

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240196

考虑时序相关性的需求侧资源可调节功率域聚合方法

李晓露¹, 徐婉云¹, 柳劲松², 林顺富¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 在新能源高比例接入电网的背景下, 需充分利用需求侧资源的灵活可调特性以保证电网的安全稳定与经济性。针对需求侧资源多样、数量多、容量小且分布广的特点, 提出一种考虑时序相关性的需求侧资源可调节功率域聚合方法。首先, 考虑需求侧资源功率调节的时序相关性, 以相邻时段可调节功率域来量化其功率调节能力。其次, 基于闵可夫斯基之和及上下边界近似法提出可调节功率域聚合方法, 采用自适应分布鲁棒优化算法求解近似可行域边界辨识模型, 确保其聚合最优性和解的可行性。然后, 通过时段聚类方法得到适用于日前调度的多时段可调节功率域, 降低计算复杂度。最后, 通过算例对比分析可知, 所提方法具有更高的计算效率和近似精度。

关键词: 需求侧资源; 时序相关性; 上下边界近似方法; 可调节功率域聚合

Adjustable power domain aggregation method for demand-side resources considering temporal correlation

LI Xiaolu¹, XU Wanyun¹, LIU Jinsong², LIN Shunfu¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: With a high proportion of new energy connected to the power grid, it is necessary to make full use of the flexible and adjustable characteristics of demand-side resources to ensure security, stability and economy. Aiming at the characteristics of demand-side resources that are diverse, large in number, small in capacity and widely distributed, an adjustable power domain aggregation method for demand-side resources considering timing correlation is proposed. First, considering the time-series correlation of the power regulation of demand-side resources, the power adjustment capability of the demand-side resources is quantified by describing the adjustable power domain of the adjacent period. Secondly, an aggregation method of an adjustable power domain is proposed based on the Minkowski sum and the upper and lower boundary approximation method, and an adaptive distribution robust optimization algorithm is used to analyze the approximate feasible region boundary identification model to ensure the optimality of aggregation and the feasibility of solutions. A multi-period adjustable power domain suitable for day-ahead scheduling is obtained using the time-period clustering method, which reduces computational complexity. Finally, a comparative analysis of the arithmetic examples shows that the proposed method has higher computational efficiency and approximation accuracy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977127).

Key words: demand-side resources; temporal correlation; upper and lower boundary approximation methods; adjustable power domain aggregation

0 引言

随着大规模新能源的接入, 新能源的随机波动性导致电力平衡问题越发凸显, 给电力系统安全稳定运行带来挑战^[1-2]。传统的电力平衡手段通常是利用发电侧资源来维持电网功率平衡, 但是发电侧资

源启动缓慢且功率调节速度不够, 难以平抑新能源的快速波动^[3]。而需求侧的储能、电动汽车及温控负荷等灵活性资源, 具有控制灵活、响应速度快等特点, 可对这些灵活性资源进行有效管控, 使其能够积极参与电网运行^[4-5], 保障电网供需平衡, 促进新能源充分消纳, 构建电网与用户之间更加安全、高效且友好的互动关系, 共同推动能源转型的深入发展^[6-7]。

在电网调度中, 需求侧资源向上级电网上报其

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977127)

功率可调节范围, 电网调度中心则根据其上报的可调节范围进行优化调度。如何准确量化出需求侧资源的功率调节能力成为其参与电网调度的关键^[8]。然而, 由于需求侧资源具有种类繁多、数量庞大、单体容量小且地理位置分散等特点, 对各个可调资源进行单独建模、定量分析, 将给计算和通信带来巨大的负担^[9-10]。因此, 有必要对需求侧资源的可调节能力进行聚合, 构建可以反映聚合资源可调节能力的通用模型, 这将有助于对需求侧资源进行管理和利用, 以最大程度地发挥需求侧资源的价值^[11-12]。

关于需求侧资源功率调节能力的量化, 目前研究主要通过刻画可调节功率域来对需求侧资源功率调节能力进行量化, 主要方法是采取虚拟发电机模型、虚拟储能模型等通用模型来描述需求侧资源的运行特性^[13-14]。文献[15]中采用计及功率约束、爬坡约束的虚拟发电机模型来描述热泵集群负荷的运行特性; 文献[16]中通过计及功率、电能不等式约束的通用虚拟储能模型来描述电动汽车、温控负荷及储能负荷的灵活可调特性。上述建模方法本质都是基于当前时刻需求侧资源需要满足的约束条件来确定其可调节功率域, 但是虚拟发电机模型缺少对需求侧资源状态约束的考虑, 同时虚拟储能模型也忽略了资源设备的爬坡能力限制, 这种对各类关键约束条件的忽视将可能导致求解出的可调节功率域精度不足。而文献[17]直接采用一组不等式约束来表征灵活性可行域, 该不等式组同时包含了功率约束、状态约束和爬坡约束, 能够更加准确地描述需求侧资源的运行特性。然而目前这些文献仅考虑了单一时刻的约束条件, 未考虑到当前时段功率边界会受相邻时段功率波动的直接影响, 忽略了需求侧资源功率变量之间的时序状态相关性, 难以准确描述需求侧资源功率调节能力的动态特性。

针对需求侧资源功率调节能力的聚合计算, 主要指对各个资源设备在不同时段和状态下的可调节功率域进行聚合, 本质上就是对可调节功率域求闵可夫斯基之和(Minkowski)^[18-19]。然而随着需求侧资源的种类、数量及调度时段不断增加, 可调节功率域的几何表征将变得愈发复杂, 导致求解 Minkowski 之和变得十分困难^[20]。为此, 从时段降维角度出发, 将多时段高维耦合优化问题分解为若干个低维连续时段优化问题^[21], 从而提高聚合效率。另外, 为降低计算复杂度, 还可以先对单个资源可调节功率域进行近似处理, 使得各类资源可调节功率域的表征形式具有相同的结构, 这样聚合计算就可以简化为多个可调节功率域直接线性求和。目前可调节功率域近似方法有外近似法、内近似法。

其中, 外近似法是将各个设备参数直接叠加作为聚合设备的参数, 使可调节功率域相对原始可调节功率域偏大, 且包含不可行点^[22-23]。在这种情况下, 还需要增加额外的调度过程来保证方案的安全可行性^[24], 这将会加大通信负担和计算复杂度。内近似法, 即基于一个预设的形状从内部近似原始可调节功率域, 可以保证解的可行性。文献[25]指出“zonotope”法是基于中心对称多胞体从内部近似状态边界, 使用相同的结构来表征可调节功率域, 进而提高可调节功率域表征形式的变换效率。然而内近似法是以牺牲一定程度的灵活性为代价来保证解的可行性。

针对上述问题, 本文提出了一种考虑时序相关性的需求侧资源可调节功率域聚合方法。利用分时段的线性边界约束对需求侧资源相邻时段可调节功率域进行表征; 并基于 Minkowski 之和及上下边界近似方法, 将海量需求侧可调资源的可调节功率域聚合。为了保证在安全可行的基础上提取更多的可调节功率域区间, 采用自适应分布鲁棒优化(adaptive robust optimization, ARO)算法将功率灵活性聚合表示为一个两阶段优化问题, 第一阶段求解功率聚合的最优可行域, 第二阶段保证解的可行性。最后, 基于时段聚合的方法, 求解多个相邻时段可调节功率域的并集, 得到多时段可调节功率域, 以降低其计算负担。

