

# 大规模可调节资源多级聚合参与互动响应 数据需求及潜力分析方法

肖钰皓<sup>1</sup>, 李科<sup>1</sup>, 苏军<sup>2</sup>, 霍耀冉<sup>1</sup>, 孙裕策<sup>3</sup>, 张曦元<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司信息通信公司, 四川 成都 610041; 2. 四川科锐得电力通信技术有限公司, 四川 成都 610041; 3. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:**充分调动多类型的需求侧资源参与电力系统供需互动,是促进新能源消纳,保障电网安全稳定运行的重要措施。针对区域大规模可调节资源多级聚合参与电网互动响应需求,给出了负荷侧资源的分层分级调控系统架构以及可调节负荷信息交互融合方式;然后,分析了可调节资源参与互动通信系统性能需求和动态互动决策的数据需求,提出了一种规模化可调节资源多级聚合响应的互动潜力分析方法,支撑多类资源互动响应和优化管控;最后,通过算例分析验证了所提方法的有效性。

**关键词:**新型电力系统;可调节资源;互动响应;潜力分析方法

中图分类号:TM 393 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2024)01-0028-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240105

## Interactive Response Data Demand and Potential Analysis Method for Multilevel Aggregation of Large-scale Adjustable Resources

XIAO Yuhao<sup>1</sup>, LI Ke<sup>1</sup>, SU Jun<sup>2</sup>, HUO Yaoran<sup>1</sup>, SUN Yuce<sup>3</sup>, ZHANG Xiyuan<sup>3</sup>

(1. State Grid Sichuan Information & Communication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;  
2. Sichuan CRD Power Communication Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China;  
3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Fully mobilizing multiple types of demand-side resources to participate in the supply and demand interaction of power system is an important measure to promote the consumption of new energy and ensure the safe and stable operation of power grid. Aiming at the demand of multi-level aggregation of regional large-scale adjustable resources to participate in interactive response of power grid, a hierarchical control system architecture of load-side resources and an interactive fusion mode of adjustable load information are presented. The performance requirements of interactive communication system and data requirements of dynamic interactive decision making involving adjustable resources are analyzed, and an interactive potential analysis method for multi-level aggregation response of large-scale adjustable resources are proposed to support interactive response and optimal control of multi-class resources. Finally, a numerical example is given to verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** new power system; adjustable resources; interactive response; potential analysis

## 0 引言

高比例可再生能源接入电网成为能源转型必经之路,新能源大量替代常规机组,分布式能源、储能等交互式设备广泛接入,使得电力系统“双高”特征日益显著,给电网平衡调节带来巨大挑战。为确保

电力系统安全稳定运行,需要实现大规模灵活性可调节资源参与电网供需互动,通过优化拓展现有控制方式提升电网控制能力。然而目前存在一些制约因素:1)在互联架构层面,新型电力系统中电力公司用户、新能源发电商、新能源聚合商、配售电公司等多种电力交易参与主体,造成现有架构难以适应多种参与主体的新能源信息交互。2)在数据共享

层面,存在源网荷储的数据信息分散且无统一规范,造成分散在众多设备、系统中的数据难以共享;终端接入系统复杂多样,数据集成与共享难度大,业务壁垒和信息集成壁垒成为阻碍新能源作用发挥的重要掣肘。3)在互动响应层面,新型电力系统受不完备信息、协同互动机制、协同控制技术等多方面限制,难以实现大规模灵活资源的多层级互动响应,限制了多类资源面向不确定性问题和复杂多变运行环境的灵活性。

新型电力系统下数量巨大的用户侧灵活资源通常采用分层聚合的形式参与电网互动,各类资源的聚合和感知技术成为关键。对于分布式电源聚合方面:文献[1]针对空调负荷建立聚合模型,求解最佳运行状态以提高负荷聚合商的利润;文献[2]以负荷目标值与实际值之差最小为优化目标构建空调负荷聚合模型,并提出了一种分组温度控制方法来优化各聚合体出力。针对独立微电网:文献[3]构建了一种考虑优先调度权的最优运行模型,负荷聚合商、微网的运营特点与需求被考虑在该模型中;文献[4]则针对拥有储能装置的负荷聚合商,提出了一种聚合商市场化优化决策框架;文献[5]在大规模电动汽车接入电网的场景下,提出了能够最小化发电成本的发电计划优化模型;文献[6]研究了电动汽车对虚拟发电厂的效益影响,提出了一种滚动时域分析方法,并构建了虚拟电厂市场化模型。

