏、风电往往被认为具有更高的灵活性，而火电则被认为具有更好的稳定性，顺应这种直观感受，将调节质量解构为五个维度：灵活性、可靠性、稳定性、经济性、环保性，这种解构使得调节质量可以作为影响调度优先级的判据。灵活性和稳定性直观上自然与调节质量相关，形式上也有一种有趣的对应：“灵活”对应“调节”，“稳定”对应“质量”；可靠性则表征资源能够合格完成计划任务的能力，在某种意义上可视为其信用值，总是能出色完成任务的可靠资源

具有更高的调度优先级；经济性和环保性则可视为资源参与调节的“性价比”，这里的价既可以是经济代价，也可以是环境代价，性价比高的商品往往卖得不错，未来既经济又环保的资源所具有的调度优势将逐渐变得显著。可靠性、经济性、环保性这三个维度可以视为是对资源调节质量在广义上的描述。

五个维度是描述调节质量的一级指标，称其为资源的调节特性（Regulating Characteristics, RC），调节特性依然只能定性地评价优劣而无法量化对比，接下来在调节特性下设立若干可量化的二级指标，对指标进行标准化、赋权后得到的评分作为资源调节质量和各调节特性优劣的评价依据。对于部分数值越低该特性评价越好的指标，将选取减函数映射为与评价正相关的值。

### 2.2.1 灵活性维度

在资源灵活性维度上，选取爬坡率、功率步长、可调率和响应及时率四个二级指标。

（1）爬坡率（Ramp Rate, RR），表征能源设备改变输出功率的能力，爬坡率越高灵活性越好，计算式为：

$$RR = \frac{\frac{\Delta P}{P_{max}} \times 100\%}{\Delta t} \quad (2-1)$$

单位%/min，为 $\Delta t$ 时间内的功率改变量， $P_{max}$ 为装机容量。设备爬坡率通常处于一个区间 $[RR^-, RR^+]$ ， $|RR^-|$ 和 $|RR^+|$ 分别为降低和提高功率时最大变化率，取两者平均值作为典型值：

$$RR_c = \frac{|RR^-| + |RR^+|}{2} \quad (2-2)$$

（2）功率步长（Power Step, PS），即最低调整功率，表征能源设备在调节输出时的精确度，功率步长越低灵活性越好。功率步长往往与控制系统和调节设备有关，配备较多现代智能化设备的机组可能会具有更高的调节精度，所以在一定程度上也反映了机组的现代化程度。对功率步长的评价采用分档评分，分为百瓦、千瓦、万瓦三档，分别评分 1、0.6、0.2 分。

（3）可调率（Adjustment Range, AR），表征能源设备的调节潜力，可调率越高灵活性越好，计算式为：

$$AR = \left(1 - \frac{P_{min}}{P_{max}}\right) \times 100\% \quad (2-3)$$

单位%， $P_{max}$ 为装机容量， $P_{min}$ 为最小技术出力。

(4) 响应及时率 (Timeliness of Response, TOR), 表征能源设备的及时响应能力, 响应及时率越高可靠性越好, 计算式为:

$$TOR = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \times 100\% \quad (2-4)$$

单位%,  $N$  为统计时间内调度命令总数,  $n$  为统计时间内未及时响应次数。

### 2.2.2 可靠性维度

在资源可靠性维度上, 选取电压合格率、有功曲线合格率和计划完成率三个二级指标。

(1) 电压合格率 (Voltage Pass Rate, VPR), 表征能源设备的电压达标水平, 电压合格率越高可靠性越好, 计算式为:

$$VCR = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{nT} \times 100\% \quad (2-5)$$

单位%,  $T$  为统计时间,  $t_i$  为第  $i$  考核点在统计时间内电压合格的时间,  $n$  为考核点的数目。

(2) 有功曲线合格率 (Active Curve Pass Rate, ACPR), 表征能源设备的有功曲线达标水平, 有功曲线合格率越高可靠性越好, 计算式为:

$$ACPR = \left(1 - \frac{t}{T}\right) \times 100\% \quad (2-6)$$

单位%,  $T$  为统计时间,  $t$  为统计时间内有功曲线偏离正常波动范围的时间。

(3) 计划完成率 (Plan Completion Rate, PCR), 表征能源设备对于发、用电计划的完成水平, 计划完成率越高可靠性越好, 其计算式为:

$$PCR = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \times 100\% \quad (2-7)$$

单位%,  $N$  为统计时间内计划总数,  $n$  为统计时间内未完成计划的次数。

### 2.2.3 稳定性维度

在资源稳定性维度上, 选取工作稳定率和工作持久率两个二级指标。

(1) 工作稳定率 (Working Stability, WS), 表征能源设备稳定工作的能力, 稳定率越高稳定性越好。计算式为:

$$WD = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (2-8)$$

单位%,  $N$  为统计小时数,  $n$  为统计时间内有效供电小时数。

(2) 工作持久率 (Working durability, WD), 表征能源设备持续工作的能力, 持久率越高稳定性越好, 设机组时间 $t$ 内发生停运概率为 $p$ , 统计时间 $T = Nt$ 内停运 $n$ 次, 停运概率越低稳定性越好, 故采用与其互补的正常工作概率评价稳定性:

$$WS = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \times 100\% \quad (2-9)$$

单位%, 这里采用了停运概率的最大似然估计值。

#### 2.2.4 经济性维度

在资源经济性维度上, 选取度电成本和边际收益两个二级指标。

(1) 度电成本 (Levelized Cost of Electricity, LCOE), 指发出单位千瓦时电量需要的平均成本, 其包括建设、运维、燃料、财务成本等, 表征资源的经济效益。LCOE 处于区间 $[C_{min}, C_{max}]$ 时取平均值:

$$C_q = \frac{C_{min} + C_{max}}{2} \quad (2-10)$$

作为典型值。度电成本越低经济性越好, 这里采用负指数函数进行评分:

$$LCOE_q = e^{-\frac{LCOE_c}{\alpha}} \quad (2-11)$$

$LCOE_q$ 为量化的评分,  $LCOE_c$ 为典型值,  $\alpha$ 为正实数参数 (这里取 1), 不同参数使评分呈现不同的分布。负指数函数符合减函数的要求, 并且具有: (a) 自变量大于零时函数值分布在 $[0,1]$ ; (b) 形式简单易懂; (c) 可调参数影响评分分布……等优点。

(2) 边际收益 (Marginal Returns, MR), 表征能源设备给市场带来收益的能力, 边际收益越高经济性越好, 计算式为:

$$MR_i = \left(1 - \frac{r_i}{R}\right) \times 100\% \quad (2-12)$$

单位%,  $R$ 为市场主体的总收益,  $r_i$ 为该主体去除成员 $i$ 后的收益。

#### 2.2.5 环保性维度

在资源环保性维度上, 考虑度电碳排和可再生能源利用率两个二级指标。

(1) 度电碳排 (Kilowatt-hour Carbon Emissions, KCE), 发出单位千瓦时电量的碳排放量 (克), 表征资源的环保效益。类似 LCOE, KCE 处于区间 $[E_{min}, E_{max}]$ 时取平均值:

$$E_q = \frac{E_{min} + E_{max}}{2} \quad (2-13)$$

作为典型值（储能碳排忽略不计）。度电碳排越低环保性越好，类似于度电成本这里也采用负指数函数进行评分：

$$KCE_q = e^{-\frac{KCE_c}{\beta}} \quad (2-14)$$

$KCE_q$ 为量化的评分， $KCE_c$ 为典型值， $\beta$ 为参数（这里取 236）。

（2）清洁能源利用率（Clean Energy Utilization, CEU），指可再生能源设备或系统在一段时间内实际利用的清洁能源量与可利用最大清洁能源量的比率，表征能源设备利用清洁能源的水平，利用率越高环保性越好，其计算式为：

$$CEU = \frac{\bar{P}}{P_{max}} \times 100\% \quad (2-15)$$

单位%， $\bar{P}$ 为清洁能源平均发电量， $P_{max}$ 为清洁能源发电装机容量。实际计算中对于清洁能源机组可用年最大利用小时数占全年小时数的比例代替。

### 2.2.6 综合评价体系

综上，本节从五个维度描述了调节质量，并设立 13 个可量化的二级指标，在设立指标的同时考虑了指标的标准化，所选指标数值均为位于[0,1]区间。资源调节质量多指标综合评价体系如下图所示：

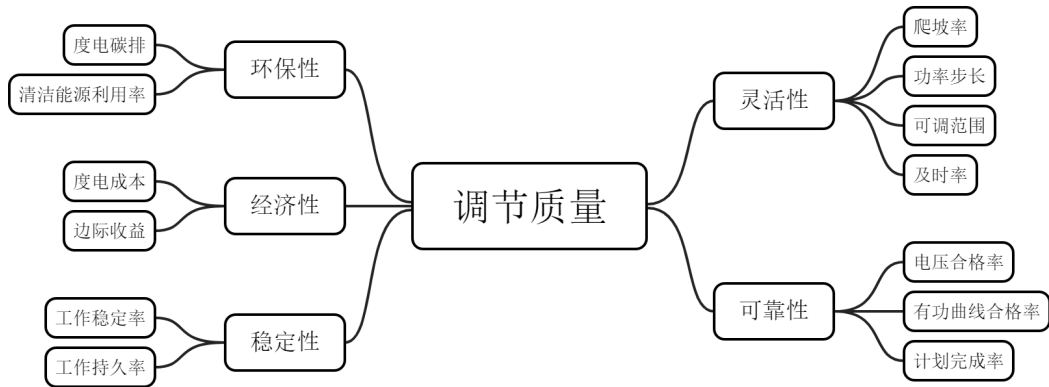


图 2-1 调节质量多指标综合评价体系

Fig.2-1 Regulating quality multi-index comprehensive evaluation system

之后将对这 13 个二级指标进行赋权，并进一步计算调节质量总评分以及维度评分。

## 2.3 评价指标的赋权

指标赋权是指在综合评价或决策分析过程中,为各个评价指标分配相应的重要性权重。这一过程是评价体系中的关键环节,直接影响到评价或决策结果的准确性和可靠性。在指标赋权方法中,有两种主要的方法类型:主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法主要依赖专家的意见和经验来确定指标的权重,而客观赋权法则主要基于数据本身的统计特性来确定权重。

在主观赋权法中,一种常用方法是模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP),其结合了层次分析法(AHP)和模糊数学概念,能够处理模糊和不确定性信息,其原理是通过专家对指标进行重要性判断后利用模糊数学工具计算权重。FAHP方法的优点在于能够系统地处理复杂问题,结合定性、定量分析以充分利用专家知识与经验,而其缺点则是虽然专家的判断能够较大程度地反映客观事实,但仍无法避免地受到主观判断的影响,结果存在一定程度的主观性。

在客观赋权法中,一种常用方法是熵权法(Entropy Weight Method, EWM),其依据原理是:指标的变异程度越小代表其反映的信息量也越少,故对应的权值也应更低。EWM方法主要用于解决评价类问题,将归一化后的指标信息熵作为权重。EWM方法的优点在于其客观性,不依赖于专家的主观判断,而其缺点则是对原始数据的标准化方式没有统一标准,不同方式标准化得到的结果可能存在很大差异。

为综合考虑主客观因素,本节采用模糊层次分析法-熵权法联合赋权法(FAHP-EWM),对原始数据分别计算模糊层次分析法权重和熵权法权重,两权重进行几何平均后的组合权重作为最终的指标权重。

### 2.3.1 模糊层次分析法

FAHP赋权法体现指标间的重要性差异,由专家主观给出的重要性判断矩阵计算权重,越重要的指标权重越高。步骤如下:

#### (1) 构建模糊判断矩阵

13个指标编号 $F_1 \sim F_{13}$ ,矩阵元素 $a_{ij}$ 即 $F_i$ 相对于 $F_j$ 的重要程度,重要程度分为0.1~0.9,0.1代表非常不重要,0.5代表同等重要,0.9代表非常重要。请专家填写矩阵主对角线上半或下半部分,另一半对称元素满足关系

$$a_{ij} + a_{ji} = 1 \quad (2-16)$$

得到模糊判断矩阵 $A$ 。

(2) 计算模糊一致性矩阵

行和:

$$f_i = \sum_{k=1}^n a_{ik} \quad (2-17)$$

列和:

$$f_j = \sum_{k=1}^n a_{kj} \quad (2-18)$$

再计算一致性矩阵元素:

$$f_{ij} = \frac{f_i - f_j}{2n} + 0.5 \quad (2-19)$$

$n$ 为指标数目。得到模糊一致性矩阵 $F$ 。

(3) 计算 FAHP 权重

指标 $F_i$ 的 FAHP 权重为:

$$w_i^{FAHP} = \frac{2 \sum_{k=1}^n f_{ik} - 1}{n(n-1)} \quad (2-20)$$

### 2.3.2 熵权法

EWM 赋权法体现数据之间的数值差异性, 由客观数据矩阵计算权重, 不同评价对象对某一指标的数值差异越大, 则该指标权重越高。步骤如下:

(1) 数据矩阵标准化

设原数据矩阵为 $D$ , 列向量为 $m$ 个评价对象, 行向量为 $n$ 个指标, 组成矩阵 $D_{n \times m}$ , 其元素 $d_{ij}$ 为评价对象 $j$ 的第 $i$ 个指标评分。设标准化数据矩阵为 $D^1$ , 标准化元素为 $d_{ij}^1$ , 通过不同的标准化函数使 $d_{ij}^1$ 位于 $[0,1]$ 区间。本文指标无需再次标准化。

(2) 计算元素比重矩阵

元素 $d_{ij}^1$ 的比重为:

$$p_{ij} = \frac{d_{ij}^1}{\sum_{k=1}^m d_{ik}^1} \quad (2-21)$$

(3) 计算信息熵

元素比重矩阵的元素 $p_{ij}$ 的信息熵为:

$$e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{k=1}^m (p_{ik} \times \ln p_{ik}) \quad (2-22)$$

#### (4) 计算权重

指标 $F_i$ 的 EWM 权重为:

$$w_i^{EWM} = \frac{1 - e_i}{\sum_{k=1}^n (1 - e_k)} \quad (2-23)$$

### 2.3.3 组合权重

综合考虑指标的主客观因素, 将两权重进行几何平均后的权重作为最终的指标权重。指标 $F_i$ 的指标权重为:

$$w_i = \frac{\sqrt{w_i^{FAHP} w_i^{EWM}}}{\sum_{k=1}^n \sqrt{w_k^{FAHP} w_k^{EWM}}} \quad (2-24)$$

## 2.4 调节特性的对比

标准化数据矩阵转置后与指标权重列向量相乘, 便得到了每个待评价资源的调节质量评分。而对于聚合了不同种类资源的虚拟电厂, 则采用其所聚合资源的调节质量评分依据资源容量占比加权得到虚拟电厂的调节质量评分。

单一的调节质量评分作为对比资源调节质量优劣的量化依据仍然难以体现资源调节特性在不同维度上的差异, 而同一维度的指标评分虽有高低, 但其归一化成员为本资源的所有指标评分, 这导致不同维度本身占有的权重不一致, 进而导致不同维度的指标权重在与数据矩阵对应行列相乘后的结果不具有可比性。于是, 这里将资源隶属于同一维度的指标进行归一化得到维度权重, 此权重中隶属于同一维度指标的权重和相同, 即抹平了不同维度的权重差异。指标 $F_i$ 在维度 $j$ 的维度权重计算式:

$$w_{ij} = \frac{w_i}{\sum_{i \in j} w_i} \quad (2-25)$$

式中,  $\sum_{i \in j} w_i$  表示同属于维度 $j$ 的指标权重和。资源同一维度的数据矩阵转置后与维度权重列向量相乘, 便得到该资源在这一维度的评分。

具象化展示待评价对象不同维度差异性的一种常用图形为雷达图, 本章中各资源评分数据的设置将导致差异过大而不利于比较, 为提升雷达图的可读性和美观性, 这里采用量纲化方法中的区间化, 将评分数据均限制在 $[0.3, 0.9]$ 区间, 即评分极差最大值限制为 0.6。对于评分 $p_{ij}$ , 新评分 $p'_{ij}$ 为:

$$p'_{ij} = \frac{p_{ij} - \min\{P_i\}}{\max\{P_i\} - \min\{P_i\}} \times 0.6 + 0.3 \quad (2-26)$$

同列元素为八类资源在某一维度的评分， $\min\{P_i\}$ 为所在列最小值， $\max\{P_i\}$ 为所在列最大值。

## 2.5 聚合优化的建模

在建立对所选指标及量化方法科学性的认同后，VPP 如何聚合资源便成为一个优化问题。聚合的目标首先是调节质量最高，此外，若希望 VPP 调节特性维度水平均衡，成为“五边形战士”，还可以将五维度评分差距限制在小区间。这里考虑以调节质量最高，评分极差最小两个目标为目标函数的多目标优化，设定调节质量最高为主要目标，在约束中添加评分极差约束。

### 2.5.1 目标函数

VPP 调节质量最高：

$$\max \left[ \sum_{i=1}^n p_i q_i \right] \quad (2-27)$$

式中， $p_i$ 为第*i*类资源的占比， $q_i$ 为第*i*类资源的调节质量评分， $n$ 为 VPP 拟聚合的资源类型数目。

### 2.5.2 约束函数

(1) 容量占比归一：

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (2-28)$$

(2) 资源容量约束：

$$p_{i-\min} \leq p_i \leq p_{i-\max} \quad (2-29)$$

式中， $p_i$ 为第*i*类资源容量占比， $i$ 取1~ $n$ ； $p_{i-\max}$ ,  $p_{i-\min}$ 分别为其容量占比上、下限。例如，由于风光等新能源的不确定性，需要有一定的储能容量以保证 VPP 出力的可靠性，且储能容量一般不会超过源类资源装机容量；光伏、风电资源受地域影响大、

空间分布不均的特性使其装机容量存在限制。通常能得到的是容量上下限而非占比，占比通过容量除以 VPP 拟定规模计算。

(3) 评分极差约束：

$$\mathbf{Q}^T \mathbf{P} = \mathbf{D} \quad (2-30)$$

$$\max(d_i - d_j) \leq \varepsilon, \quad 1 \leq i, j \leq 5 \quad (2-31)$$

式中， $\varepsilon$ 为区间半宽度； $\mathbf{Q}$ 为 $n \times 5$ 矩阵， $n$ 为 VPP 拟聚合的资源类型数目，5为5个维度，矩阵元素为资源的维度评分； $\mathbf{P}$ 为 $n \times 1$ 列向量，向量元素为资源容量占比； $\mathbf{D}$ 为 $5 \times 1$ 列向量，向量元素 $d_i$ 为 VPP 第 $i$ 维度评分。式(2-31)表示 $\mathbf{D}$ 中任意两元素的最大差值不超过 $\varepsilon$ 。

优化结果为 $n$ 类资源的容量占比，将其乘以虚拟电厂规模得到各资源容量。不同类型的资源对于调节质量存在不同的影响，为追求更高的调节质量，VPP 将倾向于选择本身具有较好禀赋的资源。

## 2.6 算例分析

### 2.6.1 数据准备

本小节进行上述评价方法的算例分析，参考实际情况填写数据矩阵如下：

表 2-1 数据矩阵

指标	光伏	风电	抽水蓄能	蓄电池	燃气轮机	火电	水电	核电
爬坡率	0.2	0.5	0.9	0.9	0.5	0.0225	0.75	0.125
功率步长	1	0.6	1	1	0.6	0.2	0.2	0.2
可调率	0.9	0.9	0.99	0.99	0.99	0.8	0.9	0.99
响应及时率	0.85	0.82	0.95	0.95	0.8	0.6	0.7	0.8
电压合格率	0.9	0.95	0.99	0.99	0.9	0.99	0.99	0.99
有功曲线合格率	0.95	0.89	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
计划完成率	0.95	0.9	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
工作稳定率	0.3	0.5	1	1	0.9	0.9	0.9	0.9

续表 2-1

指标	光伏	风电	抽水蓄能	蓄电池	燃气轮机	火电	水电	核电
工作持久率	0.95	0.9	0.98	0.98	0.9	0.95	0.95	0.95
度电成本	0.28	0.28	0.27	0.285	0.67	0.26	0.11	0.4
边际收益	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.5	0.3	0.2
度电碳排	45.5	15.4	0	0	458	923	76.5	5.85
清洁能源利用率	0.3	0.3	0.9	0.9	0.5	0.01	0.6	0.01

对部分数据进行标准化形成评分矩阵：

表 2-2 标准化评分矩阵

指标	光伏	风电	抽水蓄能	蓄电池	燃气轮机	火电	水电	核电
爬坡率	0.2	0.5	0.9	0.9	0.5	0.0225	0.75	0.125
功率步长	1	0.6	1	1	0.6	0.2	0.2	0.2
可调率	0.9	0.9	0.99	0.99	0.99	0.8	0.9	0.99
响应及时率	0.85	0.82	0.95	0.95	0.8	0.6	0.7	0.8
电压合格率	0.9	0.95	0.99	0.99	0.9	0.99	0.99	0.99
有功曲线合格率	0.95	0.89	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
计划完成率	0.95	0.9	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
工作稳定率	0.3	0.5	1	1	0.9	0.9	0.9	0.9
工作持久率	0.95	0.9	0.98	0.98	0.9	0.95	0.95	0.95
度电成本	0.28	0.28	0.27	0.285	0.67	0.26	0.11	0.4
边际收益	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.5	0.3	0.2
度电碳排	45.5	15.4	0	0	458	923	76.5	5.85
清洁能源利用率	0.3	0.3	0.9	0.9	0.5	0.01	0.6	0.01

由专家对指标于调节质量的重要性进行评判得到判断矩阵：

表 2-3 模糊判断矩阵

指标	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
F1	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.5	0.9	0.9	0.9
F2	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.4	0.8	0.8	0.8
F3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.5	0.8	0.8	0.9
F4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.4	0.7	0.8	0.8
F5	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.4	0.7	0.7	0.8
F6	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.3	0.6	0.7	0.7
F7	0.2	0.4	0.3	0.4	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6	0.3	0.6	0.6	0.7
F8	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.2	0.6	0.6	0.6
F9	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.2	0.5	0.6	0.6
F10	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.5	0.8	0.9	0.9
F11	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.2	0.5	0.5	0.6
F12	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.1	0.5	0.5	0.5
F13	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.1	0.4	0.5	0.5

表中F1~F13依次表示 13 个二级指标。

2. 6. 2 权重计算

通过熵权法计算体现数据之间的差异性的客观权重，而后计算模糊一致性矩阵并进一步得到指标的主观权重，两权重取几何平均后再次标准化得到组合权重，同维指标权重内部标准化后得到维度权重，所有权重数据如下：

表 2-4 权重数据

指标	EWM 权重	FAHP 权重	组合权重	维度权重
F1	0.27049	0.09546	0.22500	0.51591

续表 2-4

指标	EWM 权重	FAHP 权重	组合权重	维度权重
F2	0.14643	0.08619	0.15730	0.36069
F3	0.00200	0.08928	0.01872	0.04293
F4	0.00769	0.08168	0.03509	0.08047
F5	0.00065	0.08001	0.01006	0.42379
F6	0.00031	0.07716	0.00685	0.28856
F7	0.00032	0.07502	0.00683	0.28764
F8	0.04289	0.07074	0.07712	0.91634
F9	0.00037	0.06765	0.00704	0.08366
F10	0.00818	0.09237	0.03848	0.28345
F11	0.07478	0.06456	0.09729	0.71655
F12	0.16405	0.06147	0.14061	0.43911
F13	0.28184	0.05838	0.17960	0.56089

2.6.3 评分计算

数据评分矩阵转置后与权重列向量相乘得到调节质量总评分,同维指标评分转置后与维度权重相乘得到维度评分,或者称为特性评分:

表 2-5 维度评分

评价对象	灵活性	可靠性	稳定性	经济性	环保性
光伏	0.5709	0.9288	0.3544	0.3586	0.5304
风电	0.579	0.9183	0.5335	0.4303	0.5796
抽水蓄能	0.944	0.9814	0.9983	0.3597	0.9439
蓄电池	0.944	0.9814	0.9983	0.3565	0.9439

续表 2-5

评价对象	灵活性	可靠性	稳定性	经济性	环保性
燃气轮机	0.5812	0.9432	0.9000	0.2167	0.3435
火电	0.1664	0.9814	0.9042	0.5768	0.0144
水电	0.554	0.9814	0.9042	0.4689	0.6541
核电	0.1855	0.9814	0.9042	0.3333	0.434

为后续绘制的雷达图美观，通过区间化方法将评分极差限制为 0.6：

表 2-6 区间化后的维度评分

评价对象	灵活性	可靠性	稳定性	经济性	环保性
光伏	0.6121	0.4000	0.3000	0.5364	0.6331
风电	0.6184	0.3000	0.4669	0.6558	0.6649
抽水蓄能	0.9000	0.9000	0.9000	0.5382	0.9000
蓄电池	0.9000	0.9000	0.9000	0.5329	0.9000
燃气轮机	0.6201	0.5370	0.8084	0.3000	0.5124
火电	0.3000	0.9000	0.8123	0.9000	0.3000
水电	0.5991	0.9000	0.8123	0.7202	0.7129
核电	0.3147	0.9000	0.8123	0.4943	0.5708

2. 6. 4 调节特性对比

这里模拟一个聚合光伏、风电、蓄电池储能的虚拟电厂，规模为 100kW。光伏、风电容量占比均为0.1~0.5，蓄电池容量占比为0.2~0.45，设定评分极差 $\varepsilon = 0.178$ （此为解决空间非零的最低值）。编写代码并运行，得到优化结果为（0.34684，0.26624，0.38692），分别代表光伏、风电、蓄电池的容量占比，即光伏、风电、蓄电池容量分别为 34684W、26624W、38692W，此时的调节质量评分为 0.66656。