1 需求侧资源集群可调节能力量化的总体框架

由于需求侧资源种类多样、数量众多, 不同可调资源的运行状态与控制方式存在差异; 若将每个灵活性资源的所有运行约束全部上传给调度中心, 将给计算和通信造成巨大负担。为此, 本文构建了如图 1 所示的需求侧资源集群可调节能力量化的框架。

海量的需求侧灵活性资源需要以集群形式进行管理和调度, 对其可调节能力的表征可分为 3 个部分。首先, 根据当前时段功率与上一时段功率的耦合关系, 形成考虑功率容量约束、爬坡速率约束、状态约束的单个资源相邻时段可调节功率域; 其次, 通过设定集群的基准可行域对各类需求侧资源的可调节功率域进行近似, 以近似域的 Minkowski 之和表征需求侧资源集群聚合的单时段可调节功率域; 最后, 利用时段聚合的方法得到适用于日前调度的多时段需求侧资源集群的可调节功率域, 即由此量化出需求侧资源集群的可调节能力。

需求侧资源集群的可调节容量上传给调度中心,并应用于需求侧资源的优化调度,有效减轻了调度中心面临的计算负担。

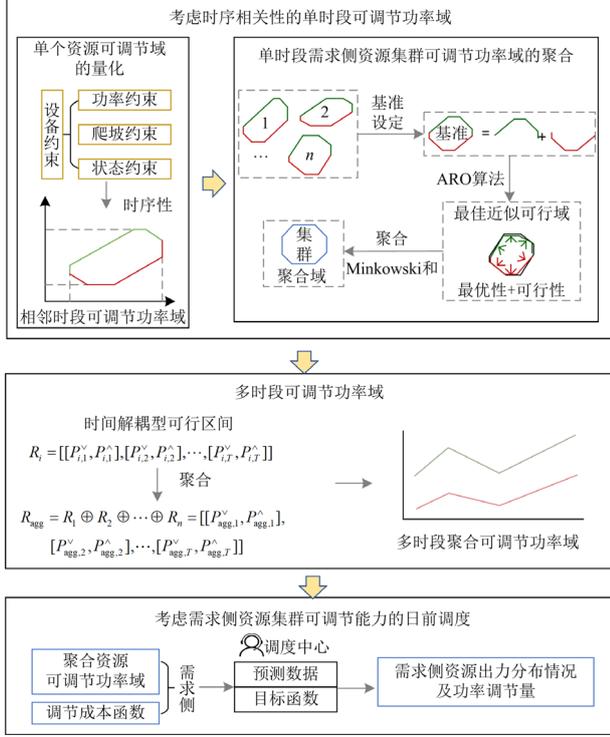


图1 需求侧资源集群可调节能力量化的总体框架

Fig. 1 General framework for quantifying the adjustable capacity of demand-side resource clusters

2 考虑时序相关性的需求侧资源可调节功率域

单个资源可调节功率域的特征是需求侧资源集群可调节功率域聚合的基础。本文考虑需求侧功率之间的时序相关性,采用分时段的线性边界约束来表示需求侧资源相邻时段的可调节功率域。

假设一个灵活性资源的调度周期 T 分成 m 个时段, k 时段的功率为 P_k , $k-1$ 时段的功率为 P_{k-1} ,其中 $k=1,2,\dots,m$ 。灵活性资源运行的约束空间可用一组不等式约束来表示,即

1) 资源功率容量约束

$$P_{k,\min} \leq P_k \leq P_{k,\max} \quad (1)$$

式中, $P_{k,\max}$ 、 $P_{k,\min}$ 分别为 k 时段的功率上下限。

2) 资源爬坡速率约束,即在相邻时段功率变化量的约束。需求侧资源当前时段所能发出的功率不仅受自身设备的参数和调度时间尺度的影响,还受上一时段功率约束的影响,即

$$r_{k,\min} \leq P_k - P_{k-1} \leq r_{k,\max} \quad (2)$$

式中, $r_{k,\max}$ 、 $r_{k,\min}$ 分别为当前时段 k 的爬坡速率上下限。

3) 资源状态约束。需求侧资源的运行状态是一个连续的累积量,会随着每一时段的功率变化而变化,如储能的剩余容量、温控系统的温度等。

储能类负荷的容量约束^[26]为

$$S_k = S_{k-1} + \frac{\eta \Delta t}{E} P_k \quad (3)$$

$$S_{k,\min} \leq S_k \leq S_{k,\max} \quad (4)$$

式中: S_k 为储能类负荷在当前时段的荷电状态; E 为储能类负荷的额定容量; η 为充放电效率; Δt 为时段间隔; $S_{k,\max}$ 、 $S_{k,\min}$ 分别为储能类负荷在 k 时段的荷电状态上下限。

空调在运行过程中,需要将室内温度在人体舒适温度范围之内,室内温度与空调功率的关系^[27]表示为

$$T_{r,k} = e^{-\frac{\Delta t}{RC}} T_{r,k-1} + (1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC}}) T_{o,k-1} + \eta_{EER} R (e^{-\frac{\Delta t}{RC}} - 1) P_k \quad (5)$$

$$T_{r,k,\min} \leq T_{r,k} \leq T_{r,k,\max} \quad (6)$$

式中: $T_{r,k}$ 为 k 时段的室内温度; $T_{r,k,\max}$ 、 $T_{r,k,\min}$ 分别为在 k 时段满足舒适度要求的温度最高、最低值; $T_{o,k-1}$ 为室外温度; C 、 R 分别为温控系统热容及等效电阻; η_{EER} 为能效比。

可调节资源的运行特性不同,需要满足的状态约束也不相同。各类需求侧资源的状态约束可统一表示为

$$x_{k,\min} \leq \alpha x_{k-1} + \beta u_{k-1} + \gamma P_k \leq x_{k,\max} \quad (7)$$

式中: α 、 β 、 γ 为动态特性参数; x_{k-1} 为上一时段的状态变量; $x_{k,\max}$ 、 $x_{k,\min}$ 分别为 k 时段的状态变量上下限值; u_{k-1} 为其他变量。

为了凸显状态约束对相邻两个时段功率关系的影响,已知初始状态 x_0 ,将式(7)改写为

$$x_{k,\min} \leq \alpha(x_0 + \gamma P_{k-1}) + \beta u_{k-1} + \gamma P_k \leq x_{k,\max} \quad (8)$$

