

考虑用户禀赋效应和环保意识不确定性的 微电网鲁棒优化调度方法

熊小萍, 杨辉, 蔡义明

(广西大学电气工程学院, 广西壮族自治区 南宁市 530004)

Robust Optimal Dispatch Method of Microgrid Considering User Endowment Effect and Environmental Awareness Uncertainty

XIONG Xiaoping, YANG Hui, CAI Yiming

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

ABSTRACT: As an effective solution to solve the mismatch between source and load of microgrid, demand-side response can improve the degree of response, which effectively improves the load curve from the user side and enhances the matching of source and load. However, in addition to economic factors, the actual degree of participation in demand-side response is also easily affected by uncertain factors such as user psychology. Therefore, on the basis of considering various source and load uncertainties, in order to make full use of demand-side resources, a robust optimal scheduling model for microgrids that considers the uncertainty of users' psychological factors in demand-side response is established. According to the different load types, price-based and incentive-based demand-side response schemes are established respectively. For the incentive-based demand-side response model of residents' ordinary load and electric vehicle load, the endowment effect and environmental protection awareness are introduced to describe the different psychological factors of users' certainty. Then, the column and constraint generation algorithm is used to solve the optimization model, and the optimal microgrid economic dispatch scheme in the worst scenario is obtained. Finally, the validity of the proposed model and solution scheme is verified by numerical example analysis. The results show that considering the uncertainty of user psychological factors can effectively improve the economy and robustness of microgrid system operation, and provide some reference for microgrid operators to improve demand-side response participation in a targeted manner. Meanwhile, by adjusting the values of uncertainty parameters, operators can make a reasonable choice between economy and stability.

KEY WORDS: microgrid; demand-side response; endowment effect; environmental awareness; robust optimization

摘要: 需求侧响应作为解决微电网源荷不匹配的有效方案, 提高其响应效率, 能够有效地从用户侧改善负荷曲线, 提高源荷匹配性。然而, 除经济因素以外, 需求侧响应实际参与程度极易受到用户心理等不确定性因素的影响。为此, 在考虑各种源荷不确定性的基础上, 为了充分利用需求侧资源, 该文建立一种在需求侧响应中考虑用户心理因素不确定性的微电网鲁棒优化调度模型。根据负荷类型的不同, 分别建立基于价格和基于激励的需求侧响应方案, 对于其中居民普通负荷和电动汽车负荷的激励型需求侧响应模型, 通过引入禀赋效应和环保意识来描述用户心理因素的不确定性。然后, 利用列和约束生成算法求解优化模型, 得到最恶劣场景下的最优微电网经济调度方案。最后, 通过算例分析验证所提模型以及求解方案的有效性, 结果表明, 考虑用户心理因素不确定性可以有效提高微电网系统运行的经济性和鲁棒性, 并为微电网运营商针对性提高需求侧响应参与度提供一定的参考, 同时通过调节不确定性参数的取值, 运营调度人员可以在经济性和稳定性之间进行合理选择。

关键词: 微电网; 需求侧响应; 禀赋效应; 环保意识; 鲁棒优化

0 引言

随着全球变暖的加剧和人们对环境问题的日益重视, 许多国家都制定了碳中和的目标。以风电、光伏等分布式发电为核心的微电网, 是解决当前新能源大规模并网的有效方案。但由于可再生能源的随机性和间歇性以及负荷需求的不确定性, 给微电网的稳定运行带来了挑战^[1]。

随着电网中各种通信设备和技术的快速发展, 需求侧响应(demand response, DR)获得了广泛应

基金项目: 国家自然科学基金项目(51867004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51867004).

用。通过发电侧和需求侧的双向交互，能够有效缓解风电、光伏输出以及负载需求的不确定性，提高电网的稳定性和经济效益。文献[2]从用户侧角度出发，提出用户自主决策的需求侧响应方案，并建立基于模型预测控制的能源管理优化模型；文献[3-4]分别建立考虑用户满意成本的需求侧响应能源管理模型；文献[5]考虑负荷类型的不同，按照其容量、灵活性和经济价值的权重进行分类，并设计相应的需求侧响应方案；文献[6]提出一种激励机制—优先银行机制，用于微电网的需求侧响应模型；文献[7-8]分别按照微电网的运行目标和决策层次划分层次，提出微电网需求侧响应双层调度优化模型。上述文献考虑了需求侧响应对电网运营调度的影响，为运营商的调度决策提供了重要参考。但以上文献均为确定性场景下的优化调度，而实际用户参与过程中，极易受到经济因素和心理因素等各种不确定性的影响，导致用户参与度无法达到预期；文献[9]建立基于能源集线器架构，提出计及多类型需求响应的孤岛型微能源网优化调度模型。通过引入柔性冷、热、电多负荷的需求侧响应，可以提高系统运行的灵活性并降低其的运行成本；文献[10]考虑到价格调控下能源需求在时间上和类型上可相互转移，引入广义价格型需求侧响应概念，基于价格弹性及离散选择模型对其能源需求的时空转移特性进行建模性，更加符合用户行为实际，并降低了用户的能源购置成本；文献[11]建立空调负荷动态响应模型，通过引入在线学习思想来学习用户的用电习惯，以有效降低用户行为决策不确定性的影响；文献[12]研究需求侧响应中价格弹性曲线不确定性，建立了多阶段鲁棒优化模型，并利用 Benders 分解法对其进行求解。上述研究基于传统经济理论，主要从激励形式来设计相应的需求侧响应方案，只考虑经济因素对用户响应参与度的影响，忽略了心理因素对用户的影响。然而实际调度过程中用户行为决策很大程度上是由心理因素驱动的，比如禀赋效应、环保意识等。因此考虑用户心理因素不确定性对其响应参与度的影响是很有必要的。

基于上述研究，本文构建考虑用户心理因素不确定性的微电网鲁棒优化调度模型，在考虑微电网中风电、光伏以及负荷的不确定性的基础上，综合考虑了微电网普通负荷和电动汽车负荷参与需求侧响应时用户心理因素的不确定性，通过引入对用户响应积极性具有关键作用的禀赋效应以及环保

