

基于多面体不确定集的需求响应不确定性研究

张凯恒¹,徐青山¹,杨 斌²,栾开宁²

(1. 东南大学 电气工程学院,南京 211189;

2. 国网江苏省电力有限公司,南京 210029)

Research on the uncertainty of demand response with polyhedron set

ZHANG Kaiheng¹, XU Qingshan¹, YANG Bin², LUAN Kaining²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. State Grid Jiangsu Power Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

摘要:随着需求响应技术的不断发展,用户侧柔性资源体现出越来越强的可调度潜力。然而由于用户习惯、模型精度、使用环境,大部分分散式可调度负荷呈现一定的不确定性,给负荷精准调度带来一定困难。多面体不确定集相比于传统盒式不确定集,在描述样本不确定性空间时引入负荷相关系数,能够压缩样本空间不确定测度,提高优化策略的精准性和经济性。通过拉丁超立方抽样模拟分析不同相关性条件下盒式不确定集与多面体不确定集的策略表现,可知基于多面体不确定集建立的负荷群调度优化策略模型能够降低调度成本,甄别优质响应资源,体现负相关负荷的互补性。

关键词:需求响应;拉丁超立方抽样;不确定性;多面体不确定集;相关性

Abstract: With the continuous development of demand response technology, the flexible loads of user-side have shown more schedulable potential. Nevertheless, due to external factors such as user habits, model accuracy, and usage environment, most distributed loads reflect uncertainty, which generates difficulties to accurate load scheduling. Compared with the traditional box-type uncertain set, the polyhedral uncertainty set introduces the load correlation coefficient when describing the sample uncertainty space, compressing the sample space uncertainty measure and improve the accuracy and economy of the optimization strategy. By analyzing the performance of the box-type uncertainty set and the polyhedral uncertainty set under different correlation conditions, it is known that the load group scheduling optimization strategy model based on the polyhedral uncertainty set can reduce the scheduling cost, identify the high-quality response resources, and reflect the complementarity of negative correlation load.

Key words: demand response; Latin hypercube sampling; uncertainty; polyhedron uncertainty set; correlation

中图分类号:TM73;TK018 文献标志码:A

0 引言

随着需求响应技术的不断发展,用户侧柔性资源具备更强的可调度能力,能够主动平抑电网频率波动,削减短时高峰负荷,为电网的安全平稳运行提供有力保障。然而,由于柔性资源的响应水平受制于用户用电模式、负荷模型精确度、外部环境、设备失准率等不确定因素的影响,其实际响应容量具有一定的随机性^[1]。不确定响应带来的响应偏差将弱化或激化响应效果,造成备用资源浪费,并给电力系统运营带来经济损失。因此,分析用户侧资源的响应不确定性,并建立计及不确定性的响应调度决策模型,对提高需求响应项目开展的可靠性与经济性具有重要意义。

由于需求响应根据响应机理不同主要可分为激

励型响应和价格型响应,目前,国内外学者已有针对性地从激励与价格机理出发研究需求响应的不确定性。文献[2]考虑需求响应不确定性分别建立基于激励和价格型的需求响应虚拟电厂,并分析不确定性对调度成本的影响。文献[3]以负荷削减能力和响应不确定性为技术特征研究需求响应随激励水平变化的规律。文献[4]考虑分时电价的不确定性响应机理,建立可中断负荷的模糊机会约束模型,研究用户响应不确定性对日前调度计划的影响。以上研究均以用户消费心理学为基础,并在基本心理学模型上进行模糊和随机改进,在项目实施中具有指导意义。但用户消费心理主观性强,且难以观测获得,工程实用性不强,且研究中没有考虑不同负荷群响应的集群相关性以及激励水平相关性。

考虑到需求响应本质上是模拟用户侧负荷的源性质,用户侧响应不确定性研究也可以借鉴源侧不确定性研究思路。文献[5]—文献[6]对风电出力不确定性建模以及不确定性调度进行了研究。其中,文献[5]对已有的主流不确定集合描述方法进行了总结