将式(1)、式(2)、式(8)重新进行排列,约束条件分为可上调功率约束①—③和可下调功率约束④—⑥,得到需求侧灵活性资源 i 的可调节功率域 $\Omega_{i,k}$ 为

$$\Omega_{i,k} = \begin{cases} P_{i,k}^{\wedge} : \begin{cases} \textcircled{1} P_{i,k} \leq P_{i,k,\max} \\ \textcircled{2} P_{i,k} \leq P_{i,k-1} + r_{i,k,\max} \\ \textcircled{3} \gamma P_{i,k} \leq x_{i,k,\max} - \alpha(x_{i,0} + \gamma P_{i,k-1}) - \beta u_{i,k-1} \end{cases} \\ P_{i,k}^{\vee} : \begin{cases} \textcircled{4} P_{i,k} \geq P_{i,k,\min} \\ \textcircled{5} P_{i,k} \geq P_{i,k-1} + r_{i,k,\min} \\ \textcircled{6} \gamma P_{i,k} \geq x_{i,k,\min} - \alpha(x_{i,0} + \gamma P_{i,k-1}) - \beta u_{i,k-1} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{i,k}^{\wedge}$ 、 $P_{i,k}^{\vee}$ 分别为灵活性资源 i 可调节功率域的上下边界; $P_{i,k}$ 、 $P_{i,k-1}$ 为灵活性资源 i 相邻时段的功率值; $r_{i,k,\max}$ 、 $r_{i,k,\min}$ 分别为灵活性资源 i 在时段 k 的爬坡速率上下限; $x_{i,k,\max}$ 、 $x_{i,k,\min}$ 分别为灵活性资源 i 在时段 k 的状态变量上下限; $x_{i,0}$ 为灵活性资源 i 的初始状态值; $u_{i,k-1}$ 为灵活性资源 i 状态约束中的其他变量。

满足式(9)约束的功率取值集合称为需求侧灵活性资源的相邻时段可调节功率域, 如图2所示。图中, 绿色线段对应于式(9)中①—③, 代表需求侧灵活性资源可调节功率的上边界; 红色线段对应于式(9)中④—⑥, 代表需求侧灵活性资源可调节功率的下边界。以线段 $P_1 = P_2$ 为基准线, 当已知时段1的功率值 P_1 , $r_2^+ = P_2 - P_1$ 表示时段2的功率可上调量, $r_2^- = P_1 - P_2^{\vee}$ 表示时段2的功率可下调量。

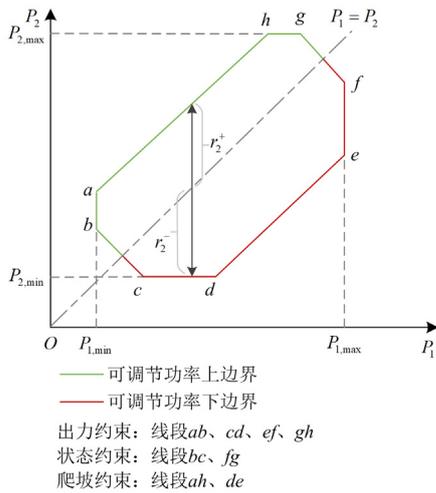


图2 相邻时段可调节功率域

Fig. 2 Adjustable power domain for adjacent periods

本文以一组标准参数形式来描述需求侧各类资源的灵活可调特性, 其中包括功率容量上下限、爬坡速率上下限和状态变量上下限。

3 需求侧资源可调节功率域的近似及聚合

3.1 基于上下边界的可调节功率域聚合方法

由于需求侧灵活性资源种类多样、数量众多且单个容量较小, 需对其进行聚合形成集群的可调节功率域。聚合的本质是计算各个灵活性资源可调节功率域的 Minkowski 和, 即

$$\Omega_{\text{agg},k} = \Omega_{1,k} \oplus \Omega_{2,k} \oplus \dots \oplus \Omega_{n,k} \quad (10)$$

式中: 符号“ \oplus ”表示 Minkowski 求和; $\Omega_{\text{agg},k}$ 为 k 时段需求侧 n 个灵活性资源聚合后的可调节功率

域; $\Omega_{1,k}, \dots, \Omega_{n,k}$ 为 n 个灵活性资源各自的可调节功率域。

然而由于灵活性资源的差异性, 各个资源的可调节功率域不尽相同。且随着资源种类、数量及调度时段的增加, 可调节功率域的几何表征愈加高维, 导致计算其 Minkowski 和变得十分困难。

因此, 为降低计算复杂度, 本文提出了一种需求侧灵活性资源可调节功率域近似及集群聚合方法, 如图3所示, 包括基准域的设定、可调节功率域的近似、可调节功率域的聚合3个步骤。

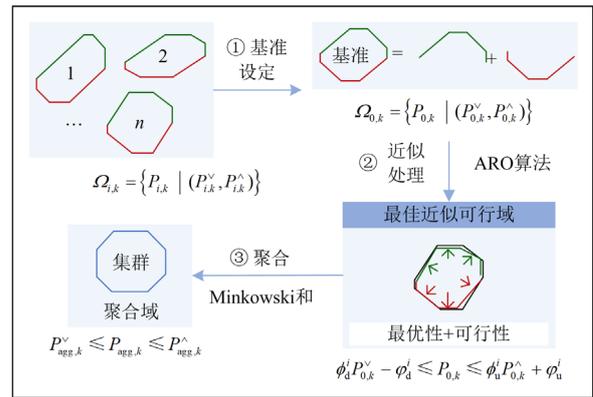


图3 可调节功率域的近似及聚合

Fig. 3 Approximation and aggregation of the adjustable power domain

1) 资源聚合的基准域。本文通过对所有待聚合资源设备的可调节功率域 $\Omega_{i,k}$ ($i=1,2,\dots,n$) 进行平均, 得到基准域 $\Omega_{0,k}$, $\Omega_{0,k}$ 的形式与式(9)相同, 其参数为 n 个资源参数的平均。

$$\Omega_{0,k} = \{P_{0,k} \mid (P_{0,k}^{\vee}, P_{0,k}^{\wedge})\} \quad (11)$$

式中: $P_{0,k}$ 为基准域 k 时段的功率值; $P_{0,k}^{\wedge}$ 、 $P_{0,k}^{\vee}$ 分别为基准域 k 时段的功率上下边界。

2) 单个资源可调节功率域的近似。通过平移、缩放基准域的方式逼近原始可调节功率域的边界, 得到各个资源的可调节功率近似域。

分别对基准域的上下边界进行平移、缩放, 得到功率上下边界的近似值为

$$\tilde{P}_{i,k}^{\wedge} = \phi_u^i P_{0,k}^{\wedge} + \phi_u^i \quad (12)$$

$$\tilde{P}_{i,k}^{\vee} = \phi_d^i P_{0,k}^{\vee} - \phi_d^i \quad (13)$$

$$\tilde{P}_{i,k}^{\vee} \leq P_{i,k} \leq \tilde{P}_{i,k}^{\wedge} \quad (14)$$

式中: $\tilde{P}_{i,k}^{\wedge}$ 、 $\tilde{P}_{i,k}^{\vee}$ 分别为资源 i 功率上下边界的近似值; ϕ_u^i 、 ϕ_d^i 分别为资源 i 功率上边界对应的缩放系数、平移系数; ϕ_d^i 、 ϕ_u^i 分别为资源 i 功率下边界对应的缩放系数、平移系数。式(14)表示资源 i 在 k

时段下的实际功率 $P_{i,k}$ 应位于上下边界近似值 $\tilde{P}_{i,k}^\wedge$ 、 $\tilde{P}_{i,k}^\vee$ 之间。

由功率上下边界的近似值 $\tilde{P}_{i,k}^\vee$ 、 $\tilde{P}_{i,k}^\wedge$ 构成了可调节功率近似域 $\tilde{\Omega}_{i,k}$ ，表示为

$$\tilde{\Omega}_{i,k} = \{P_{i,k} | (\tilde{P}_{i,k}^\vee, \tilde{P}_{i,k}^\wedge)\} = \{P_{i,k} | (\phi_d^i P_{0,k}^\vee - \phi_d^i, \phi_u^i P_{0,k}^\wedge + \phi_u^i)\} \quad (15)$$