绘制各资源与此虚拟电厂的调节质量雷达图如图 2-2、图 2-3 所示。

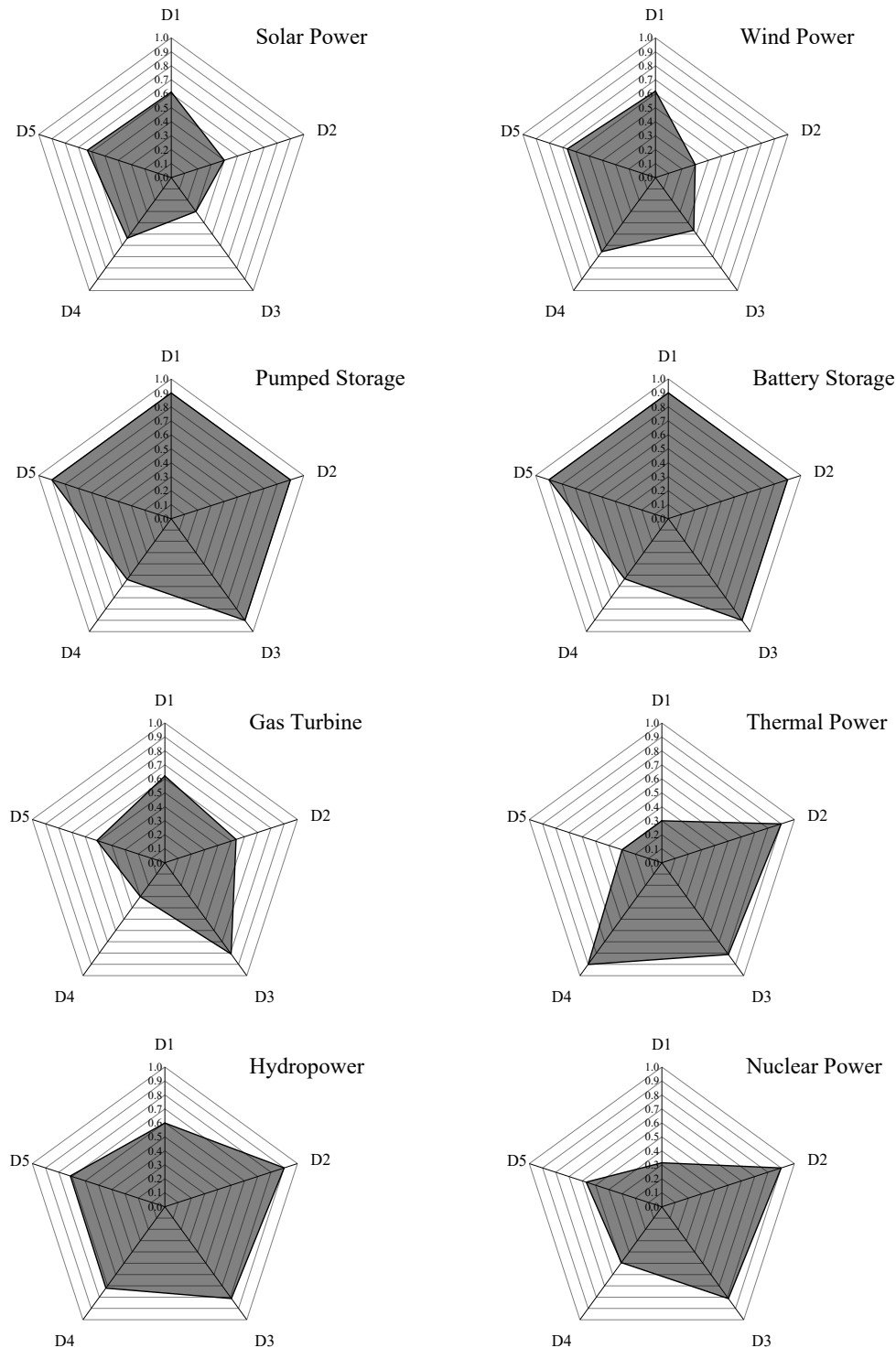


图 2-2 各资源调节质量五维雷达图

Fig.2-2 Five-dimensional radar diagram of resource regulating quality

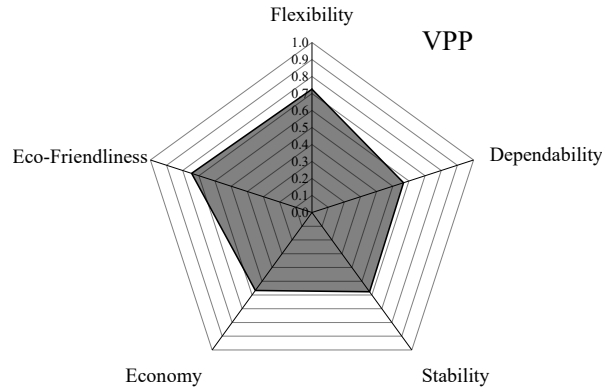


图 2-3 VPP 五维雷达图

Fig.2-3 VPP five-dimensional radar diagram

图中 $D1 \sim D5$ 分别表示灵活性、可靠性、稳定性、经济性、环保性。

可以看出，在本算例中，此虚拟电厂相对于火电厂、核电厂，在灵活性、环保性上具有优势，而相对于水电厂，仅在灵活性上具有优势；相对的，对比虚拟电厂，火电厂、水电厂则在可靠性、稳定性、经济性上具有优势，核电厂在稳定性上具有优势。虚拟电厂通过资源聚合，在一定程度上弥补内部资源的短板，调节质量各维度均衡发展，成为“五边形战士”，本文提供了一个可行思路。

#### 2.6.4 深入分析

若舍弃维度评分均衡性，继续提高评分极差 $\varepsilon$ ，设定其按0.0001的步长从0.178提高到0.198，其调节质量评分仍有提高空间，调节质量与评分极差的关系如图 2-4 所示。可以看到，在到达第一个转折点(0.1824, 0.695)前， $Q$ 随 $\varepsilon$ 快速升高，之后缓慢增长。当 $\varepsilon$ 增大到 0.188 后，调节质量评分达到最大值 0.6967 不再变化，此时各资源占比为 10%光伏、45%风电，45%蓄电池储能，各资源调节质量评分排序如图 2-5 所示。进一步分析，资源容量比例限制极大地影响了最优点位置，若将容量比例均只限制在[0,1]，即虚拟电厂拟聚合资源容量占比无额外的上下限，再令评分极差 $\varepsilon$ 按0.001的步长从0.17提高到0.38，得到 $Q - \varepsilon$ 关系如图 2-6 所示，随着评分极差 $\varepsilon$ 增大，光伏容量快速降低至0，风电容量在短暂升高后也缓慢降低至0，而蓄电池容量则逐步上升至1，这与调节质量评分相对应，高评分资源占比存在上升趋势。

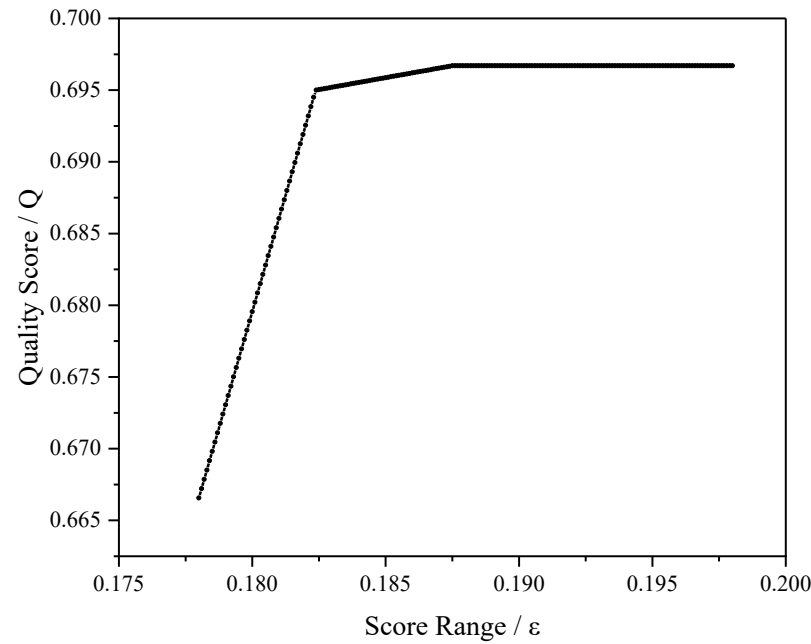


图 2-4 VPP 调节质量-评分极差 ( $Q - \varepsilon$ ) 折线图

Fig.2-4 VPP regulating quality score - score range ( $Q - \varepsilon$ ) line chart

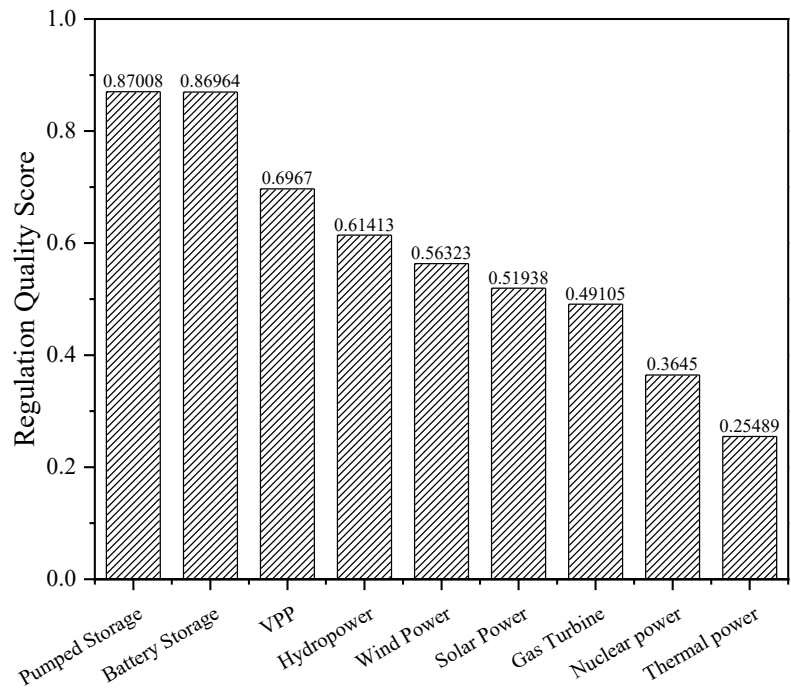


图 2-5 各资源调节质量评分排序柱形图

Fig.2-5 Each resource regulating quality score ranking bar Chart

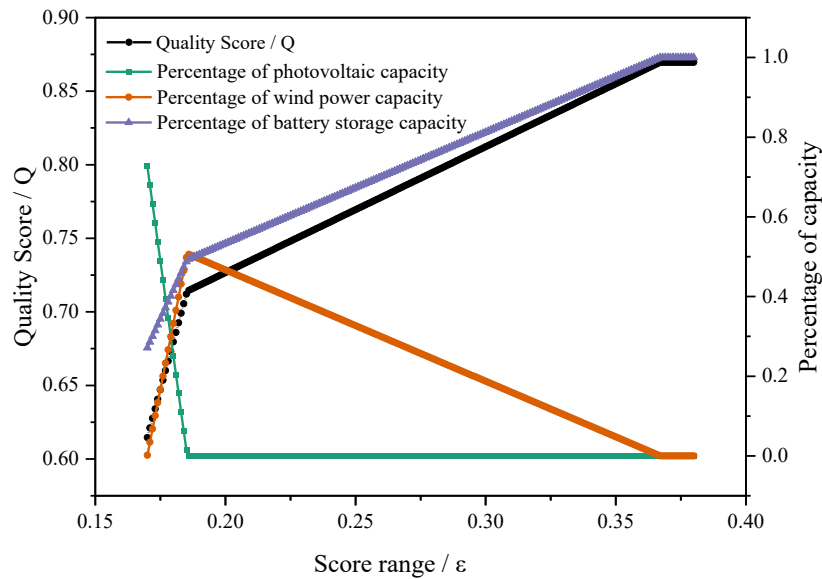


图 2-6 无容量比例限制 VPP 调节质量-评分极差 ( $Q - \varepsilon$ ) 折线图

Fig.2-6 Line chart of VPP regulating quality-score range ( $Q - \varepsilon$ ) without capacity ratio restriction

## 2.7 本章小结

本章内容逻辑结构图如下：

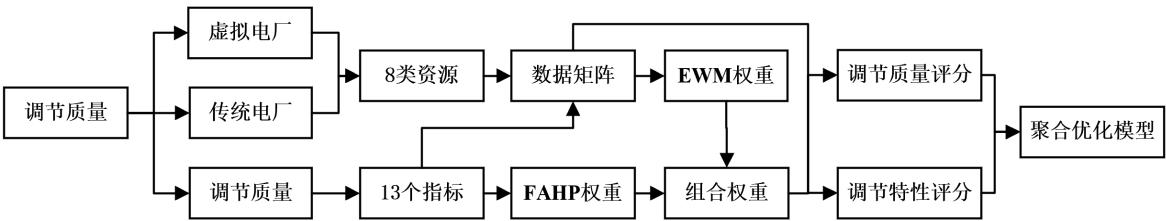


图 2-7 第二章内容逻辑结构图

Fig.2-7 Content logical structure of Chapter 2

本章构建了虚拟电厂和传统电厂的调节质量评价体系。首先，通过对研究对象的拆解，确立 8 类待评价资源，虚拟电厂视为资源的集合，其评分由资源评分按容量加权得到。其次，对调节质量进行解构，采用多维描述、多指标量化的方法刻画调节质量，设立 5 个维度、13 个指标，并给出了指标的计算方法，根据这 13 个指标与 8 类评价对象形成数据矩阵。然后，综合主、客观赋权法，采用 FAHP-EWM 联合赋权法对 13 个指标赋权。之后，考虑到维度权重不同便在同维内归一化计算维度权重，计

