

# 考虑用户舒适度和经济性的负荷聚合商调度决策分析

张思<sup>1</sup>,金利祥<sup>2</sup>,杨晓雷<sup>2</sup>,韩中杰<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司,杭州 310007;2. 国网浙江省电力有限公司 嘉兴供电公司,  
浙江 嘉兴 314000)

**Scheduling decision of load aggregators considering user comfort and economy**

ZHANG Si<sup>1</sup>, JIN Lixiang<sup>2</sup>, YANG Xiaolei<sup>2</sup>, HAN Zhongjie<sup>2</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;2. Jiaxing Power Supply  
Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaxing 314000, China)

**摘要:**负荷聚合商调度决策过程中,忽略底层用户舒适度或依据主观偏好确定舒适度会造成用户不配合,导致调度结果不理想。引入模糊优化解决调度决策中经济性与舒适度之间的冲突,首先基于博弈理论建立权衡用户舒适度和经济成本调度的聚合商决策模型。其次,为了加快博弈模型的求解速度,对博弈模型进行线性化转换并制定了求解算法。最后,通过算例验证了决策模型的有效性,同时对调度结果进行多角度的分析,验证了模糊优化边界条件,分析了舒适度阈值的影响以及储能的替代影响。

**关键词:**负荷聚合商;用户舒适度和经济性;模糊优化;博弈模型

**Abstract:** In the scheduling decision-making process of load aggregator, ignoring user comfort level or determining user comfort level based on subjective preference will lead to non-ideal scheduling model results. Fuzzy optimization is introduced to solve the conflict between economy and comfort in scheduling decisions. Based on game theory, an aggregator decision model is established to balance user comfort and economic cost scheduling. At the same time, in order to speed up the solving speed of the game model, game model is linearized and solving algorithm is formulated. Finally, an example is given to verify the validity of the decision model. Meanwhile, the scheduling results are analyzed from multiple angles to verify the fuzzy optimization boundary conditions and influence of comfort threshold and energy storage substitution are analyzed.

**Key words:** load aggregators; user comort and economy; fuzzy optimization;game model

## 0 引言

近年来,随着智能电网和电力市场的发展,需求响应(demand response, DR)在电力市场中的作用越来越大,面向灵活用电资源的需求响应已成为发展趋势<sup>[1]</sup>。需求侧资源由于其自身的经济性和灵活性等特点,已成为一种宝贵的可调度资源<sup>[2]</sup>,但其往往存在体量小、过于分散等问题。负荷聚合商(load aggregator, LA)的出现,解决了该问题。DR 联营后可帮助 DR 资源更好地参与电力市场获取更高地利润,也可帮助配电网运营商(distribution network operator, DSO)更好地利用 DR 资源优化负荷曲线,实现电能转移<sup>[3]</sup>。

DR 资源参与电网互动的过程中,建立调度决策

模型是首要问题,部分文献对此展开了研究。文献[4]总结了国外 LA 关于运营机制、调度和控制策略的技术,详细说明了 LA 与电力市场其他主体的区别。文献[5]考虑了“日前”、“日内”、“实时”的激励型 DR 资源,实现了日前-日内-实时的 DR 资源多时段滚动调度。文献[6]考虑了分时电价对负荷曲线的优化作用,同时也分析了 DR 资源参与备用后,系统的安全性和经济性的提升效果,通过计及 DR 资源的发电调度计划模型,体现 DR 资源和电价策略的互补性。

上述基于 DR 资源的调度问题,都是以调度成本最小化为目标,制定调度策略。DR 调度问题本质上是通过 LA 进行激励设定,从而调整底层 DR 用户的用能需求,但在底层用户调整用能需求的过程中,底层用户的用能舒适度是无法被忽略的。现有研究也对此进行了建模,然而大多数研究将舒适度转化为调度决策模型的最大限度约束。例如,文献

收稿日期:2023-05-21;修回日期:2023-06-04

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JX2000K8)

[7—8]通过设置用户的最小用能满意度指标,将DR用户的舒适度转化为调度优化模型的边界约束。但这种方式,变相地将用户的舒适度限制在最小边界,可能造成用户舒适度过低而选择今后不配合LA的电网互动业务。部分研究通过权重系数在DR调度模型的目标设置中考虑用户舒适度。例如,文献[9—10]将舒适度量指标与经济成本指标进行同量纲规格化,从而根据DR调度模型的偏好设置权重系数,实现考虑舒适度和经济成本的DR调度模型。但是这类模型的调度结果依赖于决策者权重系数的选择,不同权重系数的调度结果差异明显,很难达到舒适度和经济成本的综合最优。