收稿日期:2019-04-13;修回日期:2019-07-05

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301100)

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2016YFB0901100)

和分析,并提出椭圆形不确定集模型与多面体不确定集模型。模型中考虑了风电出力预测误差的时间相关性,并建立置信度与不确定集的解析关系式。相比于随机场景优化和模糊优化,不确定集的数学描述方法能够避开维度灾难,具有更强的工程实用性。且多面体不确定集模型采用线性表达,求解速度快,适用性强,适用于集群化响应的不确定性研究。

因此,本文考虑到源荷不确定性的相似性,首先研究需求响应不确定性机理,并在此基础上对多面体不确定集理论模型进行迁移应用,研究柔性资源不确定性的多面体不确定集描述方法,并建立计及响应不确定性的需求响应决策模型,通过随机模拟分析不确定性对需求响应调度成本的影响。最后通过算例验证多面体不确定集在需求响应决策中的有效性,并分析模型参数变化对决策方案和响应效益的影响。

1 需求响应不确定性模型

已有文献一般结合消费心理学模型对需求响应不确定性进行研究^[2-4],采用确定性边界描述响应随机性。然而需求响应的不确定性边界具有一定的模糊性,且分散式负荷聚合后体现一定的集群效应^[7]。建立典型需求响应不确定性模型,数学表达为

$$D = D_1 \cap D_2 \cap D_3 \quad (1)$$

$$D_1 = \{d_{i,\pi} | d_{i,\pi,\alpha} - K\Delta d_{i,\pi} \leq d_{i,\pi} \leq d_{i,\pi,\alpha} + K\Delta d_{i,\pi}, \forall i \in D_L, \forall \pi \in \Pi\} \quad (2)$$

$$D_2 = \{d_{i,\pi} | \sum_{\pi=0}^{\pi_{i,\max}} \frac{|d_{i,\pi} - d_{i,\pi,\alpha}|}{\sigma_{i,\pi}} \leq \Gamma_i^H, \forall i \in D_L\} \quad (3)$$

$$D_3 = \{d_{i,\pi} | \sum_{i=0}^N \frac{|d_{i,\pi} - d_{i,\pi,\alpha}|}{\sigma_{i,\pi}} \leq \Gamma_i^N, \forall \pi \in \Pi\} \quad (4)$$

式中: D 为需求响应不确定性集合; D_1 为负荷群响应度置信区间; D_2 为负荷群 i 的激励水平相关性集合; D_3 为负荷群 i 的集群响应相关性集合; $d_{i,\pi}$, $d_{i,\pi,\alpha}$, $\sigma_{i,\pi}$ 分别为负荷群 i 的在激励水平 π 下的实际响应容量,预估响应容量和响应偏差标准差; K 为给定置信度 α 对应的置信常数; Γ_i^H 为负荷群 i 的补偿不确定性预算; Γ_i^N 为负荷群 i 的集群不确定性预算; D_L 为参与响应的负荷群下标集合; Π 为补偿水平区间, $\Pi = [0, \pi_{i,\max}]$ 。从模型中可以看出,不确定性集的基本特征量为 Γ_i^H 与 Γ_i^N ,不同选取规则对应着不同的不确定集。

2 多面体不确定集描述方法

传统的不确定性分析方法是通过盒式集合描述不确定量的置信空间,方法简单但鲁棒性较差,

且包含较多无效区域。因此可以通过改变 Γ_i^H 与 Γ_i^N 的选取规则压缩不确定集合测度。

假设负荷群 i 的响应偏差 Δd_π 服从期望为 0,协方差为 Ω 的某概率分布^[8]。则 Δd_π 可表示为^[9]

$$\Delta d_\pi = \Omega^{\frac{1}{2}} e \quad (5)$$

式中: e 为随机向量。上式可作进一步变换

$$E = \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} = \Omega^{-\frac{1}{2}} \Delta d_\pi \quad (6)$$

式中: E 为随机向量集合,期望为 0,协方差为单位矩阵,即向量 e 相互独立; n 为参与响应的负荷数。由于 E 中的各随机变量相互独立, E 中各向量和 Δd 中各向量具有相同的分布形式,可以通过给定 E 的分布来间接确定 Δd 的分布形式。