算各资源的调节质量并将评分区间化后绘制雷达图。之后，在虚拟电厂资源聚合需求背景下提出聚合优化模型，并分析不同类型资源的选取对调节质量评分的影响。最后，通过一个简单的算例对上述方法进行实操。

### 第三章 计及市场主体调节质量的调峰出清机制

#### 3.1 出清优化的建模

调峰出清数学模型旨在描述电力市场中, 如何通过优化算法确定各调峰机组在各调峰时段的出力, 以满足电力系统调峰需求, 同时保证电力市场的经济性和稳定性。传统调峰出清模型多为以调峰成本最小等经济性目标作为目标函数的单目标优化模型, 本节在其基础上引入调节质量, 并采用一种简单的多目标优化方法构建考虑市场主体调节质量的调峰出清模型。设立两个优化目标: 最小化调峰成本和最大化调节质量, 将最小化调峰成本设为主要目标, 在约束条件中添加调节质量约束。

##### 3.1.1 目标函数

最小化调峰成本:

$$\min \left( \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} s_{k,n,t} C_{k,n,t} P_{n,t} t_0 \right) \quad (3-1)$$

式中,  $T$  为出清时段数目,  $N$  为调峰机组数目,  $K_n$  为调峰机组  $n$  的申报量价段数,  $t_0$  为一个出清时段的时间,  $s_{k,n,t}$ ,  $C_{k,n,t}$  分别为出清时段  $t$  调峰机组  $n$  第  $k$  段申报的中标状态、申报电价,  $P_{n,t}$  为出清时段  $t$  调峰机组  $n$  的申报最大电量。中标状态为  $0 \sim 1$  的实数,  $0$  表示未中标,  $1$  表示全部中标, 中间值表示部分中标。

##### 3.1.2 约束条件

(1) 中标状态约束

$$0 \leq s_{k,n,t} \leq s_{k,n,t}^{\max} \quad (3-2)$$

$$\sum_{k=1}^{K_n} s_{k,n,t}^{\max} = 1 \quad (3-3)$$

$$(s_{k,n,t} - 1)s_{k+1,n,t} = 0 \quad (3-4)$$

式中,  $s_{k,n,t}^{\max}$  为出清时段  $t$  调峰机组  $n$  第  $k$  段申报的中标状态上限值, 由调峰机组设置。所谓中标状态上限, 即调峰机组  $n$  将  $t$  时段申报最大电量切分成  $K_n$  段, 每一段对应一个电价, 第  $k$  段电量占申报最大电量的比例即  $s_{k,n,t}^{\max}$ ,  $s_{k,n,t}$  则为该段电量的中标状态。式

(3-4)约束了相邻中标状态的耦合关系：只有当 $k$ 段电量中标状态为1时， $k+1$ 段电量才能中标。

(2) 需求平衡约束

在每个调峰时段，调峰机组出力之和均等于系统调峰需求：

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} s_{k,n,t} P_{n,t} = D_t \quad (3-5)$$

式中， $D_t$ 为调峰时段 $t$ 的系统调峰需求。

(3) 安全约束

电力优化模型的安全约束主要为机组安全约束和网络安全约束。

调峰机组出力满足区间限制：

$$P_{n,t}^{min} \leq \sum_{k=1}^{K_n} s_{k,n,t} P_{n,t} \leq P_{n,t}^{max} \quad (3-6)$$

式中， $P_{n,t}^{max}, P_{n,t}^{min}$ 分别为调峰时段 $t$ 调峰机组 $n$ 的出力上、下限。

调峰机组出力变化满足爬坡速率限制：

$$R_{n,t}^D \leq s_{k,n,t+1} - s_{k,n,t} \leq R_{n,t}^U \quad (3-7)$$

式中， $R_{n,t}^U, R_{n,t}^D$ 分别为调峰时段 $t$ 调峰机组 $n$ 向上、向下最大爬坡速率。

电力传输线满足线路容量限制：

$$\left| \sum_{n \in G_l} \sum_{k=1}^{K_n} s_{k,n,t} P_{n,t} - \sum_{j \in L_l} D_{j,t} \right| \leq F_l \quad (3-8)$$

式中， $F_l$ 为线路 $l$ 的传输容量， $G_l, L_l$ 分别为连接在线路 $l$ 上的调峰机组、用电设备集合， $D_{j,t}$ 为用电设备 $j$ 在 $t$ 时段的调峰需求。

(4) 调节质量约束

在设置调节质量约束前，先引入调节质量收益和调节质量指数的概念。

调节质量收益 (Regulating Quality Benefit, RQB)，为中标状态、最大申报电量、调节质量的乘积和，其计算式为：

$$qb_t = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} s_{k,n,t} Q_{k,n,t} P_{n,t} \quad (3-9)$$

式中， $qb_t$ 为调峰时段 $t$ 的调节质量收益， $Q_{k,n,t}$ 为调峰时段 $t$ 调峰机组 $n$ 第 $k$ 段申报的资源调节质量。调峰机组在申报原有量、价基础上，额外附加该时段电量的调节质量评

分，即报量、报价、报质。如在光伏大发阶段，内部包含大量光伏机组的虚拟电厂主体申报的质量数据将更接近光伏调节质量评分。

调节质量指数（Regulating Quality Index, RQI），为质量收益与出清电量的比值，用于表征该时段出清电量的调节质量效益，其计算式为：

$$qi_t = \frac{qb_t}{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} s_{k,n,t} P_{n,t}} \quad (3-10)$$

式中， $qi_t$ 为调峰时段 $t$ 的调节质量指数。

调节质量约束设置为调节质量指数不低于设定的下限值：

$$qi_t \geq \varepsilon_t \quad (3-11)$$

式中， $\varepsilon_t$ 为调峰时段 $t$ 的调节质量指数下限。 $\varepsilon_t$ 越高代表调节质量要求越高，调峰出清条件越苛刻，可以预见这种情况下具有高调节质量资源的市场主体将会达到更高的收益水平。

### 3.2 解空间的评价

在进行解空间评价前，先引入调节质量浮动区间和最大调节质量下限的概念。

$N$ 个市场主体，每个市场主体报价 $K_n$ 段， $T$ 个出清时段，共 $S = \sum_{n=1}^N K_n T$ 个中标状态构成出清程序的解空间。由于调节质量约束的存在，并非在任何下限值 $\varepsilon_t$ 下解空间的每个出清时段均有非零解，故需每个时段从 $\varepsilon_t = 0$ 开始，按一定步长提高至 $\varepsilon_t^{max}$ 出现零解，这个使得该时段出清结果非零的 $\varepsilon$ 区间 $[0, \varepsilon_t^{max}]$ 称为该时段的调节质量浮动区间（Regulating Quality Floating Interval, RQFI）， $\varepsilon_t^{max}$ 称为该时段的最大调节质量下限（Maximum Regulating Quality Lower Limit, MRQLL）。 $T$ （出清时段数）个 $\varepsilon_t$ 为一组，解空间与一组 $\varepsilon_t$ 一一对应， $\varepsilon_t$ 从0走到 $\varepsilon_t^{max}$ ，解空间也随之变化，此处每个时段的调节质量浮动区间不一，可以取其交集（即最小的 $\varepsilon_t^{max}$ ）作为整体的调节质量浮动区间，或者步数一致但不同时段设置不同的步长进行遍历。简便起见，之后的处理采用前一种方法。

解空间随 $\varepsilon_t$ 变化而变化，为了对不同的解空间进行对比，需要对解空间进行经济性和质量性评价，此处引入两个指数对其量化：当日经济指数（Daily Economy Index, DEI）和当日质量指数（Daily Quality Index, DQI），其计算式为：

$$DEI = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} s_{k,n,t} C_{k,n,t} P_{n,t}}{\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} s_{k,n,t} P_{n,t}} \quad (3-12)$$

$$DQI = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} s_{k,n,t} Q_{k,n,t} P_{n,t}}{\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} s_{k,n,t} P_{n,t}} \quad (3-13)$$

没有直接采用优化目标函数（调峰成本）作为表征解空间经济性的指标，而是引入了当日经济指数 DEI，是因为其并非单纯地与调峰成本相关，还与出清电量相关，能体现单位电能的经济效益。表征解空间质量性时，同样采用 DQI 而非调节质量收益来体现单位电能的调节质量效益。当日质量指数 DQI 与上文调节质量约束中的调节质量指数  $qi$  在数学含义上类似，但时间尺度不同，DQI 的时间尺度为一天， $qi$  的时间尺度为一个出清时段的时间，其关系并非直接加和。

此外，调峰成本与解空间经济性负相关，DEI 也继承了这一关系，为将 DEI 映射为与解空间经济性正相关的值，此处采用量纲化方法中的逆向化，其计算式为：

$$DEI' = \frac{\max\{\cdot\} - DEI}{\max\{\cdot\} - \min\{\cdot\}} \quad (3-14)$$

式中， $\max\{\cdot\}, \min\{\cdot\}$  分别表示 DEI 数据组（其随  $\varepsilon_t$  组变化）中的最大值和最小值。为保持数学上的对称性，对 DQI 做类似的处理，其计算式为：

$$DQI' = \frac{DQI - \min\{\cdot\}}{\max\{\cdot\} - \min\{\cdot\}} \quad (3-15)$$

DQI 与解空间质量性成正比，故这里采用量纲化方法中的正向化。

由于调峰出清的特殊性，系统调峰需求并不会随着解空间的变化而变化，调峰成本、调节质量收益与 DEI、DQI 之间是相同的倍数关系，量纲化之后直接采用前两者对当日评价来说并无差别，但后两者可用于对比不同日解空间的经济性、质量性，或者用于非固定需求市场的解空间评价，故仍提出这两个指数进行量化与后续分析。

### 3.3 决策点的选取

经过上述数据处理，解空间随最小质量指数的变化以  $DEI' - \varepsilon$ 、 $DQI' - \varepsilon$  图的形式体现出来（此处采用第一种取并集的方法，每时段  $\varepsilon_t$  相同，设为  $\varepsilon$ ）。初始点  $\varepsilon = 0$ ，也可视为不引入质量约束的出清结果，随着  $\varepsilon$  的增加，整体上质量相关量（如质量收益、 $DQI'$ ）将呈现上升趋势，而经济相关量（如调峰成本、 $DEI'$ ）则呈现下降趋势。决策是永恒的多元权衡，此处便是用经济性下降换取质量性上升，理论上不存在最佳决策

点,但引入评判标准后不同决策点之间依旧存在优劣。这里采用一个朴素的评判依据,即相对于初始点 $DQI'$ 上升量与 $DEI'$ 下降量的比值,称其为决策性价比 (Decision Cost Performance, DCP), 其计算式为:

$$DCP = \frac{DQI' - DQI'_0}{DEI'_0 - DEI'} \quad (3-16)$$

式中,  $DEI'_0, DQI'_0$  分别为  $\varepsilon = 0$  时解空间 DEI 和 DQI 的量纲化值。决策性价比的性和价分别代表了解空间的质量性和经济性, DCP 可以视为 DEI 与 DQI 的“兑换”比例。

考虑到所分析数据建立在系统调峰需求预测的基础上,与实时数据存在一定的偏差,所以决策点的选取需要考量对数据波动的敏感性。为处理简便,这里作两个假设:

(a) 实时数据波动整体上服从正态分布; (b) 数据的小幅度波动只会导致  $DEI' - \varepsilon$ 、 $DQI' - \varepsilon$  图的线性偏移。这样便将数据波动映射到  $\varepsilon$  轴上,即处理成对任意已设定的  $\varepsilon$ , 仍能以离散正态分布的概率取到其他  $\varepsilon$  值, 于是可用 DCP 的期望替代 DCP 作为选取决策点的依据, 其计算式为:

$$EDCP(\varepsilon) = \sum_{a=0}^{\infty} [F(-a\varepsilon) - F(-a\varepsilon - \varepsilon)][DCP(\varepsilon - a\varepsilon) + DCP(\varepsilon + a\varepsilon)] \quad (3-17)$$

式中,  $\varepsilon$  为  $\varepsilon$  步长,  $F(x)$  为标准正态分布的分布函数, 均值为 0, 标准差为  $\sigma$ 。采用的离散化方法如下图所示:

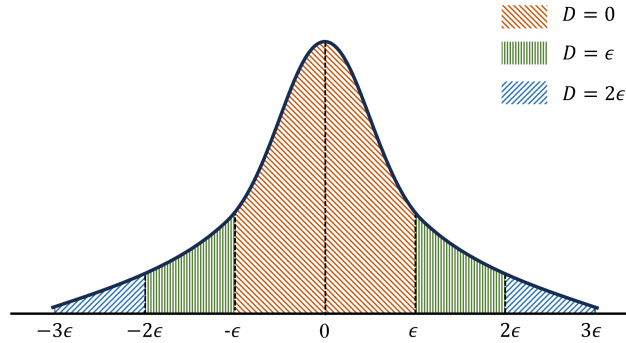


图 3-1 正态分布离散化示意图

Fig.3-1 Diagram of discretization of normal distribution

图中,  $D$  为  $\varepsilon$  取值与中心点的距离, 阴影部分面积为分布概率。

### 3.4 替代效应的分析

VCG (Vickrey–Clarke–Groves) 机制是一种拍卖机制,旨在通过设定适当的激励,确保参与者在报告真实信息时能够获得最大效益,从而解决资源分配问题。其核心为支付规则,每个参与者需要支付的费用等于该参与者对其他参与者所产生的负外部效应,即该参与者参与拍卖前、后其他参与者能获得的最大利益之差,其计算式为:

$$P_i = W - W'_{-i} \quad (3-18)$$

式中,  $P_i$  为参与者  $i$  参与市场需支付的费用,  $W, W'_{-i}$  分别为参与者  $i$  参与市场前、后其他参与者能获得的最大利益,该参与者得到的收益为参与市场后的全体总利益减去其他参与者的利益,再减去需支付的费用,等价于参与市场前、后的市场总收益变化,其计算式为:

$$B_i = W' - W'_{-i} - P_i = W' - W \quad (3-19)$$

式中,  $B_i$  为参与者  $i$  获得的净收益。 $B_i$  体现了参与者  $i$  对市场整体收益的挖掘能力,若计算每个参与者的净收益,  $B_i$  占总净收益的比例越大,则说明参与者在市场中获取收益的能力越强,在一定程度上表征了参与者在市场中的竞争力,可以将其作为参与者市场竞争力的量化方法。

借鉴其思想,称调峰机组参与市场后带来社会福利变化的现象为调峰机组的替代效应 (Substitution Effect, SE),定义调峰机组参与市场后其对社会福利的边际贡献占比为该机组的替代度 (Substitution Degree, SD),所谓社会福利边际贡献即调峰机组带来的调峰成本下降量,所谓替代即本调峰机组变相替代其他调峰机组参与出清而产生在经济、质量上更好的结果。替代度应当是主体的一种利益属性,从侧面反映了主体在市场供需环境中的适应能力,或者说市场对主体的友好程度。调峰机组参与市场后,相较于其他成员,其带来的调峰成本下降量越大,则意味着该机组在市场中具有更高的竞争力和收益水平,也即更高的替代度。

而在调峰机组参与质量申报后,各机组的替代度变化则反映了质量申报对各机组的利好程度。调峰机组替代度上升,说明参与质量申报能够提高该机组在市场中的竞争力,其收益能力得到隐性加强。调峰机组替代度下降,说明参与质量申报将会降低该机组在市场中的竞争力,其收益能力得到隐性削弱。具体来说,即具有高质量资源的调峰机组参与质量申报有利于提高中标量,符合利益诉求。资源质量较低的调峰机组参与质量申报将降低中标量,打击申报积极性。

### 3.5 补偿机制的设计

设置补偿机制可以鼓励各调峰机组积极申报、促进高质量资源消纳。补偿机制包含申报成本（Declared Cost, DC）与结算激励（Settlement Incentive, SI）两部分，其计算式如下：

$$DC_n = f_{DC} + \alpha Q_n \quad (3-20)$$

$$SI_n = f_{SI} + \beta(e^{-\gamma \Delta SD} - 1) \quad (3-21)$$

$f_{DC}, f_{SI}$  分别为申报成本和结算激励中的固定值,  $\alpha, \beta, \gamma$  均为正实数,  $Q_n$  为调峰机组  $n$  的资源质量评分,  $\Delta SD$  为调峰机组参与质量申报后的替代度变化, 其计算式为:

$$\Delta SD = \frac{gc' - gc'_{-i}}{\sum_{n=1}^N (gc' - gc'_{-i})} - \frac{gc - gc_{-i}}{\sum_{n=1}^N (gc - gc_{-i})} \quad (3-22)$$

式中,  $gc, gc_{-i}$  ( $gc', gc'_{-i}$ ) 分别为不考虑 (考虑) 质量约束出清时计算  $N$  调峰机组和去掉调峰机组  $n$  后的调峰成本。补偿机制的设计具有两个特征: 申报成本与调节质量正相关; 结算激励与替代度变化负相关。对于资源质量较低的调峰机组而言, 前者鼓励参与质量申报, 后者补偿替代度上升导致的竞争力损失。故调峰机组  $n$  在参与质量申报后的收益情况为:

$$E_n = E_{MC,n} + SI_n - DC_n \quad (3-23)$$

式中,  $E_{MC,n}$  为调峰机组  $n$  的市场出清收益。相较于单纯地比较质量申报前后的收益升降, 比较替代度升降的方法能够明确地体现主体被掩盖在硬需求下的竞争力变化, 例如在某些情况下, 由于系统调峰需求不变, 机组参与质量申报后其出清结果可能并未发生改变, 但此时相较于具有更高调节质量的机组而言, 该机组的竞争力和出清优先级下降, 反映在替代度上则是替代度上升, 即替代度增量对这种改变进行了量化。

需要额外注意的是, 在去除调峰机组  $n$  后, 调节质量浮动区间将发生变化, 原本能够全部出清的决策点也有可能在此一时段出现零解, 如果在某一出清情形下某时段出现零解, 则在所有模拟出清情形下该时段均不计入调峰成本计算, 在实际调峰出清流程中, 一般会预留裕量以应对少数机组无法达到预期的特殊情况。

### 3.6 算例分析

虚拟一个含有 3 个供应方的调峰市场，每 15 分钟出清一次，计算 24 个出清时段，模拟夏季 6 小时连续用电高峰。此外，为凸显出清模型的核心机制同时减少出清结果的影响因素，对出清模型做如下简化与假设：（a）不额外考虑安全约束；（b）调峰机组只申报一段量价；（c）设 3 个调峰机组分别为火电厂、水电厂、虚拟电厂，采用前章算例中的质量评分数据为均值，以 0.1 为标准差按正态分布生成每时段资源质量评分（实际需按资源发电比例计算）；（d）每个出清时段的最低调节质量指数下限相同。投标数据如下：

表 3-1 投标数据

T	P1	C1	Q1	P2	C2	Q2	P3	C3	Q3	调峰需求
0	90	0.41	0.408	80	0.38	0.663	60	0.35	0.806	65
1	95	0.35	0.538	90	0.38	0.718	74	0.35	0.808	63
2	95	0.36	0.129	85	0.44	0.687	60	0.37	0.610	67
3	90	0.37	0.441	75	0.36	0.584	60	0.37	0.704	79
4	60	0.35	0.386	80	0.39	0.643	60	0.38	0.575	84
5	90	0.36	0.224	75	0.38	0.535	37	0.43	0.585	62
6	105	0.4	0.311	70	0.35	0.703	35	0.41	0.696	150
7	110	0.4	0.389	85	0.36	0.499	65	0.37	0.850	115
8	105	0.4	0.712	60	0.37	0.507	80	0.41	0.620	155
9	100	0.41	0.631	60	0.38	0.533	90	0.39	0.734	140
10	95	0.44	0.220	60	0.36	0.320	70	0.39	0.674	101
11	90	0.49	0.658	60	0.35	0.758	90	0.38	0.808	83
12	90	0.36	0.427	75	0.38	0.647	60	0.38	0.588	85
13	95	0.36	0.348	80	0.38	0.539	60	0.34	0.700	79
14	95	0.4	0.426	85	0.41	0.751	60	0.36	0.752	75
15	90	0.4	0.334	90	0.35	0.443	60	0.38	0.807	125

续表 3-1

T	P1	C1	Q1	P2	C2	Q2	P3	C3	Q3	调峰需求
16	90	0.35	0.342	65	0.35	0.604	80	0.37	0.851	76
17	120	0.36	0.503	65	0.35	0.590	70	0.42	0.705	165
18	115	0.37	0.495	65	0.36	0.646	80	0.4	0.548	140
19	100	0.57	0.496	95	0.4	0.645	75	0.39	0.622	150
20	90	0.35	0.422	65	0.37	0.528	70	0.42	0.591	168
21	105	0.5	0.234	95	0.51	0.611	80	0.38	0.932	89
22	110	0.48	0.426	85	0.39	0.598	60	0.35	0.635	65
23	90	0.37	0.518	75	0.37	0.677	60	0.36	0.772	67

表中， $T$ 为时段， $P_n, C_n, Q_n$ 分别为调峰机组 $n$ 的申报电量、电价、质量。

在不设置调节质量约束时出清结果如下：

表 3-2 出清结果

T	s1	s2	s3	调峰成本	质量收益	质量指数
0	0.000	0.063	1.000	22.9	51.677	0.795
1	0.663	0.000	0.000	22.05	33.887	0.538
2	0.705	0.000	0.000	24.12	8.617	0.129
3	0.044	1.000	0.000	28.48	45.545	0.577
4	1.000	0.000	0.400	30.12	36.990	0.440
5	0.689	0.000	0.000	22.32	13.871	0.224
6	0.762	1.000	0.000	56.5	74.097	0.494
7	0.000	1.000	0.462	41.7	67.947	0.591
8	0.905	1.000	0.000	60.2	98.105	0.633
9	0.000	1.000	0.889	54	90.696	0.648

续表 3-2

T	s1	s2	s3	调峰成本	质量收益	质量指数
10	0.000	1.000	0.586	37.59	46.820	0.464
11	0.000	1.000	0.256	29.74	64.070	0.772
12	0.944	0.000	0.000	30.6	36.298	0.427
13	0.200	0.000	1.000	27.24	48.613	0.615
14	0.158	0.000	1.000	27.6	51.507	0.687
15	0.000	1.000	0.583	44.8	68.102	0.545
16	0.844	0.000	0.000	26.6	25.999	0.342
17	0.833	1.000	0.000	58.75	88.694	0.538
18	0.652	1.000	0.000	51.15	79.147	0.565
19	0.000	0.789	1.000	59.25	95.089	0.634
20	1.000	1.000	0.186	61.01	79.920	0.476
21	0.086	0.000	1.000	34.9	76.643	0.861
22	0.000	0.059	1.000	22.95	41.096	0.632
23	0.078	0.000	1.000	24.19	49.913	0.745

表中， $s_n$ 为调峰机组 $n$ 的中标状态。

引入调节质量约束，即设置 $qi$ 下限 $\varepsilon$ 。共 $7 \times 24$ 个中标状态构成出清程序的解空间，经过测试后得到本算例整体质量浮动区间为 $[0, 0.533]$ ，在此区间内解空间的每个时段均有非零解。设定 $for$ 循环令 $\varepsilon$ 以 0.001 的步长从 0 走到 0.533，运行优化程序，得到解空间当日经济指数 $DEI'$ 和当日质量指数 $DQI'$ 随 $\varepsilon$ 变化的曲线图，同时计算决策性价比 DCP 与决策性价比期望 EDCP 曲线一并展示，图像如下：

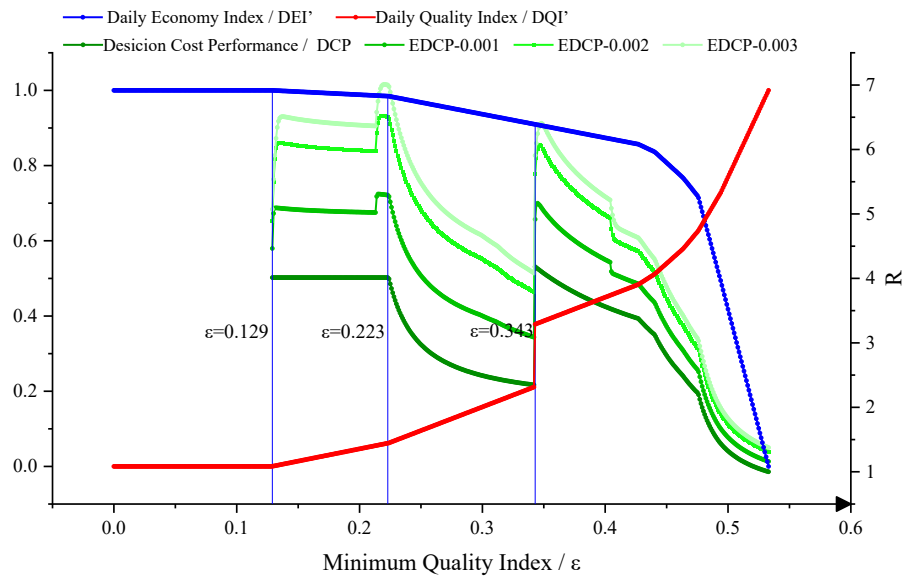


图 3-4 解空间描述量曲线

Fig.3-4 The curve of the description quantity of the solution space

图中 X 轴为最小调节质量指数 $\varepsilon$ 坐标轴，左 Y 轴为解空间 $DEI'$ 、 $DQI'$ 的坐标轴，右 Y 轴为 DCP 与 EDCP 的坐标轴。这里列出了正态分布方差为 0.001、0.002、0.003 的 EDCP 曲线，归纳得到备选决策点区间： $\varepsilon \in [0.213 + 2\sigma, 0.223]$ ， $\sigma$ 为正态分布方差。