模糊优化可以在调度模型的多个目标间建立博弈关系,通过博弈的思想将多目标问题转化为单目标问题<sup>[11—12]</sup>,从而实现调度结果中多个目标的均衡。文献[13—17]通过多个目标的隶属度函数将调度模型模糊化,从而实现多目标之间的均衡,例如,能耗成本和碳减排、购电成本与发电煤耗、运行成本和网损成本之间的均衡。

因此,本文在DR调度决策过程中引入模糊优化,建立经济成本和用户舒适度的博弈关系,以变量形式将多目标问题转化为单目标问题,实现经济成本和舒适度的共赢。首先,本文基于模糊优化建立考虑用户舒适度和最小经济成本的DR调度决策模型,该模型不需提前确定用户舒适度和经济成本的权重关系,而以模糊变量的方式展现。其次,针对调度模型中模糊变量博弈过程的非线性关系,进行线性化转变,从而制定DR调度模型的求解算法。最后,分别就模糊优化边界条件、舒适度阈值影响分析、可替代品成本影响分析进行了算例仿真,多角度分析了调度结果。

## 1 LA 经济调度模型

本节建立的LA经济调度模型是在签订一定数量DR响应量和响应价格合同后,考虑DR调度的不同成本,以成本最小化为目标进行的经济调度模型。

### 1.1 目标函数

LA以最小经济成本C为目标,考虑购电成本、DR激励收益,目标函数如下

$$C(r_j) = \min_{r_j} \sum_j \{c^{\text{EM}}(d_j - r_j) - p_j^{\text{DR}} r_j\} \quad (1)$$

式中: $c^{\text{EM}}$ 为LA在批发市场中的购电价格; $p_j^{\text{DR}}$ 为第j个DR资源的响应激励; $d_j$ 为DR用户j的基础负荷; $r_j$ 为DR用户j的响应负荷; $c^{\text{EM}}(d_j - r_j)$ 为LA的

购电成本; $p_j^{\text{DR}} r_j$ 为LA的激励收益。

### 1.2 约束条件

LA调度时需考虑与DR用户签订的合约约束,本文假设LA在本次调度前与DR用户签订了响应负荷的单次最大可中断量,以及与电网调度机构签订了的最小响应总量。

(1) DR用户的单次最大可中断约束

$$r_j \leq \beta_j d_j \quad \forall j \quad (2)$$

式中: $\beta_j$ 为LA与DR用户签订的最大可中断率,即DR响应量存在一个上限。

(2) LA合约响应约束

$$\sum_j r_j \geq T_{\text{DR}} \quad (3)$$

式中: $T_{\text{DR}}$ 为LA与电网运营商签订的最小响应量要求。

(3) 变量非负性约束

为了突出算例分析结果,本模型仅考虑DR响应量为正,即削减负荷的情况,但本文方法同样适用于负荷增加的情况。

$$r_j \geq 0 \quad \forall j \quad (4)$$

### 1.3 储能替代性模型

从负荷转移角度看,储能的作用与DR资源类似,但是储能存在投资成本和损耗成本,其调度成本一般要高于DR资源,本文为了分析储能对DR资源的替代性影响,在式(1)—式(4)中增加了储能,模型如下

$$C(r_j, e_j) = \min_{r_j, e_j} \sum_j \left\{ c^{\text{EM}}(d_j - r_j) - p_j^{\text{DR}} r_j + c^{\text{EM}} e_j \right\} \quad (5)$$

$$\text{s.t. } r_j \leq \beta_j d_j \quad \forall j \quad (6)$$

$$\sum_j (r_j + e_j) \geq T_{\text{DR}} \quad (7)$$

$$r_j \geq 0 \quad \forall j \quad (8)$$

$$e_j \geq 0 \quad \forall j \quad (9)$$

式(5)表示LA考虑通过价格 $C^{\text{EM}}$ 购买储能 $e_j$ 进行需求响应,此时LA的响应量从式(1)中的 $\sum d_j$ 变成了 $\sum d_j + \sum e_j$ ;式(7)表示当响应量不足时,LA将不得不通过购买储能来满足最低的响应需求;式(9)表示本文仅考虑储能的充电作用,即对应于DR负荷的削减。