近似域需要满足以下条件：

(1) 为了获得更多的灵活性可调能力，近似域 $\tilde{\Omega}_{i,k}$ 是原始可行域 $\Omega_{i,k}$ 的最佳近似域，需满足面积 $\text{area}(\tilde{\Omega}_{i,k})$ 最大。

$$\text{area}(\tilde{\Omega}_{i,k}) = (\tilde{P}_{i,k}^\wedge - \tilde{P}_{i,k}^\vee)\Delta t \quad (16)$$

(2) 必须保证解的可行性。在近似域 $\tilde{\Omega}_{i,k}$ 范围内，任意功率 P_k^i 均可通过调度需求侧资源得到，且不违反约束条件。具体而言，对于每个灵活性资源 i ，必须找到其原始功率上下边界的最优近似值。为保证所有功率点的可行性，将基准域的上下边界从内部向外近似，功率上边界的近似值在尽可能接近原始上边界的同时不能超过原始上边界，功率下边界的近似值应尽可能接近原始下边界的同时不能低于原始下边界，即

$$\phi_u^i P_{0,k}^\wedge + \phi_u^i \leq P_{i,k}^\wedge \quad (17)$$

$$\phi_d^i P_{0,k}^\vee - \phi_d^i \geq P_{i,k}^\vee \quad (18)$$

(3) 集群需求侧资源的可调节功率域聚合。单个资源可调节功率域经过近似处理后，集群资源的可调节功率域可对各个近似可调节功率域的平移、旋转参数直接线性相加而实现聚合。

$$P_{\text{agg},k}^\vee = \sum_{i=1}^n \phi_d^i P_{0,k}^\vee - \sum_{i=1}^n \phi_d^i \quad (19)$$

$$P_{\text{agg},k}^\wedge = \sum_{i=1}^n \phi_u^i P_{0,k}^\wedge + \sum_{i=1}^n \phi_u^i \quad (20)$$

$$P_{\text{agg},k}^\vee \leq P_{\text{agg},k} \leq P_{\text{agg},k}^\wedge \quad (21)$$

式中： $P_{\text{agg},k}^\wedge$ 、 $P_{\text{agg},k}^\vee$ 分别为集群资源在时段 k 的功率上下边界； $P_{\text{agg},k}$ 为集群资源在时段 k 的功率值。

3.2 基于两阶段 ARO 的近似可行域边界辨识模型

可行域由决策变量 $(P_{i,k}^\vee, P_{i,k}^\wedge)$ 来描述，而上下边界 $P_{i,k}^\vee$ 、 $P_{i,k}^\wedge$ 是时变量，为此引入不确定变量权值 ε_k ，将 k 时段的功率值 $P_{i,k}$ 表示为

$$P_{i,k} = \varepsilon_k P_{i,k}^\wedge + (1 - \varepsilon_k) P_{i,k}^\vee, \forall k \in T \quad (22)$$

式中，功率值 $P_{i,k}$ 可以看作上边界 $P_{i,k}^\wedge$ 和下边界 $P_{i,k}^\vee$ 的线性组合，并且权值 $\varepsilon_k \in [0, 1]$ 。当 $\varepsilon_k = 1$ 时，

$$P_{i,k} = P_{i,k}^\wedge, \text{ 当 } \varepsilon_k = 0 \text{ 时, } P_{i,k} = P_{i,k}^\vee.$$

通过上述变量变换，可以将 $\forall P_{i,k} \in \Omega_{i,k}$ 等价转换为关于 ε_k 的约束 $\forall \varepsilon_k \in G$ ，其中 G 为不确定集。

$$G = \{\varepsilon_k | 0 \leq \varepsilon_k \leq 1, \forall k \in T\} \quad (23)$$

为了保证近似可行域聚合的最优性与解的可行性，本文提出了基于两阶段 ARO 的近似边界辨识方法。鲁棒优化(robust optimization, RO)多用于处理优化问题中参数不确定性问题，而 ARO 能够降低包含自适应变量的不确定问题中的保守性^[28]。在可调节功率域聚合问题中，可行域类似于 ARO 中的不确定集，解的可行性的要求类似于自适应鲁棒约束，即对于任何不确定变量的实现都必须存在一个相关的可行解。

因此，为了满足这两个条件，利用 ARO 将可调节功率域近似聚合问题表述为式(24)所示的模型。

$$\begin{cases} \max_{\tilde{P}_{i,k}^\wedge, \tilde{P}_{i,k}^\vee} \min_{\varepsilon_k \in G} (\tilde{P}_{i,k}^\wedge - \tilde{P}_{i,k}^\vee) \Delta t \\ \text{s.t. } \tilde{P}_{i,k}^\wedge \leq P_{i,k}^\wedge \\ \tilde{P}_{i,k}^\vee \geq P_{i,k}^\vee \\ \tilde{P}_{i,k}^\vee \leq \varepsilon_k P_{i,k}^\wedge + (1 - \varepsilon_k) P_{i,k}^\vee \leq \tilde{P}_{i,k}^\wedge, P_{i,k} \in \Omega_{i,k} \\ \text{满足式(9)} \end{cases} \quad (24)$$

通过一个参数化集来表征聚合功率随时间的变化，并建立了两阶段自适应鲁棒优化模型来求解近似可行域内的最大面积参数化集。

为了保证可行域的最优性和分解的可行性，目标函数采用两阶段优化形式。第一阶段目标为最大化灵活性区域，决策变量为 $(\tilde{P}_{i,k}^\vee, \tilde{P}_{i,k}^\wedge)$ ；第二阶段中，当不确定变量 ε_k 的值确定后，第二阶段目标函数在 G 最恶劣场景下寻找最优可调资源调度策略。

4 需求侧资源集群的多时段可调节功率域

需求侧资源集群的单时段可调节功率域需进行多时段聚合以形成一个调度周期内的可调节功率域，从而参与电网调度及市场运行。

在求解多时段可调节功率域时存在复杂的时段耦合特性，因此将面临高维计算的难题。因此，本文从时段降维角度出发，将日前多时段的高维耦合优化问题分解为若干个低维连续时段优化问题，同时各个低维时段内依然保持时段间的耦合特性，从而缓解高维计算的困难。

依据第 3 节获得需求侧资源集群在单个时段的可调节功率域，求解多个相邻时段可调节功率域的并集，得到多时段可调节功率域，实现高维问题的降维计算，即

$$\Omega_{\text{agg}} = \Omega_{\text{agg},1} \cup \Omega_{\text{agg},2} \cup \dots \cup \Omega_{\text{agg},k} \cup \dots \cup \Omega_{\text{agg},m} \quad (25)$$

式中: Ω_{agg} 为需求侧 n 个灵活性资源聚合后的多时段可调节功率域; $\Omega_{agg,k}$ 为需求侧资源集群的单时段 k 可调节功率域。

为了更加直观地量化集群资源的功率可调能力, 定义功率可调节容量 R 表示为

$$R = [[r_1^-, r_1^+], [r_2^-, r_2^+], \dots, [r_m^-, r_m^+]] \quad (26)$$

$$\begin{cases} r_k^- = P_{agg,k} - P_{agg,k}^V \\ r_k^+ = P_{agg,k}^{\wedge} - P_{agg,k} \end{cases} \quad (27)$$