以 $\varepsilon = 0.223$ 为例，重新进行出清，结果如下：

表 3-3 调节质量指数下限为 0.223 时的出清结果

T	s1	s2	s3	调峰成本	质量收益	质量指数
0	0.000	0.063	1.000	22.900	51.677	0.795
1	0.663	0.000	0.000	22.050	33.887	0.538
2	0.567	0.000	0.219	24.251	14.941	0.223
3	0.044	1.000	0.000	28.480	45.545	0.577
4	1.000	0.000	0.400	30.120	36.990	0.440
5	0.689	0.000	0.000	22.320	13.871	0.224
6	0.762	1.000	0.000	56.500	74.097	0.494

续表 3-3

T	s1	s2	s3	调峰成本	质量收益	质量指数
7	0.000	1.000	0.462	41.700	67.947	0.591
8	0.905	1.000	0.000	60.200	98.105	0.633
9	0.000	1.000	0.889	54.000	90.696	0.648
10	0.000	1.000	0.586	37.590	46.820	0.464
11	0.000	1.000	0.256	29.740	64.070	0.772
12	0.944	0.000	0.000	30.600	36.298	0.427
13	0.200	0.000	1.000	27.240	48.613	0.615
14	0.158	0.000	1.000	27.600	51.507	0.687
15	0.000	1.000	0.583	44.800	68.102	0.545
16	0.844	0.000	0.000	26.600	25.999	0.342
17	0.833	1.000	0.000	58.750	88.694	0.538
18	0.652	1.000	0.000	51.150	79.147	0.565
19	0.000	0.789	1.000	59.250	95.089	0.634
20	1.000	1.000	0.186	61.010	79.920	0.476
21	0.086	0.000	1.000	34.900	76.643	0.861
22	0.000	0.059	1.000	22.950	41.096	0.632
23	0.078	0.000	1.000	24.190	49.913	0.745

相对于初始点 $\varepsilon = 0$ （也可视为不引入质量约束），调峰成本上升 0.15%，质量收益上升 0.51%，是一个良好的决策点。对比两次出清结果，机组 1 调峰电量下降 1.447%，收益下降 1.418%；机组 2 调峰电量与收益均不变；机组 3 调峰电量上升 1.873%，收益上升 1.867%。反映在替代度变化上，机组 1 和机组 2 替代度下降，机组 3 替代度上升。具体数据对比如表 3-4 所示。这里调峰机组 2 收益不变，但替代度增加，反映的是在引入质量约束后其市场中的竞争力相较于调峰机组 3 下降，但由于调峰需求

不变，其调峰出清量依旧维持原有水平。关于补偿机制，设置申报成本固定值为 3，系数为 7；结算激励固定值为 8，系数为 5，130，补偿结果如表 3-5 所示。

表 3-4 两次出清结果数据对比

对比项目	$\varepsilon = 0$			$\varepsilon = 0.223$		
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 1	机组 2	机组 3
调峰电量/kW	907	840	701	894	840	714
机组收益/元	333.350	305.25	260.160	328.624	305.25	265.017
社会福利边际贡献/元	9.230	28.600	36.120	9.099	28.600	36.895
替代度	0.1248	0.3867	0.4884	0.1220	0.3834	0.4946

表 3-5 补偿机制

项目	调峰机组 1	调峰机组 2	调峰机组 3
资源调节质量	0.3545	0.6141	0.6967
替代度变化	-0.0028	-0.0033	0.0062
申报成本/元	4.784	7.299	7.877
结算激励/元	10.230	10.717	5.240
收益变化/元	0.720	3.418	2.221

### 3.7 本章小结

本章内容逻辑结构图如下：

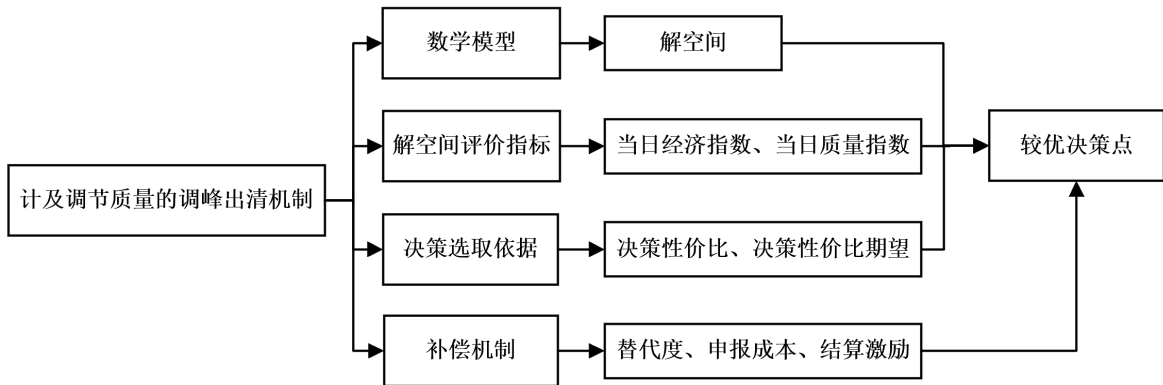


图 3-6 第三章内容逻辑结构图

Fig.3-6 Content logical structure of Chapter 3

本章设计了考虑市场主体调节特性的调峰市场出清机制。首先，构建数学模型，考虑最小化调峰成本和最大化质量评分两个优化目标，设定最小化调峰成本为主要目标函数，在约束条件中加入质量约束。然后，提出了两个指标 DEI 和 DQI 用于解空间的经济性、质量性评价。之后，提出了决策性价比的概念用以辅助确定决策点。之后，引入替代度的概念，并提出了包括申报成本和结算激励两部分的补偿机制，以鼓励各主体积极申报、促进高质量资源消纳。最后，通过一个算例分析，虚拟了一个含有 3 调峰机组的简单调峰市场，展示了在不同质量约束下的出清结果，并分析了补偿机制对调峰机组收益的影响。本章为电力市场中的资源分配和质量评估提供了新的视角和方法。

## 第四章 面向虚拟电厂集群的电网调度框架

### 4.1 虚拟电厂的差异化

主体差异化之于集群管理的意义，更宏观来说，即个性之于集体的意义。在某种程度上，个性代表着生命力，有个性的个体才是有生命力的个体，由这样的个体组成的集体才是有生命力的集体，这种生命力体现在资源的优化配置、成员间的互补协作以及集体对环境的适应力上。

基于主体差异化的思想，虚拟电厂可以依据聚合方式或所聚合资源的类型进行区分，这里将虚拟电厂分为综合型虚拟电厂和特征型虚拟电厂。借由第二章提出的资源聚合优化模型，综合型虚拟电厂（Comprehensive Virtual Power Plant, CVPP），即以最大化调节质量为目标聚合而成的虚拟电厂。特征型虚拟电厂（Specialized Virtual Power Plant, SVPP），即以最大化某一调节特性为目标，或者针对某一类特性相似的分布式资源进行聚合而成的虚拟电厂，包括但不限于灵活型、可靠型、稳定型、经济型、环保型、负荷型虚拟电厂等。

对虚拟电厂进行特征分类，本质上是在确定不同需求场景下的调度优先级。综合型虚拟电厂作为“多面手”，可以适应大部分调度场景，以最大化调节质量为目标聚合而成使得综合型虚拟电厂具有全面且均衡发展的调节特性，在大部分场合中均能提供较优的调节质量。特征型虚拟电厂作为“专精手”，在特定调度场景中能发挥优秀表现，其本身也可以作为电网调度决策的偏好抓手，例如在满足基本调度需求的情况下，若电网调度中心偏好出清更多的绿色电力，那么可以给环保型虚拟电厂分配更多的调度任务；若偏好更可靠、稳定地满足调度需求，则可以分配更多调度任务给可靠型或稳定型虚拟电厂；若无特殊偏好，仅希望整体上达到更好的调节质量，则可以多分配调度任务给综合型虚拟电厂。

不难发现，对虚拟电厂进行分类能够提升电网调度的灵活性，丰富电网调度生态，提高电网整体结构对于多样化调度需求的适应能力，在一定程度上也提高了电网的鲁棒性。其实虚拟电厂与传统电厂的划分也是主体差异化的一种体现，正是差异化不断推动着电力系统的变革。

## 4.2 虚拟电厂集群的组织架构

产业集群效应 (Industrial Cluster Effect, ICE), 指在某一特定地理区域内, 同一产业或相关产业的大量企业以及相关支撑机构, 如服务提供商、研究机构等高度聚集, 并通过紧密的分工协作和信息、资源共享, 形成的一种网络化产业组织形式。这种聚集现象通常会带来显著的经济效益和竞争优势, 从而提高整个区域产业的竞争力。受惠于现代发达的信息传输技术以及虚拟公共设施的属性, 虚拟电厂可以突破地理区域的限制而在虚拟空间进行集群, 具有一定规模、数量, 且特性各异的虚拟电厂共同参与调度而构成的有机整体便称为虚拟电厂集群 (Virtual Power Plant Cluster, VPPC), 虽然虚拟电厂间并非相互支撑的关系, 但其各有所长、互动协作, 整体表现出的集群特性是动态且富有弹性的。

虚拟电厂集群由一个统一的云端平台进行调度, 称其为集群管理员 (Cluster Manager, CM), 其代理一定规模的虚拟电厂或以非虚拟电厂形式加入的分布式资源。集群管理员的主要工作清单如下:

- (1) 对隶属于本集群的虚拟电厂或分布式资源的参数进行收集与存储;
- (2) 对虚拟电厂成员进行调节特性评价, 确定虚拟电厂类型;
- (3) 对分布式资源进行综合型或特征型聚合, 建立虚拟电厂;
- (4) 考虑偏好, 对电网调度任务进行优化分配, 确定各成员调度计划;
- (5) 收集运行数据, 重新评估各成员参数特性并优化虚拟电厂类型分布;
- (6) 综合考量成员贡献度与虚假申报惩罚, 进行收益分配;
- (7) 公布收益分配情况, 鼓励成员准确申报, 并吸引新成员加入。

关于上述清单中的调度优化部分, 分布式资源集群<sup>1</sup>管理有三种常见的调度方式, 一是集中式调度策略, 只运行一个全局的中央调度器, 统一分配任务, 逻辑简单但可扩展性以及并发性较差, 一般用于小规模集群系统; 二是两级调度策略, 运行中央调度器和框架调度器, 前者进行粗粒度调度且能拥有全局视野, 后者进行细粒度调度且只能看到所分配资源的执行状态, 这种策略相较于集中式调度有更好的并发性与可扩展性; 三是状态共享调度策略, 只运行框架调度器, 所有框架调度器均能看到全局资源状况, 互相竞争获取资源, 这种策略具有最好的并发性与可扩展性, 但是有可能出现任务“饿死”或系统“死锁”的情况, “饿死”指任务一直处于等待执行状态, 无法获得执行所需最少资源量; “死锁”指调度系统崩溃停滞, 多任务互相等待对方释

<sup>1</sup> 这里的“分布式”修饰“资源集群”, 即“分布式的资源集群”, 并非“分布式资源的集群”。

放资源。在虚拟电厂集群管理中，中央调度器即集群管理员，框架调度器为不同类型虚拟电厂的小集群，如综合型虚拟电厂群、负荷型虚拟电厂群等。同时，在不同的时间尺度下，集群管理平台可以采取不同的调度策略，以适应不同场景的需要。在日前尺度下，虚拟电厂集群可以采用两级调度策略，由集群管理员统一对调度需求进行分配，实现整体调度最优；而在日内、实时尺度下，虚拟电厂集群可以采用共享状态调度策略，其与两级调度策略的最大区别在于共享状态调度策略在优化流程中去掉了中央调度器，能最大程度地释放集群的灵活优势，满足实时平衡需求，同时集群管理员也并非完全边缘化，尽管不参与调度优化流程，仍实时监控整个集群的资源状态，在出现任务“饿死”或“死锁”情况时具有强制调度权。

#### 4.3 电网调度框架

电网调度框架分为云、群、端三层。

“端”层级为资源终端，可分为两大类：分布式资源与集中式资源，分布式资源即熟知的分布在用户端的可利用能源综合系统，集中式资源即通过自然或人为聚集在一起，进行大规模发电作业的资源。

“群”层级为虚拟空间集群形式，包含虚拟电厂集群和传统电厂群两大类，分布式资源通过聚合形成不同类型的虚拟电厂，各类虚拟电厂以集群形式参与调度；所谓传统电厂群，即传统电厂单位的集合，为一种调度主体组织形式，与虚拟电厂集群对应。

“云”层级为存储、计算、优化综合的数据处理平台，分为两个子平台：集群管理平台和综合调度平台，后者进行群端所有调度主体的优化，其中关于虚拟电厂集群的优化经由集群管理平台进行。建立集群管理平台的直接影响即综合调度平台并不直接管理虚拟电厂集群，将调节资源不确定性对调度行为的影响限制在虚拟电厂群内，同时避免云端平台进行优化计算时的“维数灾难”问题，对于用户端来说也保护了隐私信息，提高参与意愿。