## 2 基于模糊优化的LA调度决策模型

DR响应量越大,用户满足日常需求的舒适度越低。平衡调度策略的经济成本和DR用户的舒适度意义重大。

## 2.1 模糊优化

模糊优化是相对于确定性优化而建模产生的<sup>[18]</sup>。Bellman 和 Zadeh 于 20 世纪 70 年代提出模糊决策的概念和模糊环境下的决策模型<sup>[19]</sup>。模糊优化的基本思想是通过隶属度函数将模糊优化的决策过程转化为基于博弈思维的确定性优化过程<sup>[20-21]</sup>。模糊优化本质是根据原问题的要求,得到各个指标平衡的最优解,其基本步骤如下:

- (1) 确定可选解集  $X$ , 即确定决策变量。
- (2) 构造用于表达每个可选解  $X$  的结果函数,即构建每个决策变量的目标和约束。
- (3) 定义一个兼容性函数,用于表示可选解  $X$  与模糊目标和约束的兼容程度。
- (4) 构造一个转换函数,将原模糊优化问题基于兼容性函数转化为确定性模型。

## 2.2 基于模糊优化的舒适度与经济性博弈模型

LA 调度决策模型的模糊性体现在 DR 用户舒适度和经济成本间的偏好程度,传统的多目标优化通过主观权重系数确定多目标优化结果,存在主观性和不可靠性,因此本文采用模糊优化求解兼顾用户舒适度和经济成本的 LA 调度决策模型。

### 2.2.1 确定可选解集

对应 LA 而言,其调度的 DR 越多,LA 收到的激励收益越多,购电成本越小。但 DR 调度量会影响 DR 用户的用能舒适度。因此,本文将模糊优化的可选解集确定为两个优化目标问题,即调度经济成本和用户舒适度,两个目标的共同决策变量为 DR 用户  $j$  的响应量  $r_j$ 。

### 2.2.2 构造结果函数

DR 用户的经济调度模型如式(1)—式(4)所示,因此本文模糊优化经济调度目标下的结果函数即为式(1)—式(4)。同时,用户的用能舒适度与负荷削减量  $r_j$  呈现负线性相关,即削减量越大,舒适度越差。因此,DR 用户舒适度问题目标函数和约束构造如下

$$S(r_j) = \sum_j s_j^{\text{DR}}(r_j) \quad (10)$$

$$\text{s.t. } s_j^{\text{DR}}(r_j) = \min\{\tau_j d_j, d_j - r_j\} \quad (11)$$

$$r_j \leq \beta_j d_j \quad \forall j \quad (12)$$

式中:  $s_j^{\text{DR}}(r_j)$  为 DR 用户  $j$  用能舒适度;  $S(r_j)$  为 LA 所收集到的用户舒适度指标,即各个 DR 用户舒适度的累和;  $\min\{\}$  项为对于 DR 用户来说,用能舒适度存在饱和区。当用能  $d_j - r_j$  大于  $\tau_j d_j$  时,并不会为用户带来额外的舒适度;  $\tau_j d_j$  为用户用能的饱和区。

### 2.2.3 构造兼容函数

根据模糊优化的一般兼容函数构造,经济性结果函数的兼容函数可以通过隶属度函数构造,表示如下

$$\mu_C(r_j) = \frac{C_{\max} - C(r_j)}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (13)$$

式中:  $C_{\max}$  为式(1)中 DR 资源仅按照最低边界进行调度时的经济成本;  $C_{\min}$  为式(1)中 DR 资源自由调度时的经济成本;  $C_{\max}, C_{\min}$  分别为经济调度目标下的结果函数的最差值、最优值。

同时,经济调度目标兼容函数与结果函数目标  $C(r_j)$  的关系可以通过图 1 表示。

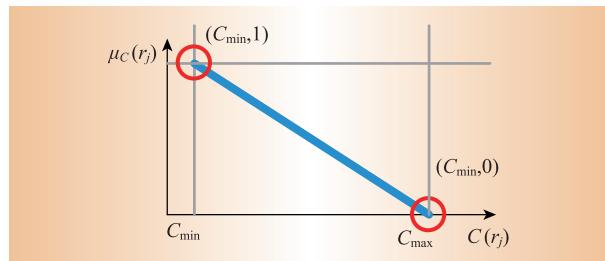


图 1 经济性调度的兼容函数

Fig. 1 Compatibility functions for economic scheduling

$\mu_C(r_j)$  为当前经济调度结果距离经济调度最优值的贴近程度,当 DR 调度量越大,即  $C(r_j)$  值越小时,表示经济目标距离最优解越贴近,最高可以为 1,即达到最优经济调度。