式中, r_k^+ 、 r_k^- 分别为集群资源在 k 时段的可上下调节备用容量。

由于单个需求侧灵活性资源的可调节功率域进行了近似处理之后再聚合, 因此需求侧资源调节功率成本函数需进行相应的等效变化。

$$\begin{cases} F(r_k) = a_k^{agg} r_k^2 + b_k^{agg} r_k + c_k^{agg} \\ a_k^{agg} = \sum_i \frac{a_i (\phi_k^i)^2}{\phi_k^{agg}} \\ b_k^{agg} = \sum_i \left[\frac{2a_i \phi_k^i \phi_k^{agg} \phi_k^i - 2a_i (\phi_k^i)^2 \phi_k^{agg} + b_i \phi_k^i \phi_k^{agg}}{\phi_k^{agg}} \right] \\ c_k^{agg} = \sum_i \left[a_i \left(\frac{\phi_k^i \phi_k^i - (\phi_k^i)^2 \phi_k^{agg}}{\phi_k^{agg}} \right)^2 + b_i \left(\frac{\phi_k^i \phi_k^i - (\phi_k^i)^2 \phi_k^{agg}}{\phi_k^{agg}} \right) + c_i \right] \end{cases} \quad (28)$$

式中: r_k 为功率调节量; ϕ_k^i 、 ϕ_k^i 分别为资源 i 的缩放、平移参数; ϕ_k^{agg} 为集群缩放参数, $\phi_k^{agg} = \sum_i^n \phi_k^i$;

ϕ_k^{agg} 为集群平移参数, $\phi_k^{agg} = \sum_i^n \phi_k^i$; a_i 、 b_i 、 c_i 为灵活性资源 i 的运行成本系数; a_k^{agg} 、 b_k^{agg} 、 c_k^{agg} 为集群资源的运行成本系数。

以需求侧资源集群参与电网调度为例, 具体流程如图 4 所示。主要包括以下步骤: 1) 输入需求侧可调负荷参数、室外环境温度等相关参数, 形成分段线性边界约束, 以形成单个资源的相邻时段可调节功率域; 2) 在每个时段对所有灵活性资源的可调节功率域进行近似, 求 Minkowski 和; 3) 多时段聚合, 输出调度时段 T 的集群聚合资源可调节功率域; 4) 需求侧资源集群向上级电网上报其功率可调节的范围, 电网调度中心则根据其上报的可调节能力进行优化调度。

5 算例

为验证所提方法的有效性, 从近似精度、聚合效果、优化调度三个方面对相邻时段及多时段可调

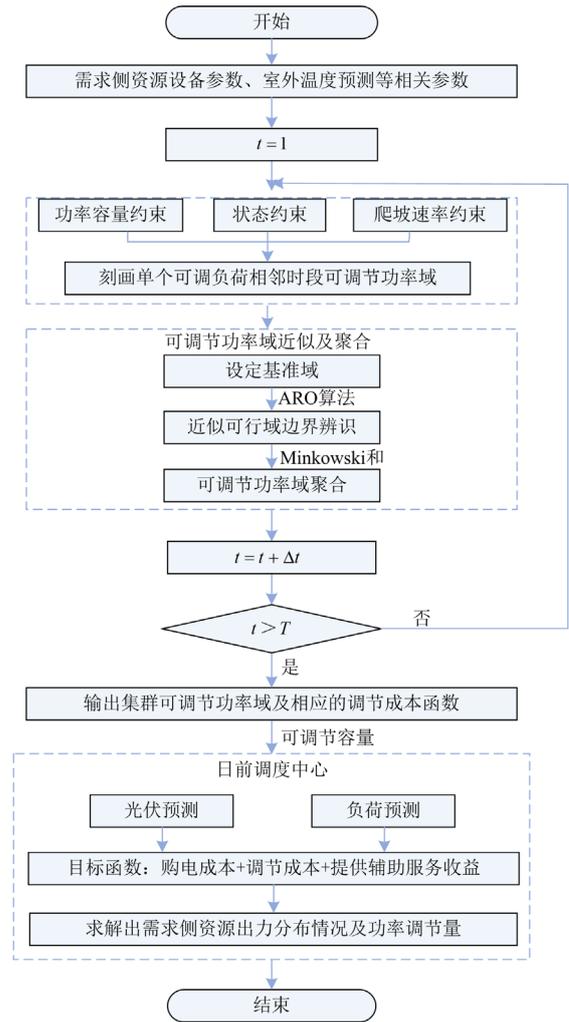


图 4 需求侧资源参与日前调度流程图

Fig. 4 Flow chart of demand-side resources participating in day-ahead scheduling

节功率域的仿真结果进行分析。

5.1 相邻时段可调节功率域分析

为了更好地描述相邻时段可调节功率域, 将以具体的需求侧资源设备为例, 时间段设置为 1 h, 刻画出其相邻时段可调节功率域。考虑 3 种参数不同的分布式储能设备作为待聚合的需求侧资源, 关于 3 种设备及基准域的参数如表 1 所示。

表 1 设备参数

Table 1 Parameters of devices

参数	设备 1	设备 2	设备 3	基准 0
储能容量/kWh	55	50	45	50
最大充放电功率/kW	14	12	11.5	12.5
爬坡速率/(kW/h)	6.0	4.5	5.0	5.2
初始容量/kWh	12.0	11.0	9.0	10.0
能量耗散率	0.99	0.995	0.985	0.99

3 个设备的基准域如图 5(a)所示。基于式(19)—式(21)对基准域的上下边界进行缩放、平移, 得到每个设备的近似域, 图 5(b)为设备 1 的原始域近似域, 设备 2、3 的近似域见附录 A 图 A1、图 A2。最后, 利用式(19)—式(21)计算设备 1—3 的聚合可

调节功和率域, 如图 5(c)所示。

对于本文提出的聚合方法, 由于近似域来自于同一个基准域, 因此 Minkowski 求和计算过程只需要对式(19)—式(21)进行算术加法。故本文提出的方法大大降低了计算 Minkowski 和的复杂度。