意识来描述用户心理因素带来的不确定性影响，并建立相应的不确定集。针对所提出的模型，根据对偶理论，将原本不确定性优化模型转化为两阶段确定性优化模型，并采用列和约束生成算法对其进行求解。最后，通过算例验证所提模型与方法的有效性，研究用户心理因素不确定性对微电网运行造成的影响，验证本文所提模型相较于确定性模型提高了微电网运行的经济性和稳定性。

1 微电网优化调度模型

1.1 分布式电源数学模型

1.1.1 可再生能源模型

风力机组的运行维护成本^[13]可表示为

$$C_{WT} = \gamma \cdot P_{WT} \quad (1)$$

式中： P_{WT} 为风力机组的输出功率； γ 为风力机组的维护成本系数。

光伏电池的运行维护成本^[14]可表示为

$$C_{PV} = \delta \cdot P_{PV} \quad (2)$$

式中： P_{PV} 为光伏机组的输出功率； δ 为光伏电池的维护成本系数。

1.1.2 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机作为常见的可控分布式电源，其燃料成本和输出功率^[15]可表示为

$$C_{MT}(t) = a \cdot P_{MT}(t) + b \quad (3)$$

式中： P_{MT} 为燃气轮机的输出功率； a 和 b 均为燃气轮机的燃料成本系数。

1.1.3 储能系统模型

储能系统对于提高分布式电源的稳定性和微电网供电可靠性是必不可少的。其荷电状态(state of charge, SOC)^[16]可表示为

$$S_{OC}(t) = S_{OC}(t-1) + \frac{P_{ESS}^{ch}(t)\eta}{C_{ES}} - \frac{P_{ESS}^{dis}(t)}{\eta C_{ES}} \quad (4)$$

式中： $S_{OC}(t)$ 为 t 时段储能系统的荷电状态； P_{ESS}^{ch} 和 P_{ESS}^{dis} 分别为储能系统充放电功率； η 为其充放电效率； C_{ES} 为储能容量。

储能系统的运行维护成本可表示为

$$C_{ESS}(t) = K_{ESS}[P_{ESS}^{dis}(t)/\eta + P_{ESS}^{ch}(t) \cdot \eta] \quad (5)$$

式中： C_{ESS} 为储能系统的运行维护成本； K_{ESS} 为维护成本系数。

1.2 考虑用户心理因素的需求侧响应模型

需求侧响应可以提高供给侧和需求侧的效用，平滑负荷曲线的波动，减小负荷曲线的峰谷差异，

提高可再生能源的适应性。本文将用电负荷分成3类：商业负荷、居民普通负荷以及电动汽车负荷。其中，商业负荷采用基于价格的需求响应方案，居民普通负荷和电动汽车负荷则采用基于激励的需求响应方案。

1.2.1 价格型需求侧响应

通过建立分时电价方案，可以引导用户对用电时段进行调整。由于电价会直接影响到负荷需求，因此需要对电价和负荷需求之间的关系进行建模。定义弹性系数 E 为需求对价格的敏感性^[17]：

$$E = \frac{\rho_0}{P_{d0}} \frac{\partial P_d}{\partial \rho} \quad (6)$$

式中： P_{d0} 和 ∂P_d 分别初始需求和需求变化量； ρ_0 和 $\partial \rho$ 分别为初始电价和电价的变化量。由于不同负荷在不同时段对电价的敏感性不同，可将弹性分为自弹性 $E(i, i)$ 和交叉弹性 $E(i, j)$ ，其中自弹性总为负，交叉弹性总为正。

定义单时段负荷为不能移动到其他时段的负荷，其敏感性为自弹性，多时段负荷为能够移动到其他时段的负荷，其敏感性为交叉弹性。对于第 i 时段的负荷，从消费者利益最大的角度出发，可以得到其负荷响应模型^[16]：

$$P_{PBDR}(t) = P_0(t) \left\{ 1 + \frac{E(t, t)[\rho(t) - \rho_0(t)]}{\rho_0(t)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq t}}^{24} E(t, j) \frac{[\rho(j) - \rho_0(j)]}{\rho_0(j)} \right\}, t = T \quad (7)$$

1.2.2 激励型需求侧响应

本文采用非直接控制中断响应的激励型需求侧响应方案^[18]，此方案对用户影响较小，用户并不直接收到电网运营商的控制，而是通过用户的自发行为切除部分负荷，运营商根据用户切除负荷量对其进行补贴。微电网运营商的因需求侧响应产生的成本为

$$C_{DR} = \lambda \cdot P_{IBDR}(t) \quad (8)$$

式中： C_{DR} 微电网运营商因DR支付的费用； $P_{IBDR}(t)$ 为参与响应用户减少的负荷量； λ 为运营商支付给用户的激励金额。

1.2.3 电动汽车响应模型

插电式电动汽车(plug-in electric vehicle, PEV)具有双向电能传输能力，其具有网对车(grid-to-vehicle, G2V)和车对网(vehicle-to-grid, V2G)的两种模式。在微电网中，PEV可以作为维持系统能量

平衡的资源之一，在微网负荷需求高峰时段通过V2G模式弥补微网功率缺额，在负荷需求低谷时段通过G2V模式消纳风电、光伏产生的过剩能量。

对于一辆PEV，在充电结束离开时，其需要维持的最小SOC^[19]可表示为：

$$S_{OC-LI \min} = S_{OC-\min} + S_{OC-\text{edd}} \quad (9)$$

$$S_{OC-\text{edd}} = (E_{CR} \cdot E_{DD}) / V_{EV} \quad (10)$$

式中： $S_{OC-\min}$ 为电动汽车电池的最低SOC； $S_{OC-\text{edd}}$ 为预期行驶里程所需花费的SOC； E_{CR} 为电动汽车能耗率； E_{DD} 为电动汽车预期行驶里程； V_{EV} 为电动汽车电池容量。

微电网对电动汽车进行调度产生的成本可以表示为：

$$C_{EV}(t) = D_t P_{EV}^{\text{dis}}(t) - C_t P_{EV}^{\text{ch}}(t) + BS(t) \quad (11)$$

$$B_S(t) = A_{EV} [1 - S_{OC-EV}(t)] \quad (12)$$

$$S_{OC-EV}(t) = S_{OC-EV}(t-1) - \frac{P_{EV}(t-1)}{C_{EV}} \quad (13)$$

式中： $C_{EV}(t)$ 为电动汽车调度成本； P_{EV} 为电动汽车充放电功率，为正时电动汽车放电，为负时电动汽车充电； D_t 和 C_t 分别为电动汽车充放电价格； $B_S(t)$ 为电池损耗补贴； A_{EV} 为电池补贴系数； $S_{OC-EV}(t)$ 为 t 时刻电动汽车荷电状态。