电网调度框架如图 4-1 所示。

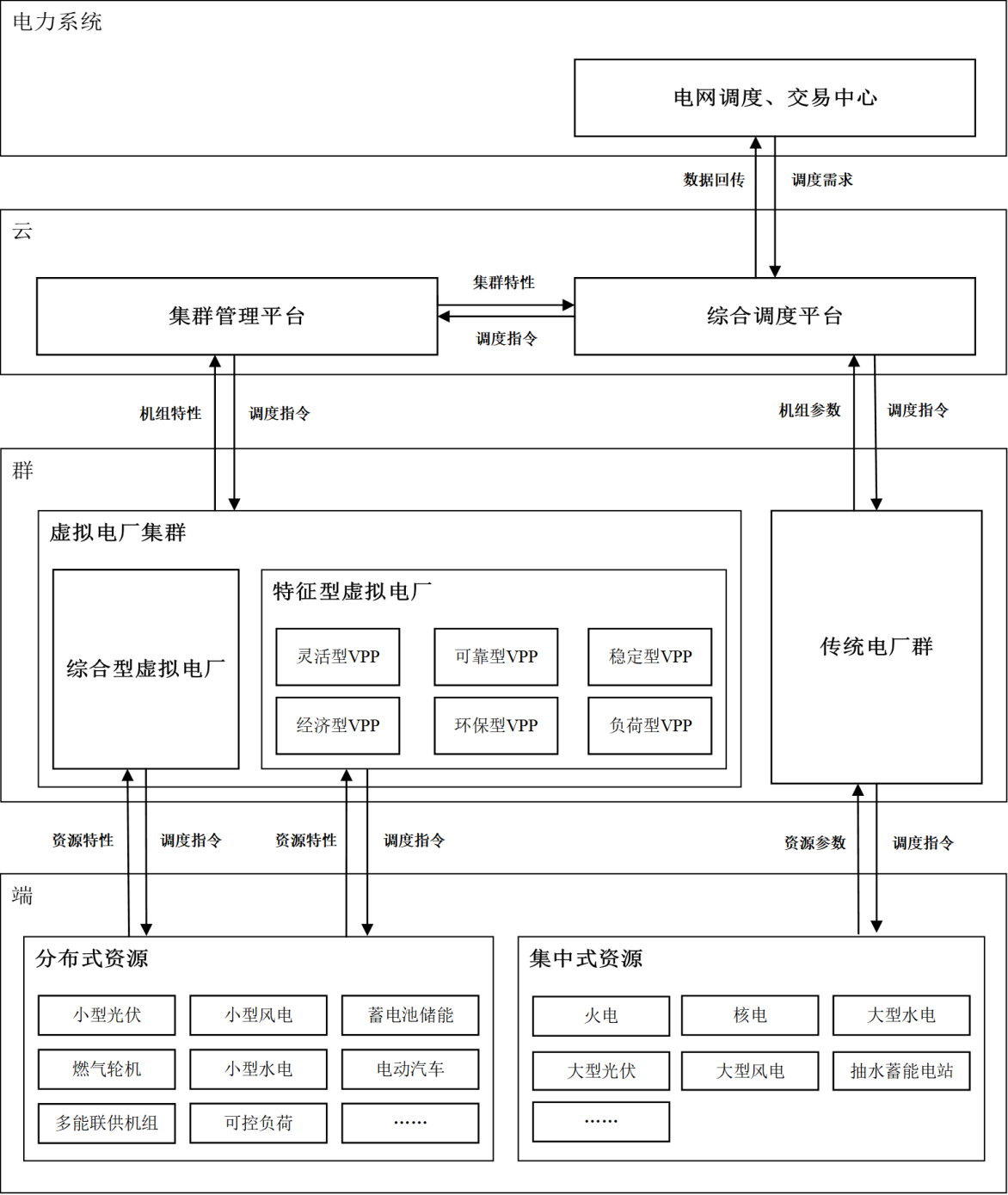


图 4-1 面向虚拟电厂集群的电网调度框架

Fig.4-1 Grid scheduling framework for virtual power plant cluster

#### 4.4 本章小结

本章构建了面向虚拟电厂集群的电网调度框架。首先，基于主体差异化的思想，对虚拟电厂进行分类，提出了综合型虚拟电厂与特征型虚拟电厂的概念；然后，从分布式资源集群的调度策略出发，建立了虚拟电厂集群的组织架构与不同时间尺度下的调度策略；最后，在前述章节的理论基础上，建立了纳入虚拟电厂集群特征的云-群-端电网调度框架。

## 第五章 全文总结

### 5.1 主要成果

本文提出了调节质量、调节特性的概念，通过设立可量化指标与指标赋权，建立了虚拟电厂与传统电厂调节质量评价体系，用雷达图的形式具象化两者的调节特性差异，并进一步得到虚拟电厂资源聚合优化模型，分析了聚合不同类型资源对虚拟电厂调节质量的影响；本文将市场主体的调节质量引入调峰出清模型，提出了出清结果经济性与质量性的评价指标，并在此基础上进一步提出权衡两个指标的决策依据，分析参与质量申报后市场主体的竞争力变化提出替代度的概念，并基于此提出激励各方积极申报的补偿机制；本文基于主体差异化的思想，提出将虚拟电厂区分为综合型虚拟电厂与特征型虚拟电厂，由分布式资源管理理论，提出虚拟电厂集群的组织架构，最终构建了面向虚拟电厂集群的电网调度框架。

### 5.2 研究展望

本文第二章中，研究对象的拆解，以及指标的选取与量化方法的科学性有待提高，作为整个研究的基础，科学、合理、全面地分解对象与选取指标至关重要；本文第二章、第三章中，聚合优化模型与调峰出清模型均为多目标优化，简单地采用了多目标优化中的主要目标法，更深入的研究可以采用更复杂的算法，如遗传算法、粒子群算法等，此外，这两章用于分析的算例也较为简单，更贴合实际、更复杂的算例能提高理论的说服力；本文第三章中，补偿机制设计的核心在于补偿的思想，具体计算式只是设计了两个符合补偿思想的简单函数式，而且没有考虑收支平衡，更深入的研究可以采用更科学、合理的补偿算法；本文第四章中，虚拟电厂集群组织架构以及调度框架的细节有待完善，仍存在很多未考虑的地方，同时，缺少算例分析对主体差异化的有效性进行验证。

以上为本文作者已经意识到的问题，有待后来者继续在这一方向进行更深入的研究与探讨，作者水平有限，希望本文的工作与提出的思想方法对之后的研究有所帮助。

## 参考文献

- [1] 艾芊. 虚拟电厂——能源互联网的终极组态[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] 袁典, 金旭, 钱涛, 等. 主动配电网优化调度场景下的变频空调负荷聚合外特性研究[J]. 东北电力大学学报, 2024, 44: 109-119.
- [3] J Wang, Q Wang, Z Jiao, et al. A Demand Response Scheme Based on Electric Vehicle Aggregation Model[C]//2023 3rd International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT). 2023: 570-575.
- [4] 蒋玮, 单沫文, 邓一帆, 等. 虚拟电厂聚合电动汽车参与碳市场的优化调度策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42: 13-22+240.
- [5] 吕鸣阳, 陈衡, 马瑞, 等. 虚拟电厂内多台小规模火电机组与储能聚合分析及出力优化[J]. 河北电力技术, 2023, 42: 20-25+32.
- [6] S Mondal, A M Azmain, L Mollah, et al. Aggregation of Distributed Energy Resources to Form a Virtual Power Plant[C]//2022 12th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE). 2022: 160-163.
- [7] S Bannavikarn, N Hoonchareon. Solar Power Aggregation Framework for Virtual Power Plant's Energy Trading[C]//2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI). 2021: 45-48.
- [8] 刘志凯, 余绍峰, 刘华, 等. 支撑规模化可再生能源高效聚合的虚拟电厂运行方法研究[J]. 可再生能源, 2024, 42: 215-222.
- [9] M Li, M Zhenyu, Z Wenli, et al. Optimization of Virtual Power Plant Aggregation Strategy Considering Adjustable Load Characteristics[C]//2023 5th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET). 2023: 953-959.
- [10] 陈雨鸽, 陈昌铭, 张思, 等. 考虑时空耦合的小水电富集型虚拟电厂优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46: 90-98.
- [11] 王明月, 刘东, 魏力鹏, 等. 电动汽车参与虚拟电厂优化调控的状态推演策略研究[J]. 供用电, 2024, 41: 14-25+41.
- [12] 税纪钧, 彭道刚, 宋炎侃, 等. 计及风光不确定性含碳排放和碳惩罚的虚拟电厂优化调度策略[J]. 系统仿真学报, 2024, 36: 305-319.
- [13] H Zhang, D Li, Z Tian, et al. A Short-Term Photovoltaic Power Output Prediction for Virtual Plant Peak Regulation Based on K-means Clustering and Improved BP Neural Network[C]//2021 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE). 2021: 241-244.
- [14] C Xiao, D Jiang, B Shu, et al. Hierarchical Data-Driven Optimization Scheme Compatible with the Conception of Solid-State Power Substation for Real-time VPP Management[C]//2023 IEEE International Conference on Energy Technologies for Future Grids (ETFG). 2023: 1-6.
- [15] 鲁肖龙, 潘淼, 鞠立伟, 等. 考虑碳捕集和电转气的热电联合虚拟电厂调度优化模型[J]. 电力建设, 2023, 44: 107-117.

- [16] 梁燕, 宋巍, 王尧, 等. 基于改进模糊均衡策略的碳循环虚拟电厂多目标鲁棒随机调度优化模型[J]. 电力建设, 2023, 44: 82-94.
- [17] 郝建红, 黄婷, 许秋铭, 等. 含多供能商的虚拟电厂多目标优化调度策略[J]. 供用电, 2023, 40: 32-42.
- [18] 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: 933-944.
- [19] 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: 37-45.
- [20] 王思远, 吴文传. 灵活性资源聚合参考模型与量化指标体系[J]. 电力系统自动化, 2024, 48: 1-9.
- [21] 蒋正威, 张锋明, 胡凤桐, 等. 虚拟电厂分布式资源的聚合响应能力评估方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41: 39-49.
- [22] C Mihaela, C Mircea, D Daniel. Smart Hub Electric Energy Data Aggregation Platform for Prosumers Grid Integration[C]//2021 9th International Conference on Modern Power Systems (MPS). 2021: 1-7.
- [23] 卜心明, 白烨, 张亮, 等. 考虑多不确定性的多能虚拟电厂运行优化[J]. 区域供热, 2023: 46-53+64.
- [24] 包哲, 李薇, 张潇方, 等. 计及“源荷”双侧多重不确定性的虚拟电厂运行优化研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43: 1665-1674.
- [25] 潘明杰, 解大, 王西田. 计及分布式资源调节特性差异的虚拟电厂响应策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46: 108-117.
- [26] Y Li, H Cheng, Z Lin, et al. Multi-objective Optimization Scheduling Problem of VPP on Generation Side and Demand Side based on Time-of-use Electricity Price[C]//2022 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT). 2022: 494-498.
- [27] 许泽凯, 刘墨, 和敬涵, 等. 新型配电网多虚拟电厂分布式资源聚合与聚合体优化运行方法[J]. 高电压技术, 2024, 50: 105-116.
- [28] 陈会来, 张海波, 王兆霖. 不同类型虚拟电厂市场及调度特性参数聚合算法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43: 15-28.
- [29] H Zhao, X Wang, B Wang, et al. A Multi Time-Scale Robust Aggregation Model for Virtual Power Plant Based on Rolling Correction[C]//2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2022: 2574-2579.
- [30] X Liu, X Lin, T Huang, et al. Optimal Aggregation Method of a Virtual Power Plant Based on a Nash-Stackelberg Game[C]//2023 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). 2023: 1-6.
- [31] 王芬, 李志勇, 邵洁, 等. 虚拟电厂自组织聚合运行调度方法[J]. 电力建设, 2021, 42: 79-88.
- [32] N Wang, X Kong, G Li, et al. Dynamic Aggregation Response Strategy of Adjustable Resources of Virtual Power Plants in Power Grid Balance Adjustment Scenario[C]//2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2022: 1-6.