为了分析该方法在处理大量数据时的有效性, 采用蒙特卡罗采样方法随机生成 1000 个数据。假设设备参数服从表 2 中的概率分布函数。

将本文所提近似方法与目前其他的近似方法进行比较。其中, 因为外近似法包含不可行点, 具有一定风险性, 因此将本文所提近似方法与内近似方法进行比较。

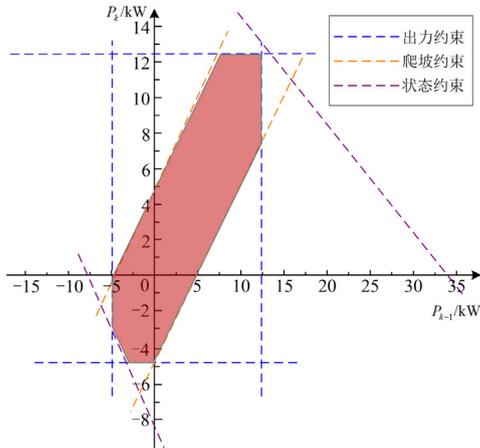
M1: 采用本文所提近似聚合方法。

M2: 采用文献[26]中的“zonotope”法, 基于对称环状图形的内近似可调节功率域的方法。

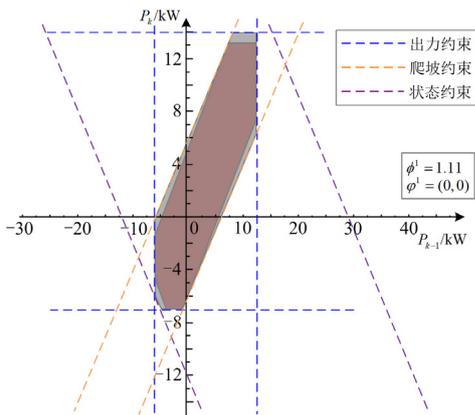
表 2 设备参数概率分布

Table 2 Probability distribution of parameters

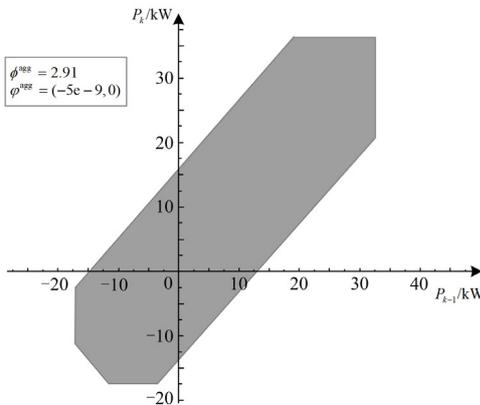
参数	分布函数	最小值	最大值
储能容量/kWh	N(50,10)	20	80
最大充放电功率/kW	N(12.5,6.5)	3.2	25
爬坡速率/(kW/h)	N(4.2,2.0)	1.0	10
初始容量/kWh	N(10,4.5)	2.0	15.5
能量耗散率	U(0.98,1)	0.98	1.0



(a) 3 个设备的基准域



(b) 设备 1 的原始域和近似域



(c) 3 个设备聚合的可调节功率域

图 5 可调节功率域的近似及聚合

Fig. 5 Approximation and aggregation of the adjustable power domain

采用近似可调节功率域相对于原始可调节功率域的平均尺度因子 ϕ^{ave} 评估相邻时段聚合结果的准确性, 其中 ϕ^{ave} 越接近 1, 表示近似结果越准确。

$$\phi^{ave} = \sum_{i=1}^n \phi^i / n \quad (29)$$

式中, ϕ^i 为灵活性资源 i 的缩放参数。

结果如表 3 所示, M1 方法的 ϕ^{ave} 为 0.8124, 相较 M2 方法的 ϕ^{ave} 值更接近于 1, 表明本文提出的近似方法有更高的精度。

表 3 不同近似方法的聚合结果比较

Table 3 Comparison of aggregation results using different approximation methods

算法	平均尺度因子
M1(本文方法)	0.8124
M2	0.7872

5.2 多时段可调节功率域聚合效果分析

基于 M1、M2 方法对表 2 中的 1000 个异构分布式储能负荷群进行多时段聚合, 对比分析该负荷群的多时段可调节功率域。

由图 6 可知, 本文所提的方法 M1 相较 M2 能够提取到更大的可调节功率域区间。这是因为 M2 是利用一个对称图形作为基准域, 通过对其进行缩

放和平移操作以靠近原始可调节功率域边界。然而, 当面对非对称的原始可调节功率域时, 这种方法容易导致可行点的损失; 而 M1 是在 M2 的基础上, 将基准域分为上下边界两个部分, 分别将这两部分去靠近原始可调节功率域, 这样使得近似域更加准确, 因而能够提取更大的可调节功率域区间。

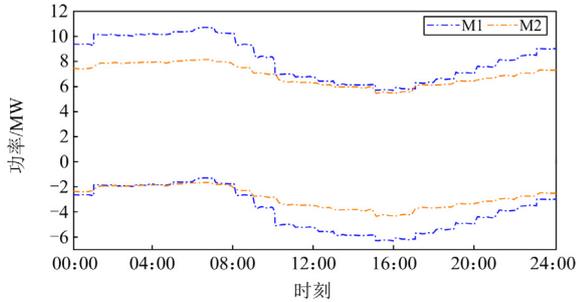


图 6 基于不同近似方法的功率边界比较

Fig. 6 Comparison of power boundary based on different approximation methods

5.3 日前经济调度分析

以需求侧资源参与日前电力调度为例, 说明本文所提方法的实际应用价值。日前调度中包含 600 台分布式储能 ES、600 辆电动汽车 EV 及 600 台空调 HVAC, 将调度周期分为 96 个时段, 每个时段为 15 min。其中, ES 设备参数见表 2, EV 及 HVAC 设备参数见附录 A 表 A1, 日前电价、环境温度及光伏出力参考文献[29]。同时考虑购买能量的成本、需求侧资源功率调节成本及提供辅助服务获得的收益这三部分, 以经济性最优为目标, 需求侧资源参与日前调度详细的模型见附录 B。

聚合资源的灵活性体现在其量化出的可调节功率范围, 应用本文方法对集群 ES、EV、HAVC 可调节功率域进行聚合。集群可提供向上、向下调节的功率范围如图 7 所示。

本文进一步将所提近似聚合方法与已有的几种方法进行了比较。

M1: 采用本文所提出的近似聚合方法(ARO 算法)。

M2: 使用了文献[26]中的“zonotope”法, 即基于对称环状图形的内近似可调节功率域方法。

M3: 文献[24]提出的外近似法, 该方法将各个设备参数的总和作为聚合参数。

M4: 非聚合方法, 即所有的设备都由系统操作员单独建模和控制, 而不考虑聚合过程。

M5: 基于 RO 算法的近似方法。

表 4 给出了 5 种方法在计算时间和运行成本方面的经济调度结果对比情况。

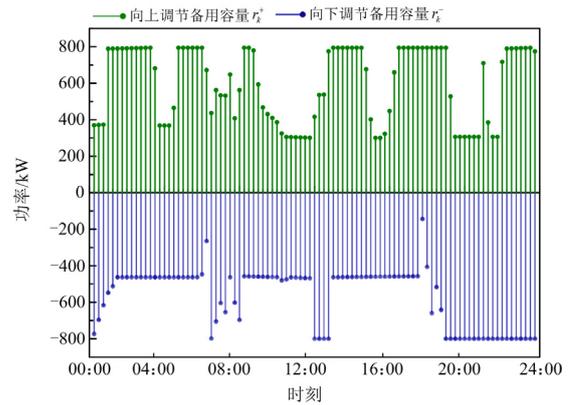


图 7 需求侧资源集群的可调节功率范围

Fig. 7 Adjustable power range for demand-side resource clustering

表 4 经济调度结果比较

Table 4 Comparison of economic scheduling results

方法	计算时间/s	总成本/元	不可行点占比/%
M1	4.26	50 560.6	0
M2	4.02	60 193.1	0
M3	6.31	52 102.3	13.32
M4	1700.96	47 495.9	0
M5	4.19	46 850.1	9.3

相较于 M5 的 RO 算法, 本文所提 ARO 算法可以将不可行点占比降低至 0, 总调度成本仅增加了 7.9%。本文所提方法可以平衡安全性与经济性, 并且在提高优化结果鲁棒性的同时, 避免因为过度保守而增加额外成本。