1.2.4 用户心理因素

在实际需求侧响应的过程中，影响用户参与度的因素除了合同所签订的激励之外，往往还有用户心理因素的影响，比如禀赋效应以及环保意识。

禀赋效应(endowment effect)是指个人一旦拥有某项物品时，那么他对该物品价值的评价要比未拥有前大大增加的现象。它由诺贝尔经济学奖得主Richard Thaler提出^[20]，该现象可以用行为金融学中的“损失厌恶”理论来解释。因此，人们在决策过程中对利害的权衡往往是不均衡的，该效应会导致买卖双方的心理价格出现偏差，从而影响交易效率。考虑到用户有对电能的使用权，在他们为了获取激励而削减负荷时，往往会因为禀赋效应导致响应效率的降低。

而环保意识在用户用电行为中也起着重要作用，拥有较高环保意思的用户往往会更愿意参与需求侧响应，通过改善负荷曲线来减小电网中的功率差额，减小燃气轮机的碳排放量。

为了表示禀赋效应和环保意识对需求侧响应参与度的影响，本文引入了用户参与度参数：

$$U_E = \frac{1}{2}(\sqrt{1-E_E} + \sqrt{E_A}) \quad (14)$$

式中： U_E 为用户参与度； E_E 为禀赋效应因子； E_A 为环保意识因子； E_E 和 E_A 取值范围均为[0,1]。图 1 为用户参与度函数随禀赋效应和环保意识的变化范围。

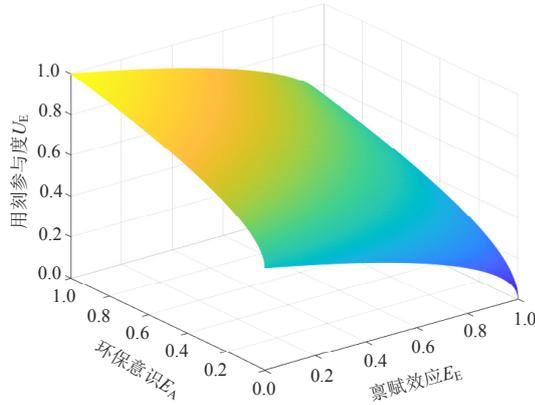


图 1 用户参与度变化范围

Fig. 1 Range of changes in user engagement

考虑用户参与度后，用户实际参与响应的负荷上限可以表示为：

$$P_{IBDR}^{actual}(t) = U E_{DR}(t) \cdot P_{IBDR}^{pre}(t) \quad (15)$$

$$P_{EV}^{actual}(t) = U E_{EV}(t) \cdot P_{EV}^{pre}(t) \quad (16)$$

式中： $P_{IBDR}^{actual}(t)$ 和 $P_{EV}^{actual}(t)$ 分别为用户普通负荷和电动汽车负荷实际愿意参与响应的上限； $P_{IBDR}^{pre}(t)$ 和 $P_{EV}^{pre}(t)$ 分别为用户普通负荷和电动汽车负荷参与响应预测值，可以从历史数据获得。

1.3 结合需求侧响应和电动汽车的微电网调度模型

在并网模式下，微电网在电能不足时向公共电网购买电能满足负荷需求，在电能过剩时出售电能获得利润。设并网模式下微电网与公共电网进行电能交易的成本为 C_{GRID} ^[21]，其表达式为

$$C_{GRID}(t) = C_M^{buy}(t)P_M^{buy}(t) - C_M^{sell}(t)P_M^{sell}(t) \quad (17)$$

式中： $C_M^{buy}(t)$ 和 $C_M^{sell}(t)$ 分别为 t 时段内微电网电能的买入和卖出价格； $P_M^{buy}(t)$ 和 $P_M^{sell}(t)$ 分别为 t 时段内微电网与公共电网购买和卖出的电能。

本文在满足微电网运行中各种约束条件的前提下，以微电网运行成本最小为目标，建立微电网优化模型。本文微电网模型运行的目标函数为

$$F = \sum_{t=1}^{24} [C_{WT}(t) + C_{PV}(t) + C_{MT}(t) + C_{ESS}(t) + C_{GRID}(t) + C_{DR}(t) + C_{EV}(t)] \quad (18)$$

上述目标函数需要考虑以下约束条件。

1) 微型燃气轮机运行约束。

$$P_{MT}^{min} \leq P_{MT}(t) \leq P_{MT}^{max} \quad (19)$$

式中 P_{MT}^{min} 和 P_{MT}^{max} 分别为机组的最小输出功率和最大输出功率。

2) 储能装置运行约束。

式(20)为储能装置容量约束，式(21)保证每个调度周期储能装置初始容量相等，便于循环调度。式(22)、(23)为储能装置充放电功率约束。

$$E_{ESS}^{min} \leq E_{ESS}(0) + \eta \sum_{t'=1}^t [P_{ESS}^{ch}(t')\Delta t] - \frac{1}{\eta} \sum_{t'=1}^t [P_{ESS}^{dis}(t')\Delta t] \leq E_{ESS}^{max} \quad (20)$$

$$\eta \sum_{t=1}^{24} [P_{ESS}^{ch}(t)\Delta t] - \frac{1}{\eta} \sum_{t=1}^{24} [P_{ESS}^{dis}(t)\Delta t] = 0 \quad (21)$$

$$0 \leq P_{ESS}^{dis}(t) \leq U_{ESS}(t)P_{ESS}^{max} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{ESS}^{ch}(t) \leq [1 - U_{ESS}(t)]P_{ESS}^{max} \quad (23)$$

式中： E_{ESS}^{min} 和 E_{ESS}^{max} 分别为储能装置的最小容量和最大容量； $E_{ESS}(0)$ 为储能装置初始时刻容量； P_{ESS}^{max} 为储能装置最大充放电功率； $U_{ESS}(t)$ 为储能装置的充放电状态变量，为 0 时表示储能装置充电，为 1 时表示储能装置放电。