可调节资源的特征提取是实现供需互动和精准控制的关键,其技术研究主要侧重于结构特征分析和行为模式提取。在台区用户负荷结构特性分析方面,近年研究多关注负荷聚类与分类识别、负荷在线监控及预测等,如:文献[7]选取了日本东京电网、美国纽约电网及中国东北部电网等3个大型电网进行负荷结构特性分析,可以为台区负荷结构特性分析提供参考;文献[8]为提高各主体收益并降低电力公司储备容量需求,提出了新的可调节容量上报博弈模型;文献[9]建立了一种针对低压电力用户的可调度能力评估模型,对低压电力用户负荷灵活度进行评估。然而当前可调节负荷特征提取技术通常关注于负荷数据的时域特征,利用时域模型进行求解,忽视了可调节资源的频域特征<sup>[10-11]</sup>。此外,可调节负荷的调节特性各异、种类极多,如何提取共通特征并建立可调能力的智能评估模型是可调潜力感知系统构建后要解决的问题。

国内用户侧蕴藏了巨大的可调节负荷资源。充分调动需求侧资源调控的灵活性,与新能源及常规电源进行协同运行,能够促进新能源消纳、支撑电力系统供需平衡和安全稳定运行。基于上述分析,下面结合新型电力系统建设,针对智能感知存在的控制对象分散复杂、市场环境感知困难、模型通信不完备等问题,进行大规模可调节资源多级聚合参与互动响应数据需求分析。并提出源荷储可调节资源参与互动响应的潜力评估方法,支持云边缘架构下经济代价最小的采集和控制,对台区居民用户的用能行为与设备级特征、电网运行状态进行综合建模分析,从而更好地实现需求侧资源的优化利用。

## 1 大规模可调节资源参与电网互动响应架构

### 1.1 负荷侧资源的分层分级调控系统架构

分布式资源包括很多的种类,如现在大力发展的光伏发电设备、各种类型的电动汽车和充电桩以及空调等电气设备等。需要将相近的可调节资源进行分层分级聚合,实现电网的调控,从而在调度过程中充分发挥需求响应作用。高度聚合的分层级负荷调控系统调度架构如图1所示。为实现灵活性资源参与电力系统运行,分层分级调控系统架构通常包含3层:底层终端平台、中层管控平台和上层主网<sup>[12]</sup>。底层终端为区域中分布式光伏、储能、充电桩、中央空调、电采暖、家用空调等丰富的可调节资源,形成涵盖源-网-荷-储各类资源的可调节负荷资源池,底层终端平台负责对灵活性资源的边缘化管控;中层管控层为智能化的感知终端及面向多业务场景的边云协同提供数据服务技术,实现对分布式电源、柔性负荷、储能等多种分布式能源的有效聚

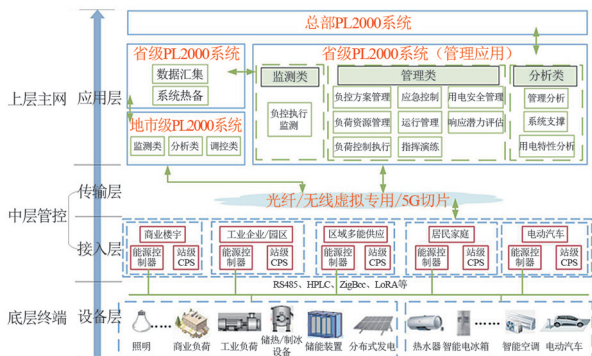


图1 高度聚合的分层级负荷调控系统调度架构

合,中层管控平台负责对海量灵活性资源的聚合代理管控;上层主网平台通过对可调节资源集群潜力分析及优化配置,实现能源供应效益的最大化。

### 1.2 可调节负荷信息交互融合方式

在大规模灵活资源动态聚合的过程中,电力企业基于市场规则引导源网荷储可调节资源参与互动,采用灵活的价格策略,满足不同用户需求,扩大电力销售,其中可调节负荷信息交互融合方式至关重要<sup>[13]</sup>。针对终端层、网格层分布式资源实时调节能力参数难以生成问题,构建海量资源接口数据快速适配的互联标准协议,以实现光伏、储能的运行功率、线路运行状态等实时数据以及容量、额定功率等准实时数据采集,支持省/市/县不同层级的实时可调节能力计算,为新型电力系统安全稳定运行过程中产生的调节需求提供边界。图 2 给出了四川电网可调节负荷信息交互融合逻辑架构。