相比 M4, 本文所提出的近似聚合方法 M1 大大减少了决策变量和操作约束的数量, 能够以较高的计算效率进行大量数据的有效管理。在大规模电力系统实际运行中使用 M4 是不现实的, 对大量小容量需求侧设备单独建模将导致管理和通信负担的急剧增加。

相比 M2, 如表 3 和图 6 所示, 本文所提方法 M1 可以提取更大的可调节功率域区间, 为电力系统提供更大的灵活性, 使得参与辅助服务获取更多的收益, 从而降低总成本。

对于 M3, 该方法直接将各个设备参数叠加, 使得可调节功率域相对于原始可调节功率域偏大, 包含了不可行点, 占比达到 13.32%。在采用 M3 的情况下, 需要增加额外的调度过程来保证其可行性和安全性, 这将增加计算复杂度。而本文所提方法 M1 本质上是在刻画了原始可调节功率域的基础上进行内近似处理, 保证了调度轨迹的可行性。

6 结论

随着大规模新能源的接入以及需求侧资源负荷

大幅度增长, 如何整合与量化各类具有多样性特征的资源, 避免产生巨大的建模和计算量是本文研究的重点。本文提出了一种考虑时序相关性的需求侧可调节功率域聚合方法, 通过算例验证分析可以得到以下结论:

1) 分别通过与其他近似方法对比, 如“zonotope”法、外近似方法等, 验证了本文所提近似方法在日前优化调度中的优越性。调度结果表明, 该方法不仅计算效率较高, 而且可以在保证调度轨迹可行性的基础上获取更大的可调节功率域区间, 从而可提供更多的辅助服务获取收益, 使得经济性最优。

2) 通过本文方法量化的需求侧资源可调节功率域可用于协调日前、日内调度。在日内实时调度阶段可以通过调节需求侧资源功率应对各种不确定的变化。

本文方法可以量化出需求侧资源集群的可调能力, 在下一步研究中将继续考虑不同节点安全约束条件以及市场运行机制, 以便在配电网环境中发挥更多的作用。

附录 A

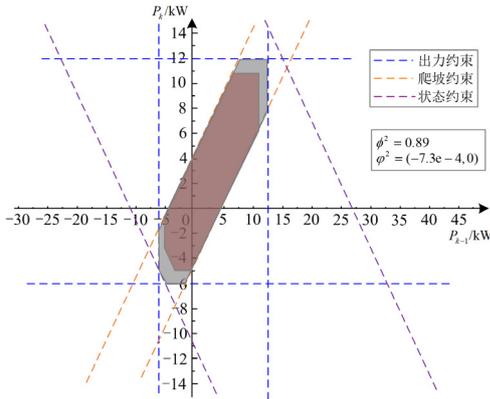


图 A1 设备 2 的近似域

Fig. A1 Approximate domain of device 2

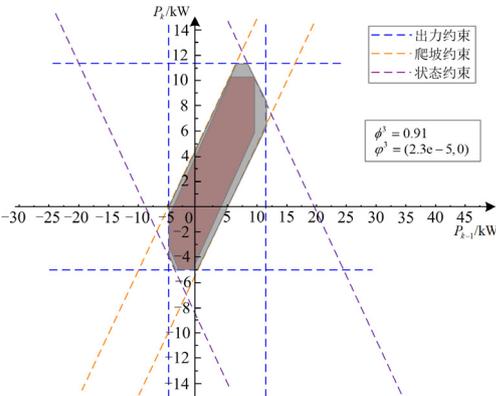


图 A2 设备 3 的近似域

Fig. A2 Approximate domain of device 3

表 A1 EV 及 HVAC 设备参数
Table A1 Parameters of EV and HVAC

参数	数值/服从分布函数
用户温度舒适度范围/°C	[19,25]
死区温度范围/°C	[-0.5,0.5]
制冷功率上限/kW	3
能效比	2.5
热容/(kWh/°C)	U[2,3]
热阻参数/(°C/kW)	U[2,3]
温度设定值 θ_{set} /°C	N[20,24]
电动汽车的电池容量/kWh	35
充放电功率限制/kW	6.5
运行电池荷电状态范围	0.1~1
运行容量初值 E_0 /(kWh/°C)	N[0.35×64,5]
并网时间 T_{on}	N[18: 30,1]
离网时间 T_{off}	N[7: 30,1]

附录 B

需求侧资源参与日前调度的模型如下, 同时考虑购买能量的成本、需求侧资源的调节成本及提供辅助服务获得的收益, 以经济性最优为目标, 即

$$\min \sum_{k=1}^T [F(r_k) + P_k^M \lambda_k \Delta t - (r_k^+ C_k^+ + r_k^- C_k^-) \Delta t] \quad (B1)$$

$$P_k^M = P_k^{ES} + P_k^{EV} + P_k^{HVAC} + P_k^{PV} + P_k^{Load} \quad (B2)$$

$$P_k^{ES} \in \Omega^{ES}, P_k^{EV} \in \Omega^{EV}, P_k^{HVAC} \in \Omega^{HVAC}$$

式中: λ_k 为日前电价; C_k^+ 、 C_k^- 分别为需求侧资源提供辅助服务时的备用容量价格; r_k^+ 、 r_k^- 分别为聚合资源功率可向上、向下调节的容量, 均为正数; P_k^M 为所有资源日前调度量, 包括光伏出力 P_k^{PV} 、日用负荷功率 P_k^{Load} 、空调功率 P_k^{HVAC} 、电动汽车功率 P_k^{EV} 及储能功率 P_k^{ES} ; Ω^{ES} 、 Ω^{EV} 、 Ω^{HVAC} 分别为储能、电动汽车、空调的可调节功率域; $F(r_k)$ 为需求侧资源功率调节成本, 由式(28)给出。其中, 重点分析需求侧资源的可调能力, 能够给电网提供灵活性, 在此 P_k^{PV} 、 P_k^{Load} 均为常数。

上、下调节的备用容量约束为

$$0 \leq r_k^+ \leq r_{c,k}^+ \quad (B3)$$

$$0 \leq r_k^- \leq r_{c,k}^- \quad (B4)$$

$$r_k^+ \leq \overline{P_k^y} - P_k^y \quad (B5)$$

$$r_k^- \leq P_k^y - \underline{P_k^y} \quad (B6)$$

$$P_k^y + r_k^+ - r_k^- = P_k^{EV} + P_k^{HVAC} + P_k^{ES} \quad (B7)$$

式中: $r_{c,k}^+$ 、 $r_{c,k}^-$ 分别为提供辅助服务时规定可以调节的容量上下限; P_k^y 为需求侧聚合资源的调度功率; $\overline{P_k^y}$ 、 $\underline{P_k^y}$ 分别为聚合功率的上下限。此外还应