3) 需求侧响应约束。

式(24)和(25)确保运营商调度负荷值不超过用户实际愿意参与响应负荷值的上限。式(26)为电动汽车电量约束。

$$0 \leq P_{IBDR}(t) \leq P_{IBDR}^{actual}(t) \quad (24)$$

$$P_{EV}^{min}(t) \leq P_{EV}(t) \leq P_{EV}^{actual}(t) \quad (25)$$

$$S_{OC-LI}^{min} \leq S_{OC-EV}(0) - \sum_{t'=1}^t \frac{P_{EV}(t')\Delta t}{C_{EV}} \leq S_{OC-EV}^{max} \quad (26)$$

$$\sum_{t=1}^{24} [P_{EV}(t)\Delta t] = 0 \quad (27)$$

式中： S_{OC-LI}^{min} 表示电动汽车调度过程中考虑预期行驶里程后的最低剩余电量； S_{OC-EV}^{max} 为电动汽车电池电量上限。式(27)确保每个调度周期电动汽车初始容量相等。

4) 微电网功率约束。

式(28)和(29)为微电网和外部公共电网交互功率约束，式(30)为微电网功率平衡约束；

$$0 \leq P_M^{buy}(t) \leq U_M(t)P_M^{max} \quad (28)$$

$$0 \leq P_M^{sell}(t) \leq [1 - U_M(t)]P_M^{max} \quad (29)$$

$$P_L(t) = P_{PBDR}(t) + P_{IBDR}(t) + P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{MT}(t) + P_{EV}(t) + P_{ESS}^{dis}(t) - P_{ESS}^{ch}(t) + P_M^{buy}(t) - P_M^{sell}(t), \forall t \in T \quad (30)$$

式中： P_M^{\max} 为最大交互功率； $U_M(t)$ 为微电网和公共电网功率交互状态变量，为0时微电网向公共电网售电，为1时向公共电网购电； $P_L(t)$ 为微电网负荷值。

2 不确定集的构造

在微电网实际运行中，由于风力、光照强度以及用户行为无法被准确预测，因此调度过程中风电和光伏出力值、负荷值以及用户需求侧响应参与度相比预测值会存在一定偏差。为了表示微电网运行过程中的不确定性，需要构造相应的不确定集。

考虑风电、光伏、负荷以及用户心理因素不确定性的表达形式为

$$\begin{cases} P_{WT} = \tilde{P}_{WT} + \Delta P_{WT} \\ P_{PV} = \tilde{P}_{PV} + \Delta P_{PV} \\ P_L = \tilde{P}_L + \Delta P_L \\ E_A = \tilde{E}_A + \Delta E_A \\ E_E = \tilde{E}_E + \Delta E_E \end{cases} \quad (31)$$

式中： P_{WT} 、 P_{PV} 和 P_L 分别为风电、光伏实际出力值和实际负荷值； E_A 、 E_E 分别为用户环保意识和禀赋效应的实际值； \tilde{P}_{WT} 、 \tilde{P}_{PV} 、 \tilde{P}_L 、 \tilde{E}_A 、 \tilde{E}_E 分别为其预测值； ΔP_{WT} 、 ΔP_{PV} 、 ΔP_L 、 ΔE_A 、 ΔE_E 则分别为其波动值。

本文中，考虑“最恶劣场景”后，可将不确定集 $U^{[22]}$ 表示为：

$$U := \begin{cases} \mathbf{u} = [P_{WT}(t), P_{PV}(t), P_L(t), E_A(t), E_E(t)]^T \\ P_{WT}(t) = \hat{P}_{WT}(t) - B_{WT}(t)\Delta P_{WT}^{\max}(t) \\ \sum_{t=1}^{24} B_{WT}(t) \leq \Gamma_{WT} \\ P_{PV}(t) = \hat{P}_{PV}(t) - B_{PV}(t)\Delta P_{PV}^{\max}(t) \\ \sum_{t=1}^{24} B_{PV}(t) \leq \Gamma_{PV} \\ P_L(t) = \hat{P}_L(t) + B_L(t)\Delta P_L^{\max}(t) \\ \sum_{t=1}^{24} B_L(t) \leq \Gamma_L \\ E_A(t) = \hat{E}_A(t) + B_{EA}(t)\Delta E_A^{\max}(t) \\ \sum_{t=1}^{24} B_{EA}(t) \leq \Gamma_{EA} \\ E_E(t) = \hat{E}_E(t) + B_{EE}(t)\Delta E_E^{\max}(t) \\ \sum_{t=1}^{24} B_{EE}(t) \leq \Gamma_{EE} \end{cases} \quad (32)$$

$$\mathbf{B} = [B_{WT}(t), B_{PV}(t), B_L(t), B_{EA}(t), B_{EE}(t)]^T \quad (33)$$

$$\mathbf{\Gamma} = [\Gamma_{WT}, \Gamma_{PV}, \Gamma_L, \Gamma_{EA}, \Gamma_{EE}]^T \quad (34)$$

式中： \mathbf{B} 为布尔型变量，为1时即为“最恶劣场景”，相对应的不确定变量取为边界值； $\mathbf{\Gamma}$ 为不确定变量的总偏离度，表示不确定变量取为边界值的总数，用以调节方案的保守性^[23]。

3 鲁棒优化模型及求解

3.1 确定性优化模型

在所有变量取值均为预测值的确定性优化模型中，目标函数为

$$\min : F = \sum_{t=1}^{24} [C_{WT}(t) + C_{PV}(t) + C_{MT}(t) + C_{ESS}(t) + C_{GRID}(t) + C_{DR}(t) + C_{EV}(t)] \quad (35)$$