相似地,用户舒适度的兼容函数也可以通过隶属度函数构造,如下所示

$$\mu_S(r_j) = \frac{S(r_j) - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \quad (14)$$

式中:  $S_{\max}$  为式(10)中 DR 资源进行自由调度时的舒适度;  $S_{\min}$  为式(10)中 DR 资源按照最大值边界式(2)进行调度时的用户舒适度。 $S_{\max}$  和  $S_{\min}$  分别为舒适度调度目标下的结果函数的最优值和最差值,舒适度目标兼容函数与结果函数目标  $S(r_j)$  的关系可以通过图 2 表示。

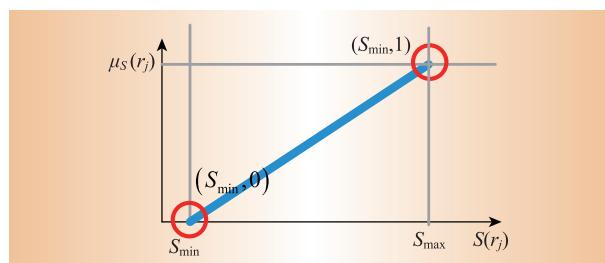


图 2 DR 舒适度的兼容函数

Fig. 2 Compatibility functions for DR comfort level

该兼容函数表示当前舒适度调度结果距离舒适度最优值的贴近程度,当DR调度量越大,即 $S(r_j)$ 值越大时,表示舒适度目标距离最优解越贴近,最高可以为1,即达到最优舒适度调度。

#### 2.2.4 构造转换函数

通过2.2.3节,可以构造兼顾用户舒适度和经济成本的模糊问题,模型如下

$$\max \mu = \max \{\min\{\mu_c, \mu_s\}\} \quad (15)$$

$$\text{s.t. } \mu_c(r_j) = \frac{C_{\max} - C(r_j)}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (16)$$

$$\mu_s(r_j) = \frac{S(r_j) - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \quad (17)$$

$$C(r_j) = \sum_j \{c^{\text{EM}}(d_j - r_j) - p_j^{\text{DR}}r_j\} \quad (18)$$

$$S(r_j) = \sum_j \min\{\tau_j d_j, d_j - r_j\} \quad (19)$$

$$\begin{cases} r_j \leq \beta_j d_j & \forall j \\ \sum_j r_j \geq T_{\text{DR}} \\ r_j \geq 0 & \forall j \end{cases} \quad (20)$$

式(15)的目的在于使得经济成本兼容函数 $\mu_c$ 和舒适度函数 $\mu_s$ 相互博弈,并且通过博弈过程得到最优选择,即经济性目标和舒适度的均衡。此时,LA实现基于模糊优化的兼顾舒适度和经济性的DR调度策略。

### 3 求解算法

式(15)与式(19)均存在 $\min\{x, y\}$ 项,模型为非线性,直接求解较为困难。因此本文采用Big-M法对该非线性项 $\min\{x, y\}$ 项进行线性化处理如下

$$z = \min\{x, y\} \quad (21)$$

$$z \leq x \quad (22)$$

$$z \leq y \quad (23)$$

$$z \geq x - Mw \quad (24)$$

$$z \geq y - M(1-w) \quad (25)$$

式中: $M$ 为一个极大的正常数; $w$ 为一个0~1变量。

同样,采用Big-M法对式(15)、式(19)进行线性化,最终的模糊优化模型为

$$o = \max \mu \quad (26)$$

$$\text{s.t. } \mu \leq \mu_c \quad (27)$$

$$\mu \leq \mu_s \quad (28)$$

$$\mu \geq \mu_c - Mw \quad (29)$$

$$\mu \geq \mu_s - M(1-w) \quad (30)$$

式中: $o$ 为最优目标值。

最终的模糊优化模型,可以通过Gurobi等求解

器进行高效求解,具体过程如下:①读入DR的基本参数和系统所需需求响应量等参数;②求解式(1)—式(4),确定经济性目标下的最优成本 $C_{\min}$ 和最差成本 $C_{\max}$ ;③求解式(10)—式(12),确定舒适度目标下的最优舒适度 $S_{\max}$ 和最差舒适度 $S_{\min}$ ;④基于 $C_{\min}$ 、 $C_{\max}$ 和 $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$ 分别构造经济性和舒适度的兼容函数 $\mu_c$ 和 $\mu_s$ ,求解式(26)—式(30);⑤求解得到兼顾舒适度、经济性的DR调用量结果。