假设给定 E 的置信概率为 α ,并假定 $e_1, e_2, \dots, e_n$ 具有相同的置信概率 β ,则 $\beta^n = \alpha$ 。因此,需求响应偏差向量 Δd 在如下置信区间的置信度为 α 。本文假设激励价格 π 为定值,后文不做特殊说明, Δd 默认等于 Δd_π 。

$$|E| = \left| \Omega^{-\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \vdots \\ \Delta d_n \end{bmatrix} \right| \leq \eta_\beta \quad (7)$$

式中: $\eta_\beta = [\eta_{\beta 1}, \eta_{\beta 2}, \dots, \eta_{\beta i}, \dots, \eta_{\beta n}]$,其中 $\eta_{\beta i}$ 为随机变量 e_i 置信度为 β 时的置信常数。因此,需求响应的多面体不确定性集合为

$$D = \{d_i + \Delta d_i | \Omega^{-\frac{1}{2}} \Delta d \leq \eta_\beta\} \quad (8)$$

图 1 为在相同时间段和激励单价的场景中,盒式不确定集与多面体不确定集针对不同负荷群 k_1 和 k_2 的响应偏差所包围的响应误差区域示意图。考虑到用户在不同激励水平的相关性,误差数据分布与轴线呈现一定夹角。这是由于用户响应习惯存在一定的粘滞性与集群相关性。如图 1 所示,相比于盒式集合描述方法,多面体不确定集能够覆盖更多有效数据,且包含更少的无效区域,提高响应不确定性的刻画精度,压缩不确定性测度。

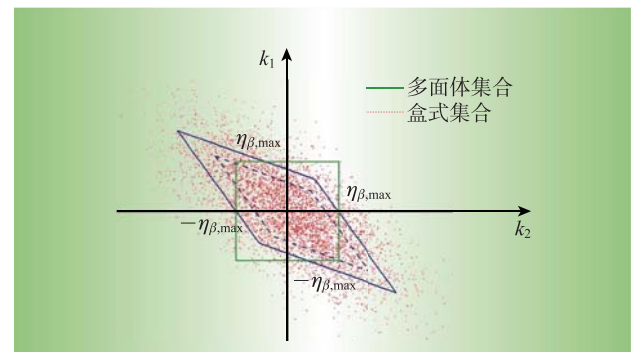


图 1 不同集合描述法对响应不确定性的刻画

Fig. 1 Characterization of response uncertainty by different set description methods

3 基于拉丁超立方采样的不确定性预算分析

观察式(3)一式(4),需求响应不确定性模型的客观描述取决于激励不确定性预算 $\mathbf{I}_i^u$ 和集群不确定性预算 $\mathbf{I}_i^N$ 。实际上, $\mathbf{I}_i^u$ 与 $\mathbf{I}_i^N$ 分别反映了参加响应的负荷在激励水平上的相关性和空间集群上的相关性。

从工程实施的角度很好理解,针对相同类型的用户侧负荷,在相邻的激励水平间隔内,排除概率极低的紧急故障事件,负荷群 i 的响应容量通常不会发生大幅变化,这是因为用户在相同激励水平下的选择具有前后一致性;而不同类型的用户侧负荷响应容量在时间上也存在一定的相关性,例如:空调和电热水器。空调和电热水器的使用高峰不尽相同,往往造成不同时间段的负荷高峰。因此,在研究中需要考虑负荷响应的激励水平相关性和空间集群相关性。

一般文献采用蒙特卡洛模拟方法对负荷响应进行模拟,该方法无法反映各负荷响应容量之间的相关性。因此,本文采用拉丁超立方采样方法进行随机模拟。拉丁超立方采样方法相比于蒙特卡洛模拟方法具备更高的模拟效率,且能够控制样本空间相关性,有利于分析多面体不确定集描述方法与传统描述方法在不同样本相关性条件下的应用效果。