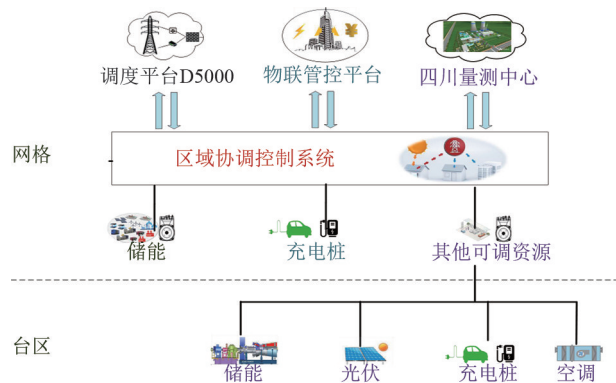


图 2 四川电网可调节负荷信息交互融合逻辑架构

借助云端的强大计算能力,可调节负荷互动系统可以协助需求响应服务供应商参与电网的负载平衡和可靠性管理。区域协同控制系统负责储存云端电网数据以及下层优化数据(边缘服务器上传的边缘计算数据以及聚合商的聚合数据),为云处理平台进一步数据优化和大数据模拟预测提供数据支持。可在用户园区、楼宇等处设置边缘计算终端,接收来自端侧采集到的数据,对接收数据进行数据预处理(数据清洗以及数据本地优化),再按照调度需求以及检测需求进行边缘计算分析,实现台区自治。同时,将本地计算数据传输给聚合商以及更上层的云处理平台和数据中心进行三层协调调度,调整本地调控方案以及任务卸载方案,保证边缘计算效果最优。网络层由不同规模的聚合商和相关通信设备组成,目的是促进需求响应资源用户和计算资源之间的交互,并且能够实现需求响应资源之间的交互。

## 2 互动响应感知通信与数据需求

### 2.1 可调节资源参与互动的通信系统要求

通信系统服务质量(quality of service, QoS)是保证可调节资源能够实时、可靠地参与电力系统调节服务的关键。QoS 中的通信带宽、时延、可靠性等指标都会影响可调节资源与电网能否完成及时、准确和可靠的互动<sup>[13]</sup>。调峰调频等业务对系统 QoS 的指标需求如表 1 所示。

表 1 典型业务通信指标

场景/业务	带宽	时延	可靠性/%
调频	按 100/km 2 个终端估算: 4.8 Mb/s	<50 ms	二次 99.99
调峰	按 100/km 2 个终端、秒级上报、 分钟级控制估算:0.82 Mb/s	<6 s	99.99
紧急需求响应	按 100/km 2 个终端估算:16 Mb/s	<50 ms	99.999
邀约需求响应	按 150/km 2 个终端、轮询机制、 分钟级上报估算:2.74 Mb/s	<1.1 s	99.999
清洁能源消纳	按 150/km 2 个终端估算: 2.74 Mb/s	<3 s	99.99
电力市场交易	按交易成员 1000 个估算: 1.33 Mb/s	<10 s	99.99

### 2.2 可调节负荷动态互动决策的数据需求

电力企业通过采用市场规则和灵活的价格策略,可以实现源网荷储互动,以满足各种用户需求。未来的能源互联场景下需要针对复杂情况做出决策。图 3 给出了边缘计算动态策略库加载分析流程,针对电网削峰填谷、各种辅助服务等业务场景,可以动态选择业务目标和优化目标,之后根据闭环反馈方法制定新的运行策略,以最大化整体效益。

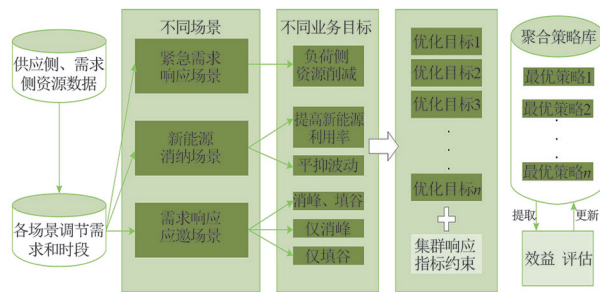


图 3 边缘计算动态策略库加载分析流程

低压配电网中的电气设备结构复杂多样,有些电气量信息不能直接由底层传感器获得,需要借助已有感知信息进行数据融合与估计。数据融合技术可以对电力系统中的大数据进行有效处理,包括不同类型、来源、时间和空间的数据,并提取它们的特



点和关联度,从而进一步获取有效的信息<sup>[14]</sup>。低压配电网信息融合需要结合数据融合技术与各类对象数据特征,才能实现理想的效果。

### 3 可调节资源多级聚合参与互动响应潜力分析方法

#### 3.1 可调节负荷资源多级聚类方法设计

负荷侧资源是参与源网荷储互动的关键。在市场机制下,各类数量多、容量小、类型复杂的灵活资源会参与电力系统的需求响应、调峰、调频等各类业务。由于可调节资源数量多、容量小,存在模型复杂、难以直接应用于地区电网调度运行等问题,需要对大规模的可调节资源进行分层聚合。按照 110 kV、35 kV 以及 10 kV 3 个层级进行负荷侧灵活资源的分层,分层多级聚合如图 4 所示。对于不同等级的区域电网的各电力用户的划分方法和聚类方式各有不同,由该配电网的负荷侧市场主体代理决定。电力市场主体响应前提是需要按照电力交易需求,事前提提交负荷用电计划,事后由电网企业给出实际用电情况,满足电力交易结算的偏差、响应电量以及实际用电的费用结算需求。