约束条件包括式(19)–(30)。

3.2 两阶段鲁棒优化模型

考虑模型中的不确定性后，可以得到 min-max-min 结构的二阶段鲁棒优化模型，其紧凑形式为

$$\begin{cases} \min \{ \max_x \min_{u \in U} \min_{y \in (x, u)} \mathbf{C}^T \mathbf{y} \} \\ \text{s.t. } \mathbf{D}\mathbf{y} \geq \mathbf{d} \\ \mathbf{K}\mathbf{y} = \mathbf{s} \\ \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{G}\mathbf{y} \geq \mathbf{h} \\ \mathbf{I}\mathbf{y} = \mathbf{u} \\ \mathbf{x} = [U_S(t), U_M(t)]^T \\ \mathbf{u} = [P_{WT}(t), P_{PV}(t), P_L(t), EA(t), EE(t)]^T \\ \mathbf{y} = [P_{MT}(t), P_{ESS}^{ch}(t), P_{ESS}^{dis}(t), P_{EV}(t), \\ P_{IBDR}(t), P_M^{buy}(t), P_M^{sell}(t), P_{PV}(t), P_{PBDR}(t), \\ P_{WT}(t), P_L(t), P_{IBDR}^{actual}(t), P_{EV}^{actual}(t)]^T \end{cases} \quad (36)$$

约束条件包括式(19)–(30)、(32)。

式中： \mathbf{x} 为不含不确定性的布尔型优化变量； \mathbf{u} 为包含不确定性的优化变量； \mathbf{y} 为连续优化变量。

3.3 模型求解

本文采用列和约束生成算法对上述鲁棒优化模型进行求解^[24]。该算法将原问题分解为主问题和子问题，通过交替迭代的方式获得原问题的最优解。将式(36)分解后得到的主问题为

$$\begin{cases} \min \xi \\ \text{s.t. } \xi \geq \mathbf{C}^T \mathbf{y} \\ \mathbf{D}\mathbf{y} \geq \mathbf{d} \\ \mathbf{K}\mathbf{y} = \mathbf{s} \\ \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{G}\mathbf{y} \geq \mathbf{h} \\ \mathbf{I}\mathbf{y} = \mathbf{u}^* \end{cases} \quad (37)$$

式中： ξ 为引入的辅助变量； \mathbf{x} 为布尔型优化变量； \mathbf{y} 为子问题迭代后的解； \mathbf{u}^* 为子问题迭代后“最恶

劣场景”下的不确定变量值。

子问题为 $\max_{u \in U} \min_{y \in (x, u)} C^T y$ ，根据强对偶理论可将其转化为以下形式^[25]：

$$\begin{cases} \max_{u \in U, \gamma, \lambda, v, \pi} & d^T \gamma + s^T \lambda + (h - Fx)^T v + u^T \pi \\ \text{s.t.} & D^T \gamma + K^T \lambda + G^T v + I^T \pi \leq C \\ & \gamma \geq 0, s \geq 0, v \geq 0, \pi \geq 0 \end{cases} \quad (38)$$

经过分解后主问题与子问题的求解步骤为：

- 1) 初始化参数：设置问题的上下界 $B_L = -\infty$ 、 $B_U = +\infty$ ，迭代次数 $k=1$ ，容许误差为 ε ；
- 2) 更新 B_L ：选择一组最恶劣场景 u_1^* 对主问题(式(37))进行求解，得到最优解 $(x_k^*, \xi_k^*, y_1^*, \dots, y_k^*)$ ，并更新 $B_L = \xi_k^*$ ；
- 3) 更新 B_U ：将主问题的解 x_k^* 代入子问题(式(38))进行求解得到子问题的解 f_k^* 以及对应的 u_k^* ，并更新 $B_U = \min\{B_U, f_k^*\}$ ；
- 4) 判断终止条件：若 $B_U - B_L \leq \varepsilon$ ，则终止循环并输出最优解 x_k^* 和 y_k^* ；否则增加变量 y^{k+1} ，并添加以下约束到主问题(式(37))中，更新 $k=k+1$ 并返回至步骤 2)。

$$\begin{cases} \xi \geq C^T y^{k+1} \\ Dy^{k+1} \geq d \\ Ky^{k+1} = s \\ Fx + Gy^{k+1} \geq h \\ Iy^{k+1} = u_{k+1}^* \end{cases} \quad (39)$$

4 仿真结果分析

4.1 算例数据

本文采用一个包含多种分布式电源的微电网作为算例，该微电网系统包括微型燃气轮机组、风力发电机组和光伏发电机组，以及储能装置。其中微型燃气轮机组的出力上下限为 800kW 和 80kW，用于进行临时调度的机组备用容量费用设置为其发电成本的 50%(当风电以及负荷波动造成日前调度的发电机组出力计划无法满足系统稳定运行时，对发电机组备用容量进行临时调度，以满足电网功率平衡)。储能装置调度过程中的容量上限为 1800kW·h，下限为 400kW·h，最大充放电功率为 500kW，初始容量为 100kW·h，充放电效率均为 95%。各装置的运行维护成本系数如表 1 所示。

其中，光伏、风电和负荷曲线可以从历史数据中获得，本文中光伏、风电出力值以及负荷值的波

表 1 运行维护系数表

类型	微型燃气轮机组	风力机组	光伏机组	储能装置
运行维护系数/ (kW/元)	$a=0.9$ $b=0$	0.63	0.85	0.38

动范围分别为预测值的 15%和 10%。可再生能源出力曲线如图 2、3 所示。负荷曲线如图 4 所示。

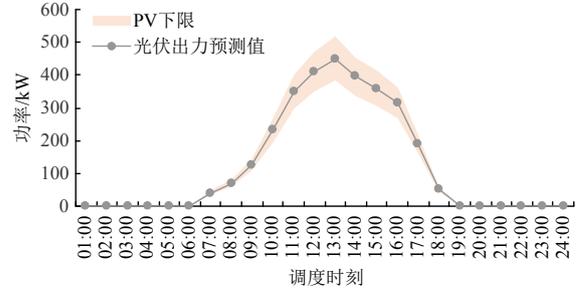


图 2 光伏出力值曲线

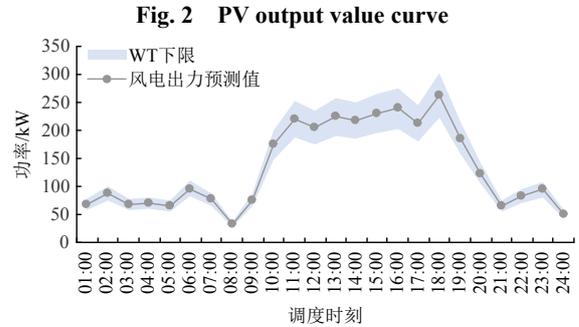


图 3 风电出力曲线

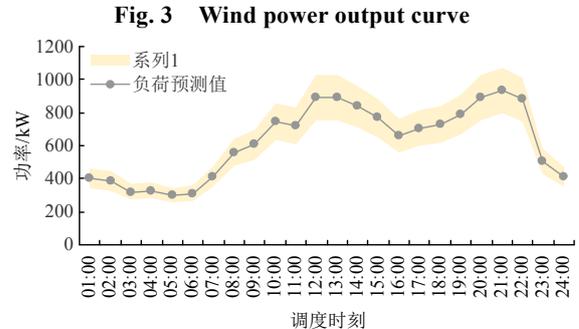


图 4 负荷曲线

Fig. 4 Load curve

本文中对于商业负荷采用基于价格的需求响应方案，将用电时段分为峰平谷 3 个时段，各个时段分别采用不同的用电价格。商业负荷的弹性系数见表 2，各时段对应电价见表 3。