由于控制相关性过程要求被分解矩阵为正定矩阵,而工程实践中,随着维度增大,相关系数矩阵往往不满足正定条件。可以采用频谱分解(spectral-decomposition)法进行修正^[10]。

4 计及需求响应不确定性的用户侧负荷调度决策模型

目前,电网运营商通过与用户签订合同实施负荷资源的日前调度,合同中规定了用户的削减任务(包括削减容量与削减时间)和对应的响应补偿。考虑到不确定性带来的响应风险,电网运营商往往会结合一些确定性响应资源,如储能等,与不确定性资源形成互补。假设电网运营商的总调度成本为 O_{all} , 则

$$O_{\text{all}} = O_s + O_{\text{us}} \quad (9)$$

式中: O_s 为确定性资源调度成本; O_{us} 为不确定性资源调度成本。确定性资源调度成本与用户响应容量线性相关,不确定性资源的调度成本包含调度补偿与不确定性惩罚成本(包括欠响应成本与过响应成本)。因此

$$O_s = \bar{\pi}_s \sum_i d_{s,i} \quad (10)$$

$$O_{\text{us}} = \bar{\pi}_{\text{us}} \sum_j d_{\text{us},j} + \bar{\pi}_{\text{up}} \sum_j \max\{0, \Delta d_{\text{us},j}\} + \bar{\pi}_{\text{op}} \sum_j \max\{0, -\Delta d_{\text{us},j}\} \quad (11)$$

式中: $\bar{\pi}_s$ 为确定性资源的激励补偿单价; $d_{s,i}$ 为确定性资源 i 的签约响应容量; $\bar{\pi}_{\text{us}}$ 为不确定性资源的激励补偿单价; $d_{\text{us},j}$ 为不确定性资源 j 的签约响应容量; $\Delta d_{\text{us},j}$ 为不确定性资源 j 的响应偏差; $\bar{\pi}_{\text{up}}$, $\bar{\pi}_{\text{op}}$ 分别为不确定性资源的单位欠响应成本与单位过响应成本。根据多面体不确定集模型, $\Delta d_{\text{us},j}$ 应满足

$$\left| \boldsymbol{\Omega}^{-\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta d_{\text{us},j} \\ \vdots \end{bmatrix} \right| \leq \eta_{\beta}, \forall j \quad (12)$$

综上,建立计及需求响应不确定性的用户侧负荷调度决策模型为

$$\min O_{\text{all}}(d_s, d_{\text{us}}) = \bar{\pi}_s \sum_i d_{s,i} + \bar{\pi}_{\text{us}} \sum_j (d_{\text{us},j} - \Delta d_{\text{us},j}) + \bar{\pi}_{\text{up}} \sum_j \max\{0, \Delta d_{\text{us},j}\} + \bar{\pi}_{\text{op}} \sum_j \max\{0, -\Delta d_{\text{us},j}\} \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \quad \left| \sum_i d_{s,i} + \sum_j (d_{\text{us},j} - \Delta d_{\text{us},j}) - d_{\text{demand}} \right| \leq \rho$$

$$\left| \boldsymbol{\Omega}^{-\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta d_{\text{us},j} \\ \vdots \end{bmatrix} \right| \leq \eta_{\beta} \quad (14)$$

$$0 \leq d_{s,i} \leq d_{s,i}^{\max}, 0 \leq d_{\text{us},j} \leq d_{\text{us},j}^{\max}$$

式中: d_{demand} 为电网运营商的目标调度容量; ρ 为响应精度约束; $d_{s,i}^{\max}$ 为确定性资源的最大容量; $d_{\text{us},j}^{\max}$ 为不确定性资源的最大容量。模型的决策变量为 d_s 、 d_{us} 。 η_{β} 由历史数据统计分析获得。电力运营商通过合理安排确定性资源与不确定性资源的调度容量实现调度成本的最小化。

5 算例分析

在算例中,假设共有5个具有不确定性响应特性的负荷群,其响应偏差服从高斯分布。不失一般性,假设各负荷群的可响应容量均为 1.28×10^4 kWh,单位响应容量为 100 kWh,响应目标为 4.5×10^4 kWh。具体参数如表1所示。