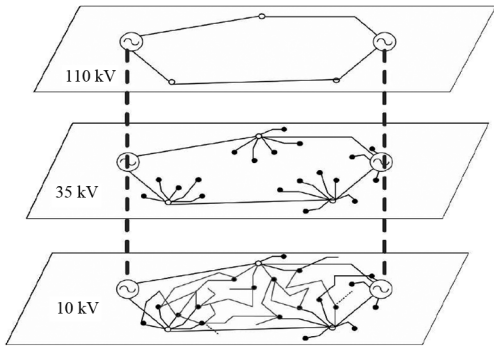


图 4 按电压等级进行多级聚类

#### 3.2 可调节资源互动响应潜力分析

##### 3.2.1 可调节负荷资源单体与需求响应行为分析

###### 1) 可调节负荷资源响应特征建模

可调节负荷资源响应特征建模,可从以下两方面考虑:1) 引导负荷资源主体主动参与,如在负荷设备的应用界面设定用电模式,对每一种模式进行量化建模;2) 对负荷资源主体的用电规律建立模型。此处主要考虑前者,在仿真平台中建立各可调节负荷资源的运行模式,每一种运行模式对应每一种特征参数设定,表现出各种激励水平下的可调资

源响应特征<sup>[15]</sup>。

下面将温控负荷作为分析案例,图 5 给出了温度负荷的控制模型。当实时电价与参考电价产生差值时,将以线性斜率改变温度设置,进而改变负荷数值。电价上升时的上浮斜率为  $r_{high}$ ,电价下降时的下浮斜率为  $r_{low}$ 。则资源设定的浮动斜率  $r$  可计算为

$$r = \begin{cases} r_{high}, & \Delta p \geq 0 \\ r_{low}, & \Delta p < 0 \end{cases} \quad (1)$$

对于可调节温控负荷资源  $j$ ,其控制方程为

$$\begin{cases} r_j = \frac{\Delta T / \Delta T_{max}}{\Delta p / \sigma^*} \\ \Delta T = T_t - T_{t-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $r_j$  为设定温度相对变化量大小与价格相对变化幅度的比值; $\Delta T$  为设定温度变化量; $\Delta T_{max}$  为温度变化极限; $\Delta p$  为电价变化量; $\sigma^*$  为 1 天内电价波动的标准差; $T_t$  为温控负荷在  $t$  时刻的温度。

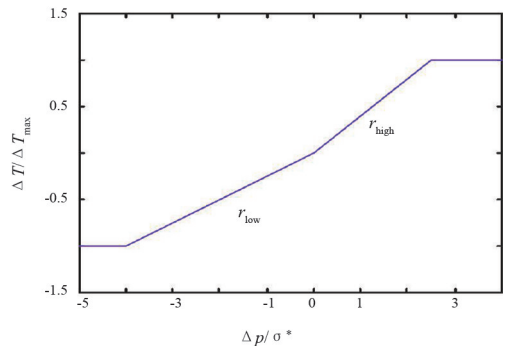


图 5 温度负荷的控制模型

##### 2) 需求响应资源潜力评估

结合不同激励下的可调节资源响应模式,评估不同激励下的可调节资源响应潜力。以可调节资源参与需求响应削峰时段为例,如图 6 所示。图 6(a) 分别给出了不同激励信号下的可调节资源用电响应曲线;在此基础上,对各种激励下的用电曲线与无激励下用电曲线作差,即可得到各种激励下可调节资源响应潜力,如图 6(b) 所示。

##### 3.2.2 可调节负荷资源聚合体需求响应能力分析

获取评估单个用户的响应模型后,还需要提出资源聚合体响应能力模型<sup>[16]</sup>。图 7 给出了需求响应资源的梯形聚合模型,图中: $P_R$  为最大响应量; $S_r$  为上升速率; $t_r$  为上升时间; $t_h$  为响应时间; $t_f$  为下降时间。该模型以给定激励信号下的资源响应潜力为基础进行构建,综合考虑了响应容量、响应速率、响应时长等多个要素的影响。