表 2 弹性系数表

负荷类型	自弹性系数	交叉弹性系数
商业负荷	-0.12	0.02

本文中选择的电动汽车型号为特斯拉 Model S，总计 30 辆电动汽车参与调度。其电池容量为 60kW·h，充放电功率均为 10kW，能耗率为

表3 分时电价表

Table 3 Time-of-use electricity price table

峰谷类型	时段	电价/元
谷段	00:00—06:00	0.4
平段	06:00—10:00	0.6
	13:00—17:00	
峰段	01:00—13:00	0.9
	17:00—24:00	

0.38kW·h/mile, 预期行驶里程设置为 32miles, 电动汽车充电价格为 1.6 元/(kW·h)。

用户心理因素中禀赋效应初始值设定为 0, 环保意识初始值设定为 1, 最大波动上限均为 0.6。即当禀赋效应取值为 0, 环保意识取值为 1 时, 此时用户不受心理因素负面影响, 响应参与度为 100%; 当禀赋效应为 0.6, 环保意识为 0.4 时, 此时为“最恶劣场景”, 用户心理因素负面影响达到最大, 响应参与度约为 63.2%, 如图 5 所示。

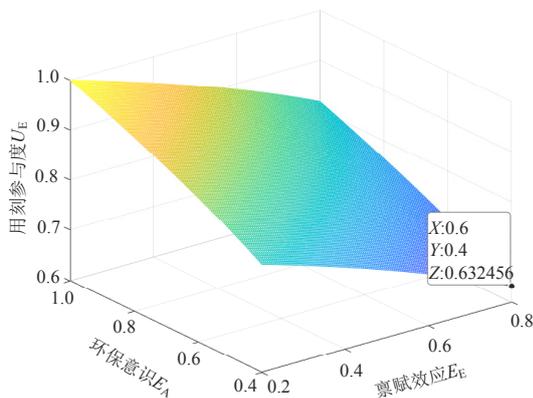


图5 响应参与度变化曲线

Fig. 5 Response Participation Change Curve

4.2 仿真结果

调度结果中微型燃气轮机出力值、储能装置充放电功率以及微电网购售电功率如图 6 所示。图 7 为用户预期参与响应负荷量与实际参与响应负荷量, 预期参与响应负荷量可从历史数据得到, 设定为居民负荷量的 15%。图 8 为电动汽车经运营商调度后实际充放电功率图, V2G 时取值为正, G2V 时取值为负。浅色阴影区为总计 30 辆电动汽车参与调度的最大范围区间, 深色阴影区为受用户心理因素影响后, 愿意参与电动汽车 V2G 最大功率调度区间。

为了分析不确定性对微电网运行成本的影响, 本文设置了以下 4 种优化场景:

场景 1: 模型中光伏、风电以及负荷均取为预测值, 且不考虑用户心理因素对需求侧响应的影响, 采用确定性优化模型进行求解。

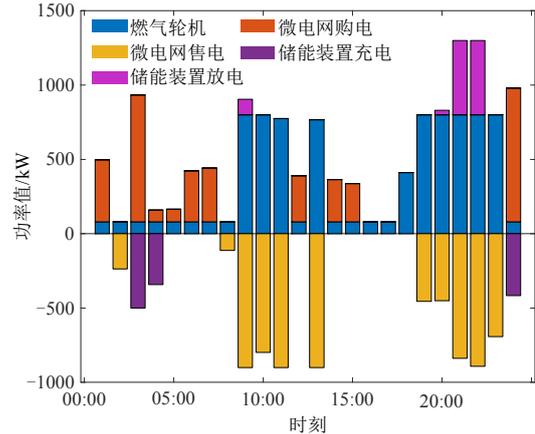


图6 微型燃气轮机出力值、储能装置充放电功率以及微电网购售电功率

Fig. 6 Output value of micro gas turbine, charging and discharging power of energy storage system and power purchased and sold by microgrid