该满足式(B7)中的功率约束,即需求侧资源的调度功率和调整的容量都应由电动汽车和温控负荷等资源提供。

参考文献

- [1] 潘旭,王会超,王建中,等.基于优先消纳新能源的电网调峰难度分析指标体系研究[J].供用电,2023,40(2):78-84.
PAN Xu, WANG Huichao, WANG Jianzhong, et al. Index system research on difficulty analysis of power grid peak shaving with priority consumption of new energy[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(2): 78-84.
- [2] 皇甫成,郭金智,贾非,等.一种考虑新能源出力相关性及不确定性的分布式发电规划策略[J].电网与清洁能源,2022,38(3):105-110,118.
HUANGFU Cheng, GUO Jinzhi, JIA Fei, et al. A distributed generation planning strategy considering the correlation and uncertainty of renewable energy output[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(3): 105-110, 118.
- [3] 林俐,田欣雨.基于火电机组分级深度调峰的电力系统经济调度及效益分析[J].电网技术,2017,41(7):2255-2263.
LIN Li, TIAN Xinyu. Analysis of deep peak regulation and its benefit of thermal units in power system with large scale wind power integrated[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2255-2263.
- [4] 林顺富,张琪,沈运帷,等.面向灵活爬坡服务的高比例新能源电力系统可调节资源优化调度模型[J].电力系统保护与控制,2024,52(2):90-100.
LIN Shunfu, ZHANG Qi, SHEN Yunwei, et al. Optimal dispatch model of adjustable resources in a power system with high proportion of renewable energy for flexible ramping product[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 90-100.
- [5] 吴界辰,艾欣,胡俊杰.计及不确定因素的需求侧灵活性资源优化调度[J].电力系统自动化,2019,43(14):73-80.
WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie. Optimal dispatch of flexible resource on demand side considering uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 73-80.
- [6] 程杉,傅桐,李泮洋,等.含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J].电力系统保护与控制,2023,51(22):1-12.
CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.
- [7] 樊宇琦,丁涛,孙瑜歌,等.国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1729-1752.
FAN Yuqi, DING Tao, SUN Yuge, et al. Review and cogitation for worldwide spot market development to promote renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1729-1752.
- [8] 姜华,杨知方,林伟,等.计及分布式新能源不确定性的虚拟电厂调度边界概率分布刻画方法[J].中国电机工程学报,2022,42(15):5565-5576.
JIANG Hua, YANG Zhifang, LIN Wei, et al. A method for describing the probability distribution of virtual power plant scheduling boundary considering the uncertainty of distributed new energy[J]. Proceeding of the CSEE, 2022, 42(15): 5565-5576.
- [9] 王玲玲,刘恋,张镞,等.电力系统灵活调节服务与市场机制研究综述[J].电网技术,2022,46(2):442-452.
WANG Lingling, LIU Lian, ZHANG Ke, et al. A review of power system flexible ramping product and market mechanism[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 442-452.
- [10] 王彩霞,时智勇,梁志峰,等.新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J].电力系统自动化,2021,45(16):37-48.
WANG Caixia, SHI Zhiyong, LIANG Zhifeng, et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 37-48.
- [11] 王克道,陈启鑫,郭鸿业,等.面向可交易能源的储能容量合约机制设计与交易策略[J].电力系统自动化,2018,42(14):54-60.
WANG Kedao, CHEN Qixin, GUO Hongye, et al. Mechanism design and trading strategy for capacity contract of energy storage towards transactive energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 54-60.
- [12] KHATAMI R, PARVANIA M, NARAYAN A. Flexibility reserve in power systems: definition and stochastic multi-fidelity optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 644-654.
- [13] 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(3):1-9.
WANG Siyuan, WU Wenchuan. Aggregation reference model and quantitative metrics system of flexible energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(3): 1-9.
- [14] 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(1):15-28.
CHEN Huilai, ZHANG Haibo, WANG Zhaolin. A review of market and scheduling characteristic parameter aggregation algorithm of different types of virtual power

- plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 15-28.
- [15] HAO He, WU Di, LIAN Jianming, et al. Optimal coordination of building loads and energy storage for power grid and end user services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4335-4345.
- [16] 赵文猛, 黄豪江, 朱建全, 等. 内近似约束空间整合的灵活性资源集群响应方法[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2621-2632.
ZHAO Wenmeng, HUANG Haojiang, ZHU Jianquan, et al. Flexible resource cluster response based on inner approximate and constraint space integration[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2621-2632.
- [17] 周海浪, 刘一畔, 陈雨果, 等. 考虑灵活性收益的需求侧资源可调节功率域聚合方法[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 56-63, 155.
ZHOU Hailang, LIU Yipan, CHEN Yuguo, et al. Demand side feasible region aggregation considering flexibility revenue[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 56-63, 155.
- [18] 栗子豪, 李铁, 吴文传, 等. 基于 Minkowski sum 的热泵负荷调度灵活性聚合方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 14-21.
LI Zihao, LI Tie, WU Wenchuan, et al. Minkowski sum based flexibility aggregating method of load dispatching for heat pumps[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 14-21.
- [19] 吴界辰, 艾欣. 交互能源机制下的电力产消者优化运行[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 1-18.
WU Jiechen, AI Xin. Optimal operation of prosumers based on transactive energy mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 1-18.
- [20] SANANDAJI B M, VINCENT T L, POOLLA K. Ramping rate flexibility of residential HVAC loads[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 7(2): 865-874.
- [21] 李林威, 林伟, 杨知方, 等. 考虑多时段耦合特性的联络线功率可调节功率域确定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 64-72.
LI Linwei, LIN Wei, YANG Zhifang, et al. Characterizing a tie-line transfer capacity region considering time coupling in day-ahead multi-period dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 64-72.
- [22] XU Zhiwei, DENG Tianhu, HU Zechun, et al. Data-driven pricing strategy for demand-side resource aggregators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 57-66.
- [23] XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Risk-averse optimal bidding strategy for demand-side resource aggregators in day-ahead electricity markets under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 96-105.
- [24] YI Zhongkai, XU Yinliang, GU Wei, et al. A multi-time-scale economic scheduling strategy for virtual power plant based on deferrable loads aggregation and disaggregation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 11(3): 1332-1346.
- [25] MÜLLER L F, SZABÓ J, SUNDSTRÖM O, et al. Aggregation and disaggregation of energetic flexibility from distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1205-1214.
- [26] 李建林, 郭兆东, 曾伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 33-42.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 33-42.
- [27] 胡志勇, 郭雪丽, 王爽, 等. 考虑响应意愿的电动汽车群-空调集群需求响应策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 109-119.
HU Zhiyong, GUO Xueli, WANG Shuang, et al. Demand response strategy for electric vehicles and air conditioners considering response willingness[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 109-119.
- [28] 张镠, 王旭, 杨宏坤, 等. 数据中心集群灵活边界下电力系统分布鲁棒优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 235-247.
ZHANG Ke, WANG Xu, YANG Hongkun, et al. Distributionally robust optimization scheduling method for electrical power system under flexibility boundaries of data center clusters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 235-247.
- [29] 吴界辰, 艾欣, 胡俊杰. 需求侧资源灵活性刻画及其在日前优化调度中的应用[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 1973-1984.
WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie. Methods for characterizing flexibilities from demand-side resources and their applications in the day-ahead optimal scheduling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 1973-1984.

收稿日期: 2024-02-23; 修回日期: 2024-04-25

作者简介:

李晓露(1971—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网调度自动化与电力系统分析; E-mail: lixiaolu_sh@163.com

徐婉云(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为需求侧资源可调能力量化。E-mail: 1213005849@qq.com

(编辑 许威)