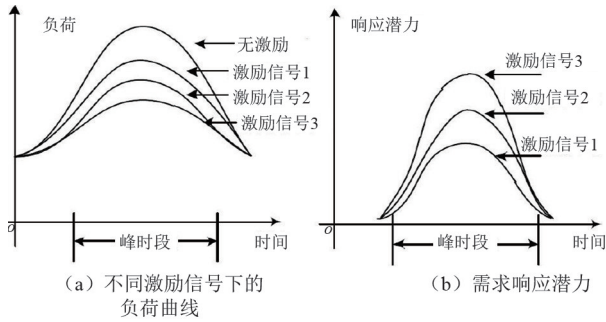


图 6 用户不同激励信号下需求响应潜力

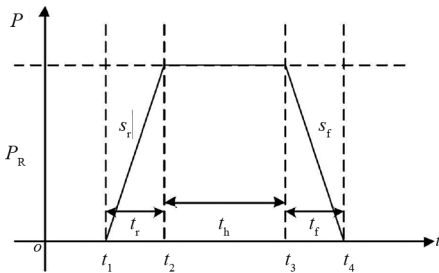


图 7 需求响应资源梯形聚合模型

按照需求响应潜力的时域特征划分不同场景, 场景  $i$  的梯形模型用分段函数表达为

$$\begin{cases} P_i = S_{r,i}t + a_i, & t \in [t_1, t_2] \\ P_i = b_i, & t \in [t_2, t_3] \\ P_i = S_{f,i}t + c_i, & t \in [t_3, t_4] \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_i$  为场景  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 下的可调容量;  $S_{r,i}$  为场景  $i$  下梯形建模的左侧上升速率为;  $S_{f,i}$  为右侧下降速率;  $a_i, b_i, c_i$  为分段拟合参数。

在从可调节资源类别、所属区域两个维度对可调节资源进行聚合基础上, 进行可调节资源聚合群需求响应资源品质分类。可划分为3种品质类型,

可调节资源聚合群需求响应资源特性如表 2 所示。

表 2 可调节资源聚合群需求响应资源特性

特性	优质型	中等型	普通型
响应容量/kW	>3000	$\geq 1000 \sim \leq 3000$	<1000
响应时长/h	>3	$\geq 0.5 \sim \leq 3$	<0.5
可调节资源转化率/%	>70	$\geq 30 \sim \leq 70$	<30

基于大规模可调节资源参与互动响应架构, 用于分析可调节资源互动响应潜力分析。精细化建模流程如图 8 所示, 主要由用户聚类、数据融合、分层聚合模型建立等环节组成。

### 4 算例分析

以某区域电网为例, 假设某母线上连有 3 条馈线, 每条馈线下包含分布式光伏、电动汽车、空调、储能设备等多种可调节资源。

#### 4.1 数据交互信息与通信架构应用

以支持区域内电网的感知信息交互系统改造建设, 提升需求侧资源状态信息感知广度深度, 解决区域内电网长期存在的可调节资源参与电力系统调节可靠性问题, 进行互动响应数据需求分析和建设架构设计。

##### 1) 总体建设架构

通信架构建设以具备边缘计算能力的智能融合终端为核心, 分别在用户层、网络层、服务层部署各类终端感知和相关通信设备, 实现对用户参与电网调度所需的各项数据的采集检测, 通过聚合计算节点将聚合信息上报给中央计算节点。

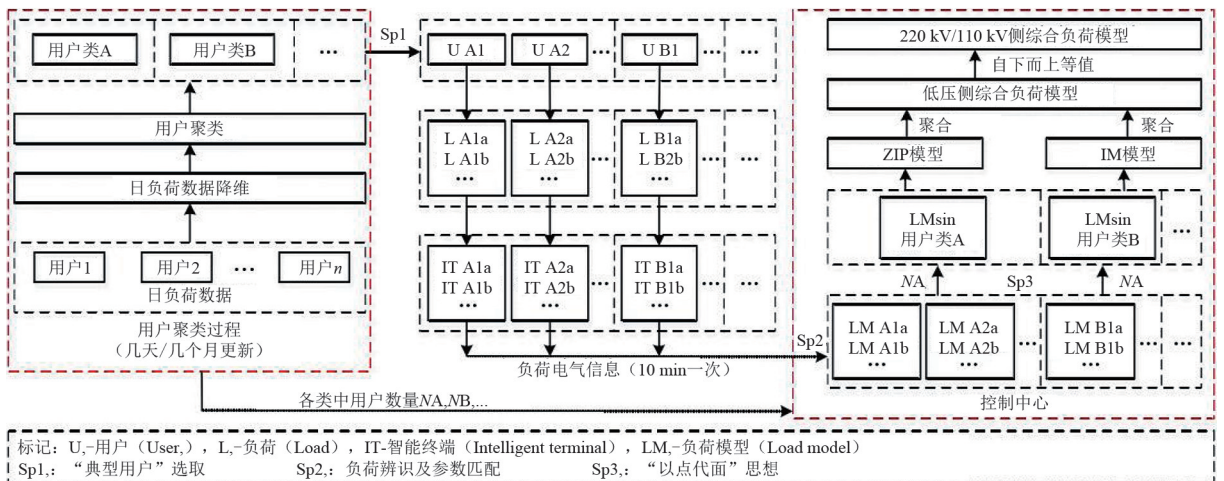


图 8 可调资源互动响应精细化建模流程

## 2) 用户层终端感知设备差异化配置

用户层终端差异化配置主要由不同可调节资源集群配套设施的部署情况,配合相应软件 APP 实现。配置类型可分为简洁型、标准型和扩展型。简洁型终端感知设备仅需智能电能表,实现配电变压器监测、电能计量、故障研判和停电信息上报等功能,适用于农村、城乡结合部、小容量公用变压器和一般专用变压器用户。