表1 不同类型用户响应参数表
Table 1 Parameters of different users

用户序号	$d_{\text{us}}^{\max}$ /kWh	$\Delta d_{\text{us},j} / d_{\text{us},j}$
1	1.28×10^4	$N(0, 0.04^2)$
2	1.28×10^4	$N(0, 0.04^2)$
3	1.28×10^4	$N(0, 0.06^2)$
4	1.28×10^4	$N(0, 0.06^2)$
5	1.28×10^4	$N(0, 0.08^2)$

计及不确定性需求响应决策模型参数 d_{demand} 为 4.5×10^4 kWh, π_{us} 为5美元, π_{up} 为32美元, π_{op} 为28美元。对模型准确性和有效性进行验证。首先假设不同负荷群之间具有相同的相关系数,相关系数取值空间为

{-0.3,0,0.3,0.5,0.7,0.9},观察模型在不同相关性条件下的优化表现。首先基于不同的相关性条件生成多面体不确定集,并对不确定集中可能出现的用户随机响应场景进行采样,采样规模为 1×10^5 ;采用遗传算法生成5个用户的初始种群,计算种群在 1×10^5 个随机响应场景下的平均成本,以该平均成本最小化作为用户签约策略的优化目标,通过多次种群间的交叉变异,选择成本平均值最低的种群作为该相关性条件下的最优用户签约容量方案,优化结果如图2所示。不同相关性条件下,优化得到的各用户响应容量签约方案如表2所示。

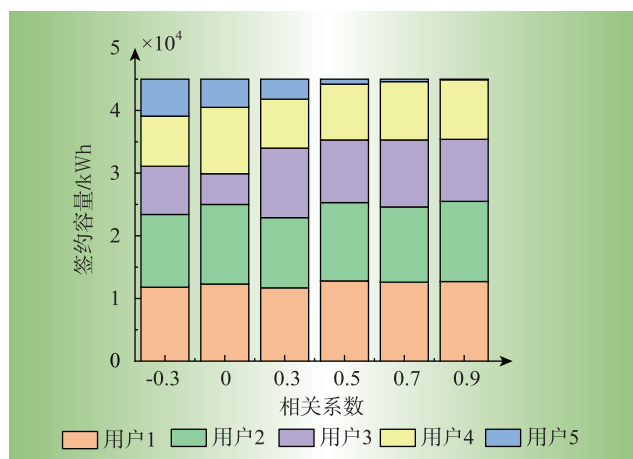


图2 基于多面体不确定集的优化策略

Fig. 2 The optimal strategy based on polyhedron uncertainty set

表2 不同相关系数下用户签约容量
Table 2 Signed capacity of users under different coefficient conditions

	$\times 10^4$ kWh					
用户	-0.3	0	0.3	0.5	0.7	0.9
1	1.18	1.23	1.17	1.28	1.26	1.27
2	1.16	1.27	1.12	1.25	1.20	1.28
3	0.77	0.49	1.11	1.00	1.07	0.99
4	0.80	1.06	0.78	0.89	0.93	0.95
5	0.59	0.45	0.32	0.08	0.04	0.01

纵向观察图2,在相同相关性条件下,用户1、2的签约容量在整体响应容量中占有较大比重,用户3、4其次,用户5最少,这是由于用户1、2相较于用户3、4具有更小的偏差分布方差,响应质量更好,用户5具有最差的响应质量,因此签约容量最少;横向观察,随着相关性由负相关变为正相关,用户1、2比重逐渐增大并达到上限,用户5的比重越来越小,这是由于正相关性增强导致偏差分布方差较大的用户的偏差影响程度提高。因此,采用多面体不确定集的需求响应不确定性模型在优化过程中具有甄别特性,能够利用用户响应行为的相关性调整签约策略,优化策略和目标结果更加准确。

假设各用户间具有不同相关系数的仿真场景,对模型的客观性加以检验。用户相关系数矩阵为

$$\text{corr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.9 & -0.9 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.9 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