整体求解过程如图3所示。

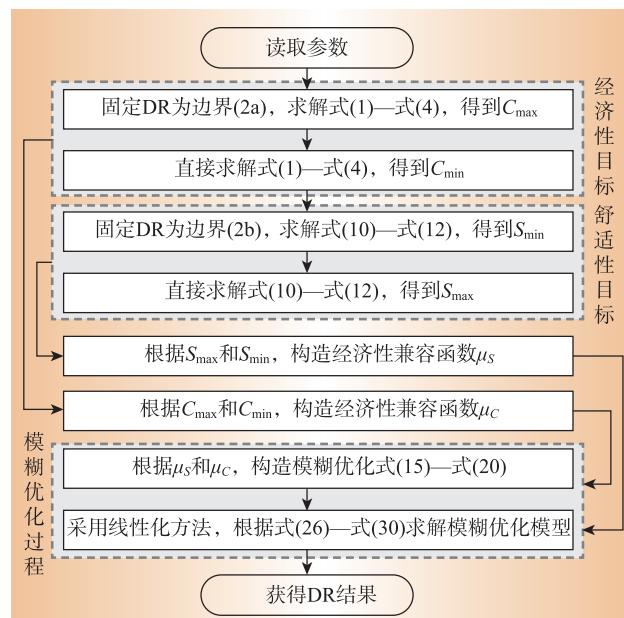


图3 模型求解流程

Fig. 3 Model solving process

### 4 算例分析

算例假设LA拥有3个DR资源,具体参数如表1所示。LA在批发市场中的购电价格为15美元/MW,需求响应激励分别为8、10、8美元/MW。LA与电网调度机构签订的合约,最低需求侧资源供给量为10%的总DR资源负荷。

表1 负荷参数

Table 1 Load parameters

DR编号	负荷大小/MW	最大可中断率 $\beta / \%$	舒适度阈值系数 $\tau / \%$
1	100	50	45
2	150	60	55
3	100	50	65

#### 4.1 用户舒适度与经济性均衡结果分析

在不考虑储能参与的情况下,考虑用户舒适度和经济成本的LA决策结果如表2所示。本文模型

下,模糊优化使得在经济性目标与最优值贴近度为89.3%的同时,也能保证舒适度与最优舒适度目标的贴近程度为89.3%。本文通过模糊优化过程中经济性目标和舒适度目标之间的博弈,实现了兼顾经济性和用户舒适度的最优决策。表3给出了模糊优化过程中经济性目标和舒适度目标的最优值和最差值。

表2 模糊优化决策结果

Table 2 Fuzzy optimization decision results

DR 编号	响应结果/ MW	$\mu_c$ /%	$\mu_s$ /%	经济成本/ 美元	舒适度/ MW
1	50.00				
2	88.08	89.3	89.3	1 092	171.92
3	34.92				

表3 经济性目标和舒适度目标的最优值和最差值  
Table 3 Optimal value and worst value of economic and comfort goals

经济性目标/美元		舒适度目标/MW	
$C_{\max}$	$C_{\min}$	$S_{\max}$	$S_{\min}$
4 375	700	192.5	0

对比表2与表3可以发现,与权重系数法使得各个目标的权重之和为100%不同,本文实现了在经济性目标达到最优值的89.3%的同时,舒适性目标也达到了最优值的89.3%,不再局限于两个目标和为100%的权重法限制。因此,本文方法的优越性可以被证明,可以同时使得经济性和舒适度达到较优结果,通过模糊优化的博弈过程,达到多目标之间的多赢结果。