- [33] J Xiang, Q Zheng. A Method for Measuring Network Channel Delay for Virtual Power Plant Aggregation Control[C]//2023 IEEE 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC): Vol. 11. 2023: 1505-1508.
- [34] 王宣元, 高洪超, 张浩, 等. 面向新型电力系统的灵活资源聚合技术应用场景分析及建设启示[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24: 73-80.
- [35] 云秋晨, 田立亭, 齐宁, 等. 基于投资组合理论的虚拟电厂资源优化组合方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46: 146-154.
- [36] 唐家俊, 吴晓刚, 张思, 等. 基于 Gale-Shapley 算法的虚拟电厂与分布式资源匹配机制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46: 65-73.
- [37] 蔡光宗, 王伊晓, 袁智强, 等. 基于一致性算法的虚拟电厂调度指令动态跟踪策略[J]. 电力建设, 2024, 45: 71-79.
- [38] A H Gholami, A A Suratgar, M B Menhaj, et al. Decentralized Optimization in Scheduling Virtual Power Plant (VPP)[C]//2023 31st International Conference on Electrical Engineering (ICEE). 2023: 1-6.
- [39] 范帅, 何光宇, 郑湘明, 等. 基于在线分布式优化的虚拟电厂自趋优运行方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43: 4935-4950.
- [40] 陈泽, 左晓军, 侯波涛, 等. 基于云服务的虚拟电厂优化调度与隐私保护[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21: 13-20.
- [41] 陈张宇, 刘东, 刘浩文, 等. 基于精细化需求响应的虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45: 2542-2550.
- [42] Y Zhao, K Dong, L Chen, et al. Optimal Dispatching Considering the Participation of Flexible Resources on the Load Side in Deep Peak Regulation Market[C]//2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). 2023: 2166-2171.
- [43] H Shahinzadeh, J Moradi, Z Pourmirza, et al. Optimal Operation of Distributed Flexible Generation Sources Incorporating VPP Framework in Market Environment Considering Uncertainties[C]//2022 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC). 2022: 1-5.
- [44] K De, A Q H Badar. Virtual Power Plant Profit Maximization in Day Ahead Market using Different Evolutionary Optimization Techniques[C]//2022 4th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE). 2022: 1-6.
- [45] 徐康轩, 郭超, 包铭磊, 等. 市场环境下考虑多元不确定性的热电联合虚拟电厂竞标策略[J]. 电网技术, 2022, 46: 3354-3365.
- [46] X Yang, X Zhang, C Zhou. Optimization Operation Strategy of Distributed Energy Aggregator in VPP[C]//2023 7th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC). 2023: 653-658.
- [47] Y Ma, Y Chen, J Tang, et al. Optimal Operational Strategy of Virtual Power Plant Considering the Participation in the Joint Markets of the Electricity Spot and Auxiliary Service Market[C]//2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE). 2023: 1586-1590.
- [48] X Liu, Y Xing, X Li. Analysis of Virtual Power Plant Technology and Participation Mechanism in the Electricity Market[C]//2023 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). 2023: 1-6.

- [49] K Dong, Y Zhao, L Chen, et al. A Co-Optimization Method and Mechanism for Day-Ahead Energy Market and Reserve Market Considering VPP Participation[C]//2023 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC). 2023: 836-841.
- [50] P Shinde, I Kouveliotis-Lysikatos, M Amelin. Cross-border Trading Model for a Risk-averse VPP in the Continuous Intraday Electricity Market[C]//2022 18th International Conference on the European Energy Market (EEM). 2022: 1-6.
- [51] 田君豪, 张鸿宇, 王宇. 新型灵活性资源市场机制研究——面向高比例可再生能源系统[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2023, 25: 53-60.
- [52] 高洪超, 王宣元, 邱小燕, 等. 新型电力系统环境下的虚拟电厂辅助调峰市场机制及其商业模式设计[J]. 太阳能学报, 2023, 44: 376-385.
- [53] 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: 37-56.
- [54] 李孟阳, 李国杰, 汪可友, 等. 考虑需求响应及调频性能变化的虚拟电厂日前投标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51: 13-25.
- [55] 高洪超, 陈启鑫, 金泰, 等. 考虑虚拟电厂灵活调节特性的现货市场出清模型及灵活性溢价评估方法[J]. 电网技术, 2023, 47: 194-207.
- [56] M M Henao, J E Oviedo, I I Milan. Bidding Strategy for VPP Incorporating Price Market and Solar Generation Uncertainties using Information Gap Decision Theory[C]//2021 9th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid). 2021: 143-148.
- [57] M R Equabal, V Lokesh, A Q H Badar. Demand Response Management in Day Ahead Market for Optimal Energy Trading in VPP Framework using PSO[C]//2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET). 2021: 1-6.
- [58] C Peng, Y He, H Gu, et al. Dominance Constraints for Risk Control of a VPP's Optimal Bidding Strategy[J]. IEEE Access, 2024, 12: 59122-59133.
- [59] 樊伟, 范英, 谭忠富, 等. 基于多层利益共享的虚拟电厂参与电碳市场分布鲁棒优化模型[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44: 661-683.
- [60] 王伟韬, 王旭, 蒋传文, 等. 考虑夏普比率的虚拟电厂日前投标策略[J]. 电网技术, 2023, 47: 1512-1523.
- [61] 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: 1-13.
- [62] G Mohy-ud-din, K M Muttaqi, D Sutanto. A Cooperative Energy Transaction Model for VPP Integrated Renewable Energy Hubs in Deregulated Electricity Markets[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(6): 7776-7791.
- [63] M F Dehghanniri, M A Golkar, F G Olanlari. Power exchanging of a VPP with its neighboring VPPs and participating in Day-ahead and spinning reserve markets[C]//2022 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). 2022: 336-340.
- [64] 张叶青, 陈文彬, 徐律军, 等. 面向多虚拟电厂的分层分区多层互补动态聚合调控策略[J]. 发电技术, 2024, 45: 162-169.
- [65] 刘思源, 艾芊, 郑建平, 等. 多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38: 753-761.

- [66] 赵宇轩, 宋伟峰, 李伟康, 等. 考虑共享储能容量配置的多虚拟电厂优化运行方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40: 92-101.
- [67] 刘方, 徐耀杰, 杨秀, 等. 考虑电能交互共享的虚拟电厂集群多时间尺度协调运行策略[J]. 电网技术, 2022, 46: 642-656.
- [68] 张书涵, 艾芊, 李晓露, 等. 适用于多虚拟电厂交易的改进拜占庭容错算法共识机制[J]. 中国电力, 2024, 57: 71-81+157.
- [69] 李翔宇, 赵冬梅. 分散架构下多虚拟电厂分布式协同优化调度[J]. 电工技术学报, 2023, 38: 1852-1863.
- [70] 徐慧慧, 田云飞, 赵宇洋, 等. 考虑绿证-碳交易的多虚拟电厂混合博弈优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52: 1-7+16.
- [71] 谢宏伟, 严强, 李扬, 等. 市场模式下兼顾区域负荷特性的多虚拟电厂分布式协调优化[J]. 电力自动化设备, 2023, 43: 199-209.
- [72] 宋嘉启, 杨永标, 徐青山, 等. 多虚拟电厂参与日前电力市场的鲁棒竞标博弈方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43: 77-85.
- [73] 董雷, 涂淑琴, 李烨, 等. 基于元模型优化算法的主从博弈多虚拟电厂动态定价和能量管理[J]. 电网技术, 2020, 44: 973-983.
- [74] 韩逸飞. 在构建新型电力系统背景下——电网调度该如何优化[N]. 中国能源报, 2021-12-20.

# **RESEARCH ON GRID SCHEDULING MECHANISM DESIGN FOR VIRTUAL POWER PLANT CLUSTER**

As an aggregation of various distributed resources, Virtual Power Plants (VPPs) are often compared to conventional Power Plants. However, such comparisons usually remain superficial. Can we further quantify the differences between the two? In previous studies on feature identification and resource aggregation of VPPs, the external characteristic differences between VPPs and conventional Power Plants were often described qualitatively. This description may be suitable for subjects with significantly different resource types but may not be accurate enough for subjects with similar resource types. As the differences among VPPs become increasingly significant, the differentiation of external characteristics will become indispensable in the refinement of grid scheduling decisions.

Based on the need for differentiation among subjects and focusing on the regulating quality of the subjects, this paper deconstructs regulating quality from five dimensions: flexibility, reliability, stability, economy, and environmental protection. These five dimensions also represent five types of regulatory characteristics. Then, several quantifiable indicators are established under each dimension, and each indicator is weighted using a combination of fuzzy analytic hierarchy process and entropy weight method. Finally, a multi-dimensional and multi-indicator comprehensive evaluation system for the regulating quality of VPPs and conventional Power Plants is constructed. The differences in regulatory characteristics between VPPs and conventional Power Plants are visually represented through radar charts.

Additionally, based on the evaluation of the regulating quality of various resources, an optimization model for distributed resource aggregation in VPPs is established with the goal of maximizing regulating quality. This optimization model lays a theoretical foundation for subsequent differentiation analysis among subjects.

Regulating quality and regulatory characteristics can be used not only to distinguish between VPPs and conventional Power Plants but also to differentiate among various VPPs.

As a subject attribute, it is natural to wonder how this new parameter of regulating quality will affect market clearing. In previous studies on VPP participation in grid scheduling, incentive mechanism design primarily focused on external incentives. When VPP-like entities with high regulating quality participate in the market, incorporating the regulating quality parameter of market entities into the clearing model can increase the clearing transaction volume and revenue level of high-quality resource entities such as VPPs. This aligns with their interest demands and internally motivates them to actively participate in market declarations, promoting the consumption of high-quality resources.

Based on the concept of internal incentives and promoting consumption, this paper takes the power system peaking market as an example to improve the traditional peaking market clearing model. By incorporating the regulating quality parameters of market entities, the traditional single-objective optimization problem with economic optimization as the goal is transformed into a multi-objective optimization problem with both economic and quality objectives. Quantitative indicators for the economy and quality of the clearing results under different quality constraints are then proposed. As the economy of the clearing results inevitably decreases as the quality increases, selecting the appropriate quality constraint becomes a trade-off issue. A decision point selection basis is proposed based on the degree of change between the two.

Furthermore, after market entities participate in quality declarations, compared to the original market, if their revenue increases, they will be more willing to participate in the project. However, if their revenue decreases, it may discourage their enthusiasm for declarations. Therefore, starting from the VCG mechanism, this paper quantifies the changes in unit competitiveness after participating in quality declarations and proposes the concept of substitution degree. Based on the substitution degree, a compensation mechanism that appropriately balances revenue and motivates entities to participate in quality declarations is designed.

In a cluster of Virtual Power Plants (VPPs), an effective differentiation mechanism is crucial for improving overall efficiency and leveraging individual strengths. So, can this organizational form, which includes multiple VPPs, effectively differentiate between internal members? Previous studies on multi-VPPs or VPP cluster have focused on internal or multi-agent games. However, from the grid perspective, there has been relatively little

research on how to schedule these entities. While meeting basic scheduling requirements, the preferences of grid scheduling are reflected in the selection of various scheduling schemes when faced with scheduling entities with different characteristics. This is inseparable from an effective cluster management system.

Based on the idea of cluster management and the traditional cloud-group-end scheduling architecture, this paper introduces the concepts of comprehensive VPPs and Specialized VPPs, building upon the aggregating optimization model mentioned earlier. Comprehensive VPPs aim to maximize regulating quality through resource aggregation, while specialized VPPs target the maximization of specific regulatory characteristics or aggregate similar resource types, such as flexible VPPs or load-based VPPs. Leveraging distributed resource cluster management theory, a cluster organizational structure is established, with varying scheduling strategies across different time scales: day-ahead, intra-day, and real-time. Subsequently, a cloud management platform for the VPP cluster is proposed, incorporating cluster characteristics, ultimately constructing a grid scheduling framework tailored to the VPP cluster.

In summary, the entire text uses "subject differentiation" as a clue to gradually build a grid scheduling framework for VPP cluster. Subject differentiation refers to the process of quantifying differences, introducing differences, and distinguishing between subjects. Essentially, it determines the scheduling priority of each subject in different demand scenarios. The second, third, and fourth chapters of this paper correspond to the three work contents mentioned in the previous section.

Chapter 2 introduces the concepts of regulating quality and regulatory characteristics, which are the basis for subject differentiation and the process of quantifying differences. From regulatory characteristics to regulating quality, the chapter portrays the multi-dimensional differences among various power plants, moving from the concrete to the abstract. After establishing the regulating quality evaluation system, an aggregating optimization model aimed at maximizing regulating quality is further proposed, foreshadowing Chapter 4.

Chapter 3 introduces regulating quality into the clearing model and analyzes how this difference can impact the market. In the market, product differentiation often signifies a competitive advantage, and changes in the competitive landscape can simultaneously bring

about variations in revenue levels. The trade-off between economy and quality is not limited to the peaking market involving VPPs. Quality can represent any regulatory characteristic, and this trade-off will be prevalent in cluster-oriented scheduling decisions.

Chapter 4 presents the concepts of comprehensive VPPs and specialized VPPs, representing the process of distinguishing between subjects. It then establishes an internal cluster organizational structure and an external cluster scheduling framework. Based on the traditional cloud-group-end grid scheduling architecture, it ultimately achieves the radiation of subject differentiation from the micro to the macro level.

The author considers that this paper has done some groundbreaking work. In the field of virtual power plant cluster, similar papers have not yet appeared. To some extent, part of the content of this paper comes from the author's imagination, exploration, and attempt of the future grid scheduling mechanism. Of course, there are still many imperfections in this paper. The dismantling of research objects, the selection of indicators, and the scientific nature of quantitative methods need to be improved. Both the aggregating optimization model and the peaking clearing model are multi-objective optimizations, which simply adopts the main objective method in multi-objective optimization. In addition, the calculation examples used for analysis in these two chapters are relatively simple. The core of the compensation mechanism design lies in the idea of compensation. The specific calculation formulas only design two simple functions that conform to the idea of compensation, without considering the balance of payments. The details of the virtual power plant cluster organization structure and scheduling framework need to be improved, and there are still many unconsidered places. At the same time, there is a lack of example analysis to verify the validity of subject differentiation. Subsequent researchers need to continue to conduct more in-depth research and discussion in this direction. The author's level is limited, and I hope the work and ideas proposed in this dissertation will help future research.