标准型终端感知设备在简洁型基础上,增加智能断路器、无功补偿电容器、智能换相开关等设备,实现开关运行监测、电能质量治理等功能,适用于城市和重要负荷区。

扩展型终端感知设备在标准型基础上,增加充电桩、分布式能源、视频监控装置,实现充电桩有序充电管理、分布式能源接入、配电站房视频监控等功能,适用于分布式能源、充电桩集中地区和重要专用变压器用户。

## 3) 应用成效评估

智能融合终端能够极大地扩展用户状态信息感知范围,促进了需求响应资源用户额计算资源之间的交互,大幅降低了时延,节约了运维调试时间,提升了实时性、可靠性,高效、精准实现灵活资源协同控制,提升了大规模可调节资源参与电网互动响应的能力。

### 4.2 仿真评估各可调节资源集群的响应潜力

根据该区域电网各资源响应特征,将资源划分为集群 I、II、III、IV 4 类,各集群动态响应评估指标概率分布的均值仿真参数如表 3 所示。采用离散化方法将连续的各动态指标仿真数据转化成不同区间下的离散化数据。不同时间节点下每个可调节资源集群降负荷功率的概率分布在一定区间范围内变化。

由于不同时间节点下可调节资源响应功率的离散化区间与数量不同,不同时间节点下可调节资源可调节区间大小也各不相同。可调节资源集群的降负荷功率取值为最大或最小值时的概率最小,这也满足实际情况下可调节资源集群的响应规律。各时间节点下各集群降负荷率评估指标多状态离散仿真结

果如图 9 所示。集群 II 和集群 III 的离散化区间范围较大,而集群 I 和集群 IV 的离散化区间范围相对较小。从实际调节难易程度来看,可调节资源集群可调节范围的离散化区间范围越小,该集群参与响应的确定性越强,受不确定性因素的影响越小,越有利于集群参与各类电网平衡调节业务。

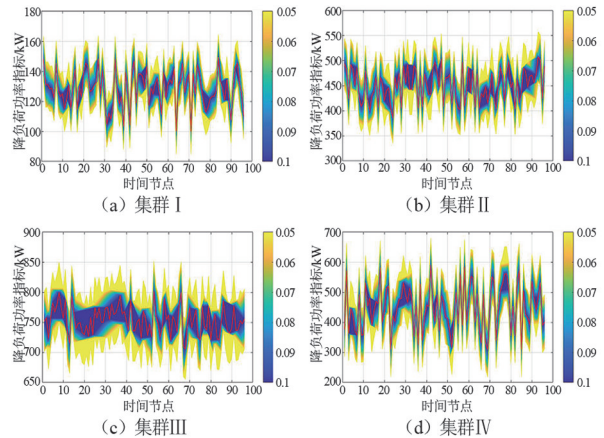


图 9 各时间节点下各集群降负荷率评估指标多状态离散仿真结果

同理对集群其他动态响应指标进行离散化处理,以集群 I 为例得到图 10 所示的各动态评估指标仿真多状态概率离散化结果。在每一个时间节点下,集群响应潜力每个动态指标为一个概率性序列,通常以该概率性序列期望作为可调节资源集群互补协调响应潜力分析依据。为从多个角度评估可调节资源集群响应能力,图 11 给出了集群 I 和集群 II 动态响应潜力评估指标的雷达图。集群响应潜力的综合评估结果可由蓝色区域面积代表。本算例中虽然集群 I 参与响应时反应时间较快,但是其最大可降负荷功率和响应速率较小,导致集群 I 蓝色区域面积较小,综合评估结果较差。集群 II 参与响应时反应时间较慢,但是其他动态指标都较大,因此在一些对反应时间要求较低的业务场景下,具有较大的可调节潜力。