为更好地表现在舒适度和经济成本间实现基于模糊优化的博弈过程,图4给出LA面临的多问题场景决策的边界条件,当舒适度条件在给定限值前提下,经济目标兼容函数所能达到的最优值,即对式(15)进行改变,舒适度兼容函数值转化为边界约束条件,经济性兼容函数值作为优化目标。当舒适度的最小边界确定为[0.8,1.0]的区间时,以经济性为目标的优化会寻找到该经济性边界下的最优经济性调度结果。从图4可以看出,随着舒适度兼容函数值的提高,经济性兼容函数值会减少,由式(16)可知,模糊优化目标  $\mu = \min\{\mu_c, \mu_s\}$ ,因此两者仅在0.893处达到平衡,并且均衡值是模糊优化目标  $\mu$  的最大值,即本文算例结果,表明本文求解的模糊优化过程的确使得舒适度目标和经济性目标同时达到对方最优的博弈结果。

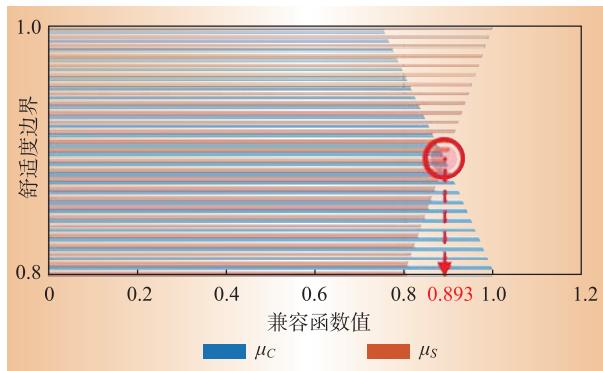


图4 DR 调度决策者边界条件

Fig. 4 Boundary condition of DR scheduling decision maker

#### 4.2 舒适度阈值影响分析

本文应用模糊优化的一大创新点是通过经济成本和舒适度博弈的方式,同时实现成本和用户舒适度的最优化。为了更好地展示该优化的效果,本节调整DR用户的舒适度阈值,分析不同阈值对于优化结果的影响。舒适度阈值为用户用能的饱和边界,超过舒适度阈值后,用户用能不再能带来舒适度的增加。本文按照5%的比例调整舒适度阈值系数,如表3所示。舒适度阈值越高表示用户舒适度上限越高,但是LA的调度成本越高。

表3 用户舒适度阈值设置

Table 3 User comfort thresholds setting

舒适度阈值系数 $\tau$	舒适度阈值				
	算例1	算例2	算例3	算例4	算例5
1	35	40	45	50	55
2	45	50	55	60	65
3	55	60	65	70	75

注:算例3为本文的算例的基本参数。

图5展示了不同用户舒适度阈值设置下,成本的兼容性值  $\mu_c$ 、用户舒适度的兼容值  $\mu_s$ 、总购买成本的变化以及舒适度的变化,5个算例分别对应表3中5种舒适度阈值的设定。图5(a)可以看到,随着用户舒适度阈值的增加,LA调度难度增加,因此经济性成本不断上升,经济性兼容函数逐渐远离最优值。同时,随着用户舒适度阈值的增加,用户可以获得的舒适度上限增加,因此产生舒适度逐渐上升,舒适度兼容函数逐渐接近最优值。在此情况下,经济性目标和舒适度目标进行新的博弈,得到均衡解,如图5(b)所示。均衡解下,新的博弈结果兼容值逐渐下降,这是由于随着舒适度阈值的提升,并且调度成本的最大值  $C_{\max}$  没有松弛,LA单位功率调度成本显著增加,而用户舒适度上限虽然增加,但是相对的舒适度兼容值的上限  $S_{\max}$  也得到了增加,单位功率获得的舒适度