经过频谱分解法修正得到正定相关系数矩阵为

$$\text{corr}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.72 & -0.72 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.72 & 0 & 1 & -0.06 & 0 \\ -0.72 & 0 & -0.06 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其余模型参数设置和计算方法与前文一致,优化得到基于多面体不确定集得到的优化策略:用户1、2、3、4、5的签约容量分别为 1.24×10^4 kWh、 1.27×10^4 kWh、 0.52×10^4 kWh、 1.21×10^4 kWh、 0.26×10^4 kWh。

由于用户1、2响应质量较高,因此在签约选择中优先级较高,但是由于用户1与用户3具有较强的正相关性,与用户4具有较强的负相关性,在签约过程中将优先考虑用户4,实现用户1与用户4的偏差互补。综上所述,多面体不确定集能够在优化过程中反映出相关样本之间的趋同性和互补性,通过打包签订具有负相关性的用户降低响应成本,优化策略构成。

为验证多面体不确定集优化模型在处理需求响应不确定性优化决策方面的先进性,基于不同相关性样本空间对不同建模方法进行横向对比。目前,已有的不确定性建模理论主要有需求价格弹性理论,统计分析理论和消费者心理理论,其不确定性建模本质均为根据样本数据,采用区间估计法建立盒式不确定集并进一步优化分析^[7]。因此,建立样本空间,样本规模为 1×10^5 ,分别建立盒式不确定集与多面体不确定集并进行优化求解,以样本空间的平均成本作为优化目标,基于两种不确定集的优化结果如图3所示。

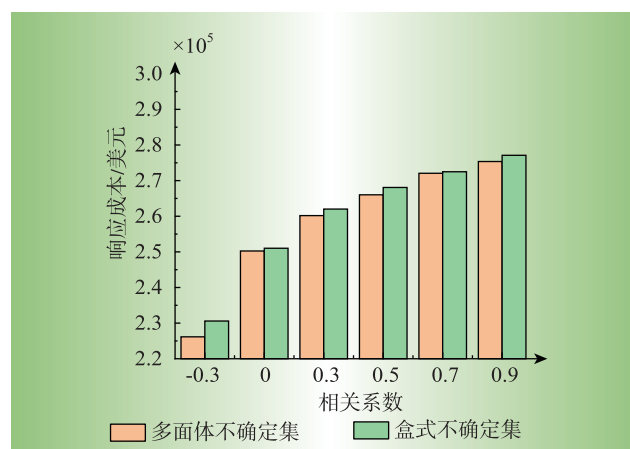


图3 不同集合描述法优化结果对比

Fig. 3 Comparison of optimization results with different set description methods

从图3中可以看出,相较于盒式不确定集,采用多面体不确定集描述不确定空间得到的优化结果在不同相关性样本空间中,均得到较低的响应成

本,即优化策略具有良好的稳定性。整体而言,基于2种不确定性描述方法所得到的优化策略,其响应成本均随样本正相关性增强而提高。当样本呈现负相关时,响应成本均明显降低。以相关性为0.7时的用户签约方案为例进行稳定性验证,对样本空间进行100次规模为1 000的随机取样,计算每一次仿真的平均响应偏差,计算结果如图4所示。