为进一步分析不同业务场景下可调节资源集群的响应潜力,结合所采用的聚合响应感知方法,获取灵活资源在调峰、调频、紧急需求响应和新能源消纳

表 3 可调节资源集群动态响应评估指标概率分布的均值仿真参数

集群	最大调节功率/kW	反应时间/min	平均响应速率/(kW·min <sup>-1</sup> )	响应持续时间/min	稳态响应持续时间/min	响应恢复速率/(kW·min <sup>-1</sup> )
集群 I	[100, 150]	[1, 3]	[40, 90]	[10, 15]	[8, 13]	[60, 90]
集群 II	[400, 500]	[2, 5]	[80, 170]	[14, 32]	[12, 28]	[80, 170]
集群 III	[700, 800]	[4, 7]	[80, 120]	[25, 60]	[28, 52]	[80, 120]
集群 IV	[300, 600]	[5, 9]	[30, 60]	[20, 70]	[30, 65]	[40, 60]



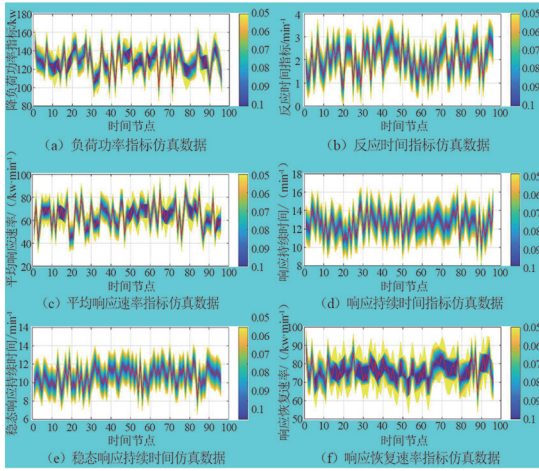


图 10 各时间节点下集群 I 各动态响应评估指标多状态离散仿真结果

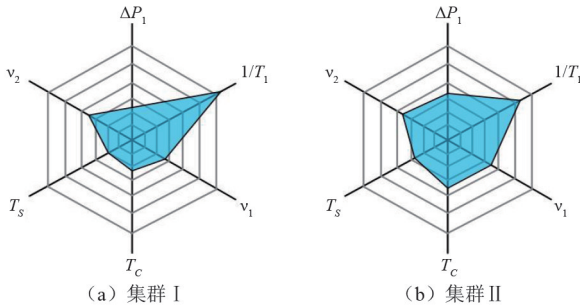


图 11 单时间节点下各集群动态响应潜力评估指标期望

4 个典型业务场景下不同动态响应指标需求仿真数据,如表 4 所示。其中,调峰业务场景对可调节资源集群反应时间和响应速率要求较低,但是对参与调峰可调节资源集群的响应容量要求较高,而调频与紧急需求响应业务场景下,可调节资源集群必须具备较小的反应时间,并且调节速率也要求较高。由于新能源发电存在短时间的波动性和长时间的峰谷差,因此新能源消纳场景下需要两种尺度的调节资源参与响应。较长时间尺度的新能源消纳问题可视为一类调峰问题加以考虑,因此新能源消纳业务场景主要针对短时间尺度内新能源波动性的平滑消纳场景构建需求仿真数据。

表 4 典型业务场景下各动态指标需求仿真数据

业务	容量/ kW	$T_1$ / min	$v_1$ / (kW · min <sup>-1</sup> )	$T_c$ / min	$T_s$ / min	$v_2$ / (kW · min <sup>-1</sup> )
调峰	150	10	40	20	17	50
调频	100	2	100	2	1	80
紧急需求 响应	120	3	90	10	8	100
新能源 消纳	80	5	80	4	3	70

## 5 结 论

新型电力系统下大规模灵活资源需要通过动态聚合方法参与电网互动,区域大规模可调节资源互动响应潜力感知和分析技术是关键。考虑用户主体类别与其时空特性、用户行为差别对不同弹性负荷资源响应能力具有影响,采用分层分级的负荷侧资源调控系统架构以及可调节负荷信息交互融合方式,能够降低可调节资源精细化信息获取困难。结合可调节资源参与互动通信系统性能需求和动态互动决策的数据需求,所提出的规模化可调节资源多级聚合响应的互动潜力评估分析方法,可反映各类资源集群化后的对外响应特性,适配新型电力系统复杂多变的运行状态,有效支撑多类资源互动响应和优化管控。

### 参考文献

[1] QI N, CHENG L, XU H L, et al. Smart meter data-driven evaluation of operational demand response potential of residential air conditioning loads [J]. Applied Energy, 2020, 279: 115708.

[2] 王蓓蓓,胥鹏,王宣元,等.需求响应分布鲁棒建模及其大规模潜力推演方法[J].电力系统自动化,2022,46(3):33-41.

[3] 朱玉杰.电采暖负荷可调节能力评估与集群控制策略研究[D].吉林:东北电力大学,2019.