兼容值开始下降。

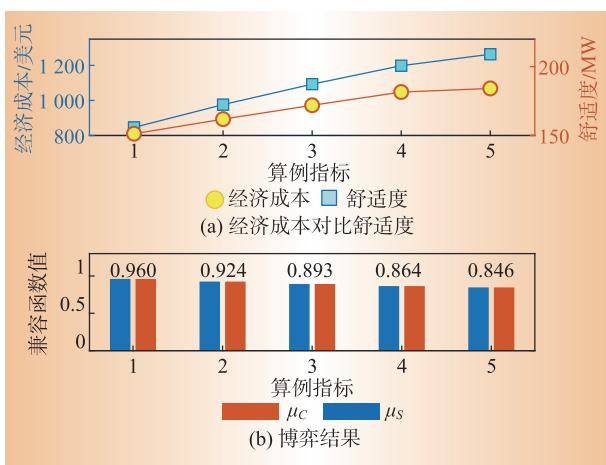


图5 不同舒适度阈值的影响  
Fig. 5 Affect of different comfort thresholds

#### 4.3 可替代品成本影响分析

从负荷转移角度看,储能的作用与DR资源类似,在市场中扮演DR资源的替代品,但是储能存在投资成本和损耗成本,一般其调度成本要高于DR资源,为了分析储能对DR资源的替代性影响,本文在LA经济成本模型中考虑储能的参与,通过式(5)取代式(1),式(6)一式(9)取代式(2)一式(4),成本中相应增加了储能的成本。当储能成本不同时,DR用户舒适度、LA的经济成本博弈关系会发生相对改变。因此,本节讨论储能成本的不同对于本文模型的影响。不同储能成本下的经济性和用户舒适度的均衡决策结果如表4所示。

表4 不同成本影响分析

Table 4 Impact analysis of different costs

储能服务价格/(美元·MW <sup>-1</sup> )	$\mu_c$	$\mu_s$
18	0.893	0.893
13	0.853	0.853
10	0.794	0.794
6	0.682	0.682

由表4可知,随着储能单位价格的降低,经济性、舒适度满意度在降低。当储能价格高于市场购电价格时(如表4的第一行),储能不会影响到DR的调度运行和LA的策略(表4第一行的结果同表2一致),但是当储能的服务价格低于市场购电价格时,储能的出现使得经济性目标 $C_{min}$ 值降低。虽然储能的实际最终优化中始终未被调用,但其成本的高低构成了一定的可置信威胁,计入了成本兼容度函数的计算。当成本 $C_{min}$ 减小,原成本兼容度变大,使得DR继续调用寻找更高的平衡兼容度值,从而导致经济性和舒适度满意度的降低。

## 5 结束语

本文考虑到目前LA调度过程中,采用主观权重或者约束限制对DR用户的舒适度进行建模时存在缺陷,无法实现DR调度的经济性和舒适度的平衡,因此引入模糊优化,在DR调度决策过程中,建立起经济成本和用户舒适度的博弈关系,实现经济成本和舒适度的共赢。同时,算例仿真验证了如下结论:

- (1) 存在一个最优舒适度、经济性满意度值,使得DR用户舒适度、经济性目标达到均衡。
- (2) 用户舒适度阈值的降低,会使LA调度决策中的舒适度、经济性重新博弈,并且博弈后的兼容函数会得到提高,双方可以均衡到一个更优的解。
- (3) 储能成本降低虽然不会影响到调度成本的显著变化,但其存在会对兼容值产生影响,会降低舒适度、经济性的兼容值。D

## 参考文献:

- [1] 田世明,王蓓蓓,张晶.智能电网条件下的需求响应关键技术[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3 576-3 589.  
TIAN Shiming, WANG Beibei, ZHANG Jing. Key technologies for demand response in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3 576-3 589.
- [2] 祁兵,郑顺林,孙毅,等.考虑需求侧动态及耦合特性的激励型综合需求响应优化建模[J].中国电机工程学报,2022,42(5):1 783-1 799.  
QI Bing, ZHENG Shunlin, SUN Yi, et al. A model of incentive-based integrated demand response considering dynamic characteristics and multi-energy coupling effect of demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5):1 783-1 799.
- [3] 王峴,王留晖,张少华,等.风电商与DR聚合商联营对电力市场竞争的影响[J].电网技术,2018,42(1):121-127.  
WANG Xian, WANG Liuhui, ZHANG Shaohua, et al. Impacts of cooperation between wind power producer and DR aggregator on electricity market equilibrium[J]. Power System Technology, 2018, 42(1):121-127.
- [4] 高赐威,李倩玉,李慧星,等.基于负荷聚合商业务的需求响应资源整合方法与运营机制[J].电力系统自动化,2013,37(17):78-86.  
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Demand response resource integration method and operation mechanism based on load polymer business [J]. Automation