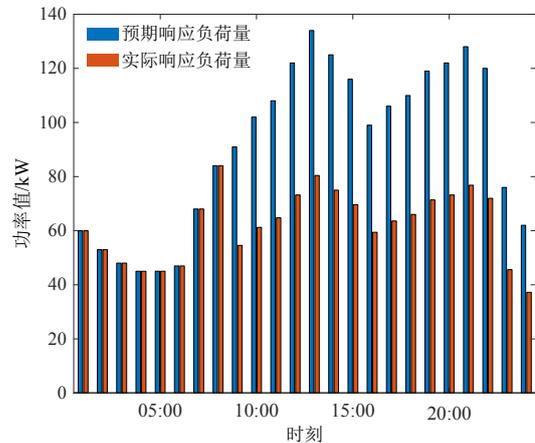


图7 用户预期/实际参与响应负荷

Fig. 7 User expected/actual participation response load

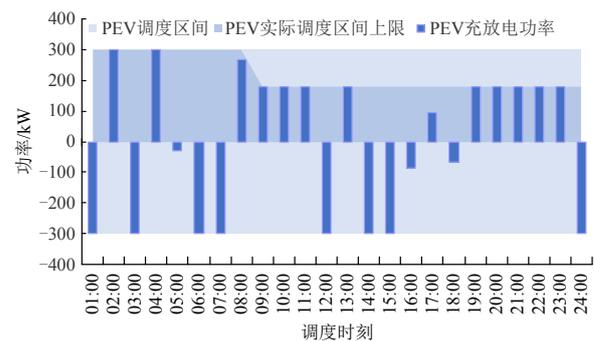


图8 电动汽车充放电功率

Fig. 8 Electric vehicle charging and discharging power

场景 2: 随机选取一组不确定场景代替预测值, 并用确定性优化模型对其进行求解。

场景 3: 考虑风电、光伏以及负荷的不确定性, 不考虑用户心理因素不确定性, 假设用户响应参与度为 100%, 采用本文的鲁棒优化模型进行求解。

场景 4: 同时考虑风电光伏、负荷以及用户心理因素不确定性, 采用本文的鲁棒优化调度模型进

行求解。

在表 4 中，场景 1 对应传统确定性优化方案，当完全忽略不确定性时，微电网日前调度成本最低，此时属于乐观估计情况。场景 1、场景 3 和场景 4 相比较，随着考虑的不确定性因素增多，模型逐渐保守，微电网日前调度成本也随之升高。虽然传统确定性优化调度成本最低，但实际微电网运行过程中，由于预测误差无法避免，会导致调度过程中实时功率无法平衡，需要启用额外的备用燃料机组或者与外部公共电网进行交易，会产生新的额外费用，并为微电网的稳定运行带来不利影响。

表 4 优化方案比较

Table 4 Comparison of optimization schemes

场景	日前调度成本/元
1	5314.1
2	6619.3
3	6403.2
4	6921.6

表 5 显示了不同不确定参数设定下的优化结果，其中 Γ 取值越大，代表不确定变量取到区间边界的值越多。第 1 组不确定参数全部设置为 0，即所有不确定变量取为预测值，与确定性优化结果相同；第 5 组不确定性参数设定情况下，所有时刻不确定变量值均偏离预测值，模型的保守性最强，相应的日前调度成本也最高。

表 5 不确定参数对比

Table 5 Comparison of uncertain parameters

G_{PV}	G_{WT}	G_L	G_{EE}	G_{EA}	日前调度成本/元
0	0	0	0	0	5314.1
6	6	6	6	6	6187.4
12	12	12	12	12	6775.0
12	12	12	16	16	6921.6
12	24	24	24	24	7392.2

表 6 展示了不同心理因素的不确定参数设定下总体需求侧响应参与度的变化情况。心理因素的不确定参数设定越大，对应的用户禀赋效应和环保意识参数取到区间边界的值越多，即用户行为偏离理想情况越多，需求侧响应参与度也就越低。

表 6 心理因素不确定参数对比

Table 6 Comparison of uncertain parameters of psychological factors

Γ_{EE}	Γ_{EA}	总体需求侧响应参与度/%
0	0	100.00
8	8	84.60
16	16	68.22
24	24	63.24

在 Γ_{PV} 、 Γ_{WT} 和 Γ_L 都取值为最大值(即考虑到预测值与实际值偏离程度达到最大的最恶劣情况)时，此时微电网所需的燃气轮机组备用容量达到最大，需要通过临时调用备用容量来满足微电网的功率平衡。图 9 展示了此时微电网调度成本随 Γ_{EE} 和 Γ_{EA} 的变化情况。从图中可以看出，随着 Γ_{EE} 和 Γ_{EA} 的增大，用户需求侧响应参与度逐渐降低，微电网日前基础调度成本逐渐升高，系统日前调度的鲁棒性也会随之提高，微电网的临时调度成本随之下降。

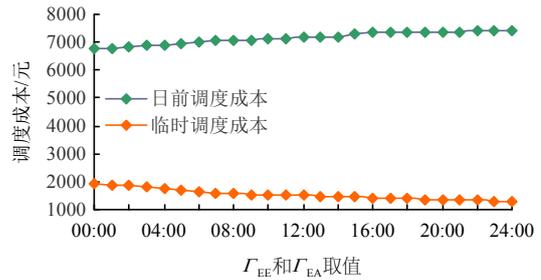


图 9 微电网调度成本变化曲线

Fig. 9 Change curve of dispatching cost of microgrid

图 10 展示了 Γ_{EE} 和 Γ_{EA} 的取值对微电网运行总成本的影响。从图 10 可以看出，在 Γ_{EE} 和 Γ_{EA} 取值为 0 时(即不考虑需求侧响应参与情况的不确定性)，系统的运行总成本为 8723 元，其中日前调度成本为 6794 元，临时调度成本为 1929 元。当 Γ_{EE} 和 Γ_{EA} 取值为 8 时，系统的运行总成本到达最低，此时的日前调度成本为 7068 元，临时调度成本为 1569 元，总成本为 8637 元。因此，本文所提出的考虑用户心理因素不确定性的鲁棒优化模型相比确定性优化模型更具有优势，在保证微电网运行经济性的同时也可以提高其鲁棒性。同时，微电网的调度人员可以通过适当调整不确定集的取值来在系统运行的经济性和鲁棒性间进行取舍，从而实现微电网运行经济性和可靠性的平衡。

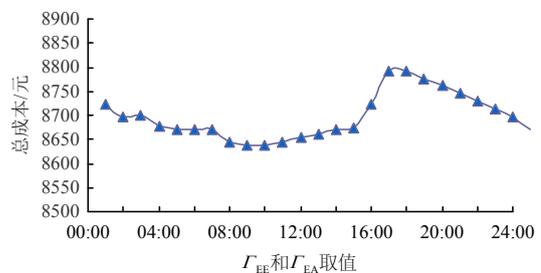


图 10 微电网运行总成本变化曲线

Fig. 10 Change curve of total cost of microgrid operation

5 结论

本文建立了考虑多种源荷以及需求侧响应参与度不确定性的微电网鲁棒优化调度模型，在考虑

微电网可再生能源以及负荷功率不确定性的情况下,针对需求侧响应方案实施中用户响应参与度存在不确定性的问题,引入了禀赋效应和环保意识对用户心理因素进行描述,并利用列和约束生成算法对模型进行求解。通过仿真分析可知,考虑不确定性虽然会增加微电网日前调度成本,但降低了调度风险,同时调度者可以通过调节不确定性参数来改变方案保守性,使其更加符合实际运行情况。引入禀赋效应和环保意识后能够更加细致地考虑用户心理因素的不确定性,并分析了其对微电网运行造成的影响,在保障微电网运行经济性的同时也提高了运行可靠性,同时便于决策者设置相应的DR方案,对微电网的实际运行和需求侧响应参与度的提高具有实际参考意义。