[4] PARK Jeong Eun, PARK So Mang, CHOI Won Seok, et al. Electrical characteristics analysis of bonded cells for shingled modules [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2020, 20(11):6653-6658.

[5] 吴昆霖.基于电力大数据及算法挖掘技术的用户用电行为分析研究[J].现代农机,2020(5):56.

[6] 赵阳,胡诗尧,杨书强,等.售电市场环境下的数据驱动的用户用电行为分析[J].电力需求侧管理,2020,22(4):45-50.

[7] 朱天怡,艾芊,贺兴,等.基于数据驱动的用户用电行为分析方法及应用综述[J].电网技术,2020,44(9):3497-3507.

[8] 孙毅,杨艳敏,许鹏,等.基于云模型的用户群负荷调控算法[J].电网技术,2017,41(8):2611-2617.

[9] 傅贤馨,李紫嫣,朱俊澎,等.“双碳”目标下需求侧管理机制研究综述及展望[J].电力信息与通信技术,2023,21(2):1-12.

- design phase cost performance [J]. Journal of Management in Engineering, 2003(1):25-32.
- [35] WANG Y L, SONG S S, GAO M C, et al. Accounting for the life cycle cost of power grid projects by employing a system dynamics technique: A power reform perspective[J]. Sustainability, 2020, 12(8): 3297.
- [36] JEROMIN I, BALZER G, BACKES J, et al. Life cycle cost analysis of transmission and distribution systems[C]. 2009 IEEE Bucharest Power Tech, IEEE, 2009:1-6.
- [37] JEROMIN I, BALZER G, BACKES J, et al. Life cycle cost analysis of transmission and distribution systems[C]. 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Prague, Czech Republic, 2009:1-4.
- [38] LIU H S, LIU J, WANG H G, et al. Analysis of LCC model of high-voltage transmission line[C]. 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Shanghai, 2012:1-4.
- [39] 张宇娇, 孙晓彤, 王杰, 等. 考虑节能导线的 500 kV 输电线路全寿命周期成本评估[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 80-86.
- [40] GAN L, LI G Y, LIN Jeremy, et al. A bi-level probabilistic transmission planning with intermittent generations based on life cycle cost[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 90: 306-314.
- [41] LIU J Y, XIU C, PAN J, et al. Research on transmission line design method based on life cycle cost theory[C]// 2017 Chinese Automation Congress (CAC), IEEE, 2017: 6194-6199.
- [42] 许巍, 王慧芳, 杜振东, 等. 输电线路最佳经济寿命区间评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 74-80.
- [43] CHEN R, ZHANG L L, YANG D, et al. Research on power-off replacement calculation of transmission line insulators based on life cycle cost [C] // 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), IEEE, 2019: 236-240.
- [44] 辛建波, 康琛, 陈田, 等. 基于动态数据的输变电设备全寿命周期成本分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 181-187.
- [45] 盛萌, 张书雅. 基于灰色理论的电网设备更换最优时间[J]. 电力建设, 2018, 39(6): 131-136.
- [46] 俞越中, 朱海峰, 张子阳, 等. 输电线路杆塔接地体选材研究[J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(5): 25-31.
- [47] ZHANG Y J, WANG Z L, ZHU Y Y, et al. Life cycle cost assessment method considering multiple factors for economic evaluation of cable line steel brackets[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(17): 2488-2498.
- 作者简介:**  
 杨丹(1993),女,硕士,从事电力系统相关工作;  
 倪江(1990),男,硕士,从事电力系统相关工作;  
 杨迎昕(1994),女,硕士,从事电力系统相关工作。  
 (收稿日期:2023-07-03)
- 需求侧管理,2018,20(1):15-19.
- [15] ELLMAN D, XIAO Y Z. Incentives to manipulate demand response baselines with uncertain event schedules[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1358-1369.
- [16] 代心芸, 陈皓勇, 肖东亮, 等. 电力市场环境 下工业需求响应技术的应用与研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4169-4186.
- 作者简介:**  
 肖钰皓(1995),男,硕士,研究方向为新技术在电力工程中的应用;  
 李科(1988),男,硕士研究生,研究方向为数字化关键技术;  
 苏军(1991),男,硕士,工程师,研究方向为电力大数据应用。  
 (收稿日期:2023-06-30)

—————  
 (上接第 34 页)

- [10] 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.
- [11] 吴云芸, 方家琨, 艾小猛, 等. 计及需求响应的数据中心联盟共享储能规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 42-50.
- [12] 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.
- [13] KONG Xiangyu, SUN Bowei, KONG Deqian, et al. Home energy management optimization method considering potential risk cost [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 62 (2020): 102378.
- [14] 魏小曼, 余昆, 陈星莺, 等. 基于 Affinity propagation 和 K-means 算法的电力大用户细分方法分析[J]. 电力