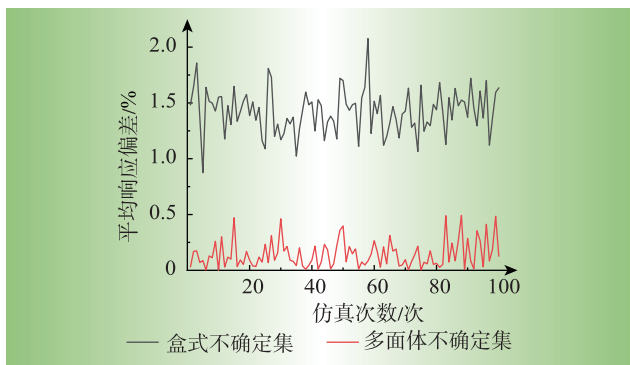


图4 不同集合描述法响应偏差对比

Fig. 4 Comparison of response deviation with different set description methods

从图4中可以看出,相比于传统盒式不确定集,基于多面体不确定集的优化签约方案在面对用户随机响应情形时具有良好的稳定性,且整体响应偏差与偏差变化幅度更小,对电网平稳安全运行具有积极作用。综上所述,基于多面体不确定集的负荷群调度优化策略模型能够根据不同相关性条件甄选响应用户制订签约方案,体现负相关用户的响应互补优势,且相较于传统盒式不确定集优化方案具有更小的响应偏差和更好的稳定性。

6 结束语

本文采用多面体不确定集描述方法,建立了分散式负荷需求响应不确定性模型,并在此基础上建立计及响应不确定性的负荷群签约容量优化决策模型。通过拉丁超立方抽样模拟分析,可知相较于传统的盒式不确定集模型,基于多面体不确定集得到的优化策略在不同相关性条件下均呈现更佳的经济性、适应性和稳定性。此外,通过分析不同相关性条件下响应成本与响应策略变化,可知响应成本随着用户响应正相关性增强而提高,且优化策略提示决策者优先选择负相关用户以及偏差分布方差较小用户。未来将结合源网双侧,进一步研究多面体不确定集在传统鲁棒不确定调度模型中的改进与应用。

参考文献:

[1] 刘国辉,赵佳,孙毅. 基于模糊优化集对分析理论的需求

响应潜力评估[J]. 电力需求侧管理,2018,20(6):1-5.

LIU Guohui, ZHAO Jia, SUN Yi. Potential evaluation of demand response based on fuzzy optimization of set pair analysis[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6):1-5.

[2] 牛文娟,李扬,王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3 630-3 637.

NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3 630-3 637.

[3] 董振斌,李义容,李海思. 考虑风电功率与需求响应不确定性的备用容量配置[J]. 电力需求侧管理,2017,19(1):29-34,44.

DONG Zhenbin, LI Yirong, LI Haisi. Reserve capacity configuration considering uncertainty of wind power and demand response[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(1):29-34, 44.

[4] 孙宇军,李扬,王蓓蓓,等. 计及不确定性需求响应的日前调度计划模型[J]. 电网技术,2014,38(10):2 708-2 714. SUN Yujun, LI Yang, WANG Beibei, et al. A day-ahead scheduling model considering demand response and its uncertainty [J]. Power System Technology, 2014, 38(10):2 708-2 714.

[5] 刘斌,刘锋,王程,等. 适用于鲁棒调度的风电场出力不确定性集合建模与评估[J]. 电力系统自动化,2015,39(18):8-14.

LIU Bin, LIU Feng, WANG Cheng, et al. Uncertainty set modeling and evaluation of wind farm power output for robust dispatch [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18):8-14.

[6] 原睿萌,范绚然,姬广龙,等. 考虑响应量与风电出力相关性的需求响应优化调度研究[J]. 电力需求侧管理,2018,20(6):6-11.

YUAN Ruimeng, FAN Xuanran, JI Guanglong, et al. Study on the optimal dispatching of hybrid type demand response load considering the correlation between response quantity and wind power output [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6):6-11.

[7] 罗纯坚,李姚旺,许汉平,等. 需求响应不确定性对日前优化调度的影响分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(5):22-29.

LUO Chunjian, LI Yaowang, XU Hanping, et al. Influence of demand response uncertainty on day-ahead optimization dispatching [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5):22-29.

[8] 曾丹,姚建国,杨胜春,等. 计及价格型负荷响应不确定性的概率潮流计算[J]. 电力系统自动化,2015,39(20):66-71.

ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Online risk assessment and coordinated decision scheme for emergency load shedding control [J]. Automation of Power Systems, 2015, 39(20):66-71.

[9] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

[10] REBONATO R, PETER J. The most general methodology to create a valid correlation matrix for risk management and option pricing purposes [J]. Social Science Electronic Publishing, 1999, 32(5):1-11.

(责任编辑 邵海雯)