参考文献

- [1] RAHBAR K, XU Jie, ZHANG Rui. Real-time energy storage management for renewable integration in microgrid: an off-line optimization approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 124-134.
- [2] 张禹森, 孔祥玉, 孙博伟, 等. 基于电力需求响应的多时间尺度家庭能量管理优化策略[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1811-1818.
ZHANG Yusen, KONG Xiangyu, SUN BOWEI, et al. Multi-time scale home energy management strategy based on electricity demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1811-1818(in Chinese).
- [3] SHAFIE-KHAH M, SIANO P. A stochastic home energy management system considering satisfaction cost and response fatigue[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(2): 629-638.
- [4] 赵波, 包侃侃, 徐志成, 等. 考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5465-5474.
ZHAO Bo, BAO Kankan, XU Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5465-5474(in Chinese).
- [5] ASTRIANI Y, SHAFIULLAH G M, SHAHNIYA F. Incentive determination of a demand response program for microgrids[J]. Applied Energy, 2021, 292: 116624.
- [6] NUNNA H S V S, SAKLANI A M, SESETTIA, et al. Multi-agent based Demand Response management system for combined operation of smart microgrids[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2016, 6: 25-34.
- [7] 米阳, 李战强, 吴彦伟, 等. 基于两级需求响应的并网微电网双层优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1899-1906.
MI Yang, LI Zhanqiang, WU Yanwei, et al. Bi-layer optimal dispatch of grid-connected microgrid based on two-stage demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1899-1906(in Chinese).
- [8] 刘博, 姜秉梁, 郝宁, 等. 分时阶梯电价-微电网联合优化调度的不确定二层规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 75-83.
LIU Bo, JIANG Bingliang, HAO Ning, et al. Coordinated optimization of TOU & tiered pricing and optimal scheduling model combining microgrid under uncertain bilevel programming[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 75-83(in Chinese).
- [9] 张峰, 杨志鹏, 张利, 等. 计及多类型需求响应的孤岛型微能源网经济运行[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 547-555.
ZHANG Feng, YANG Zhipeng, ZHANG Li, et al. Optimal operation of islanded micro energy grid with multi-type demand responses[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 547-555(in Chinese).
- [10] 陈泽兴, 张勇军, 陈伯达, 等. 广义价格型需求侧响应下区域能源中心日前最优经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1873-1885.
CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, CHEN Boda, et al. Optimal day-ahead economic dispatch for district energy Centre considering the price based generalized demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1873-1885(in Chinese).
- [11] 胡江溢, 郑涛, 金玉龙, 等. 计及用户决策不确定性与调频备用需求的空调负荷聚合策略[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3534-3542.
HU Jiangyi, ZHENG Tao, JIN Yulong, et al. An aggregation strategy of air conditioning loads considering uncertainty of customer behavior and frequency regulation demand[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3534-3542(in Chinese).
- [12] ZHAO Chaoyue, WANG Jianhui, WATSON J P, et al. Multi-stage robust unit commitment considering wind and demand response uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2708-2717.
- [13] 冯璐, 李斌, 张新敬, 等. 考虑需求侧响应的风储系统容量配置优化分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 222-231.
FENG Lu, LI Bin, ZHANG Xinjing, et al. Capacity allocation optimization of energy storage system considering demand side response[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 222-231(in Chinese).
- [14] 沈艳军, 杨博. 需求响应的微电网优化调度及改进的蝙蝠算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2020, 48(2): 120-125.
SHEN Yanjun, YANG Bo. Optimal dispatch of microgrid

- with demand response and an improved bat algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2020, 48(2): 120-125(in Chinese).
- [15] 彭春华, 张金克, 陈露, 等. 计及差异化需求响应的微电网源荷储协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 1-7.
PENG Chunhua, ZHANG Jinke, CHEN Lu, et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of microgrid considering differential demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 1-7(in Chinese).
- [16] AJOULABADI A, RAVADANEGH S N, MOHAMMADI-IVATLOO B. Flexible scheduling of reconfigurable microgrid-based distribution networks considering demand response program[J]. Energy, 2020, 196: 117024.
- [17] FAHRIOGLU M, ALVARADO F L. Designing incentive compatible contracts for effective demand management [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1255-1260.
- [18] 易文飞, 张艺伟, 曾博, 等. 多形态激励型需求侧响应协同平衡可再生能源波动的鲁棒优化配置[J]. 电工技术学报, 2018, 33(23): 5541-5554.
YI Wenfei, ZHANG Yiwei, ZENG Bo, et al. Robust optimization allocation for multi-type incentive-based demand response collaboration to balance renewable energy fluctuations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23): 5541-5554(in Chinese).
- [19] NUNNA H S V S K, BATTULA S, DOOLLA S, et al. Energy management in smart distribution systems with vehicle-to-grid integrated microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4004-4016.
- [20] THALER R. Toward a positive theory of consumer choice[J]. Journal of Economic Behavior & Organization, 1980, 1(1): 39-60.
- [21] ZHANG Cuo, XU Yan, DONG Zhaoyang, et al. Robust coordination of distributed generation and price-based demand response in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4236-4247.
- [22] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4013-4022.
LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4013-4022(in Chinese).
- [23] WANG Chengshan, JIAO Bingqi, GUO Li, et al. Robust scheduling of building energy system under uncertainty [J]. Applied Energy, 2016, 167: 366-376.
- [24] ZENG Bo, ZHAO Long. Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method[J]. Operations Research Letters, 2013, 41(5): 457-461.
- [25] WU Min, XU Jiazhu, ZENG Linjun, et al. Two-stage robust optimization model for park integrated energy system based on dynamic programming[J]. Applied Energy, 2022, 308: 118249.



熊小萍

在线出版日期: 2022-11-04。

收稿日期: 2022-06-01。

作者简介:

熊小萍(1979), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与规划、可再生能源并网, 21404256@qq.com;

杨辉(1996), 男, 硕士, 主要研究方向为微电网的优化调度, 626518174@qq.com。

(责任编辑 邱丽萍)