- of Electric Power Systems, 2013, 37(17):78–86.
- [ 5 ] 包宇庆,王蓓蓓,李扬,等.考虑大规模风电接入并计及多时间尺度需求响应资源协调优化的滚动调度模型[J].中国电机工程学报,2016,36(17):4 589–4 600.  
BAO Yuqing, WANG Beibei, LI Yang, et al. Rolling dispatch model considering wind penetration and multi-scale demand response resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17):4 589–4 600.
- [ 6 ] 刘小聪,王蓓蓓,李扬,等.智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J].中国电机工程学报,2013,33(1):30–38.  
LIU Xiaocong, WANG Beibei, LI Yang, et al. Day-ahead generation scheduling model considering demand side interaction under smart grid paradigm [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1):30–38.
- [ 7 ] 别朝红,胡国伟,谢海鹏,等.考虑需求响应的含风电力系统的优化调度[J].电力系统自动化,2014,38(13):115–120.  
BIE Zhaohong, HU Guowei, XIE Haipeng, et al. Optimal dispatch for wind power integrated systems considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):115–120.
- [ 8 ] 曾丹,姚建国,杨胜春,等.应对风电消纳中基于安全约束的价格型需求响应优化调度建模[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5 571–5 578.  
ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Optimization dispatch modeling for price-based demand response considering security constraints to accommodate the wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31):5 571–5 578.
- [ 9 ] 李伟,韩瑞迪,孙晨家,等.基于用电偏好的可平移负荷参与需求响应最优激励合同与激励策略[J].中国电机工程学报,2021,41(S1):185–193.  
LI Wei, HAN Ruidi, SUN Chenjia, et al. An optimal incentive contract and strategy of shiftable loads participation in demand response based on user electricity preference [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1):185–193.
- [ 10 ] 吴宛璐,韩帅,孙乐平,等.负荷聚合商多类型需求侧资源激励价格制定一般模型及应用[J].电力建设,2021,42(1):1–9.  
WU Wanlu, HAN Shuai, SUN Leping, et al. A general incentive pricing model and its application for multi-type demand-side resources of load aggregators [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(1):1–9.
- [ 11 ] LIANG R H, LIAO J H. A fuzzy-optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4):1 665–1 674.
- [ 12 ] PEIDRO D, MULA J, POLER R, et al. Fuzzy optimiza-
- tion for supply chain planning under supply, demand and process uncertainties [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160(18):2 640–2 657.
- [13] ROMMELFANGER H. The advantages of fuzzy optimization models in practical use [J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2004, 3(4):295–309.
- [14] 张晓花,赵晋泉,陈星莺.节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J].中国电机工程学报,2010,30(22):71–76.  
ZHANG Xiaohua, ZHAO Jinquan, CHEN Xingying. Multi-objective unit commitment fuzzy modeling and optimization for energy-saving and emission reduction [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22):71–76.
- [15] 周明,娄雅融.兼顾购电费用和煤耗的双目标加权模糊发电调度模型[J].电网技术,2010,34(11):140–145.  
ZHOU Ming, LOU Yarong. A bi-objective weighted fuzzy generation dispatching model considering both power purchase cost and coal consumption [J]. Power System Technology, 2010, 34(11):140–145.
- [16] 吴杰康,唐力.含不确定性负荷的水火电力系统随机优化调度[J].中国电机工程学报,2012,32(28):36–43.  
WU Jiekang, TANG Li. Stochastic optimization scheduling method for hydrothermal power systems with stochastic loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28):36–43.
- [17] 刘文颖,文晶,谢昶,等.基于源荷互动的含风电场电力系统多目标模糊优化调度方法[J].电力自动化设备,2014,34(10):56–63,68.  
LIU Wenying, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective fuzzy optimal dispatch based on source-load interaction for power system with wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 34(10):56–63, 68.
- [18] LODWICK W A. Fuzzy optimization: Recent advances and applications[M]. Springer, 2010.
- [19] BELLMAN R E, ZADEH L A. Decision-making in a fuzzy environment [J]. Management Science, 1970, 17(4):141–164.
- [20] LUHANDJULA M K. Fuzzy optimization; an appraisal [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1989, 30(3):257–282.
- [21] KAHRAMAN C, ERTAY T, BÜYÜKÖZKAN G. A fuzzy optimization model for QFD planning process using analytic network approach [J]. European journal of operational research, 2006, 171(2):390–411.

#### 作者简介:

张思(1987),女,浙江杭州人,高级工程师,研究方向为电力平衡和电力市场。

(责任编辑 水 鸽)