

基于区间信息模糊规划模型的新能源微电网分层优化

杨晓辉¹, 黄泽中¹, 王晓鹏², 胡泽成¹, 杨芃¹, 钟睿¹

(1. 南昌大学信息工程学院, 南昌 330031; 2. 广东电网有限责任公司汕头供电局, 广东 汕头 515000)

摘要: 随着以居民住宅为代表的终端用能微单元急剧增长, 用户侧新能源微电网系统的电能调度优化面临挑战。提出了一种考虑源荷不确定性和电动汽车的新能源微电网分层优化策略, 旨在保障居民用电需求和提高系统运行效率。上层模型以电动汽车充电利益和居民用电满意度为优化目标, 同时考虑需求响应的不确定性, 对住宅用电负荷和电动汽车充电负荷进行优化; 下层模型以系统运行效益和对外影响为优化目标, 基于上层数据采用区间信息模糊规划模型构建并求解非线性多目标优化问题, 从而得到系统各设备的最优出力方案。结果表明, 所提调度策略确保居民用电满意度提升的同时保障了系统运行的整体性能, 有效应对了不确定性因素带来的影响。

关键词: 居民住宅; 新能源微电网; 电动汽车充电; 区间多目标优化; 分层优化调度

Hierarchical Optimization of New Energy Microgrid Based on Interval Information Fuzzy Planning Model

YANG Xiaohui¹, HUANG Zezhong¹, WANG Xiaopeng², HU Zecheng¹, YANG Peng¹, ZHONG Rui¹

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Shantou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Shantou, Guangdong 515000, China)

Abstract: With the rapid growth of terminal energy micro-unit consumption, represented by residential buildings, the optimization of power dispatch in user-side new energy microgrid systems face challenges. A hierarchical optimization strategy for new energy microgrids, considering source-load uncertainty and electric vehicles, is proposed to ensure residential electricity demand and improve system operational efficiency. The upper-level model optimizes residential electricity loads and electric vehicle charging loads, with objectives focused on maximizing electric vehicle charging benefits and resident electricity satisfaction while accounting for demand response uncertainty. The lower-level model aims to enhance system operational efficiency and external impact, employing an interval information fuzzy planning model to construct and solve nonlinear multi-objective optimization problems based on upper-level data, thereby obtaining the optimal power output scheme for system equipment. Results demonstrate that the proposed dispatch strategy effectively improves resident electricity satisfaction while ensuring overall system performance, mitigating the impacts of uncertainty factors.

Key words: residential buildings; new energy microgrid; electric vehicle charging; interval multi-objective optimization; hierarchical optimization dispatch

0 引言

近年来, 我国大力推进新型城镇化建设, 这是激发我国经济发展潜力的重要方向和必然选择^[1-2]。

城市人口的增长引发了城市对电力的高度需求, 用户侧分布式能源系统的主动发展势在必行^[3], 进而推动了包含新能源的微电网群子系统的大规模建设。然而, 考虑到大型用户侧新能源微电网系统在仿真模拟和数据分析方面存在显著挑战, 本文选取居民住宅新能源微电网(new energy microgrid, NEMG)作为研究切入点。这一选择有助于缩小微

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72461020)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (72461020).

电网规模,简化系统模型运行分析的复杂性。在确保分布式能源稳定发电并满足用户侧用能需求的基础上有效提升了新能源的消纳能力^[4]。

居民生活的主要用电场景涵盖照明、洗浴和空调等方面,涉及刚性负荷和柔性负荷^[5-6]两大类。针对柔性可控负荷,通过实施负荷需求响应策略,不仅能改善电能消费方式,还能有效降低能耗和用能成本,并对用电负荷产生削峰填谷等积极效应^[7-8]。文献[9-10]对居民住宅微电网的电力负荷分别进行了价格型可转移负荷需求响应和激励型可中断负荷需求响应的研究。然而,这些研究尚未充分考虑负荷及需求响应的不确定性因素。实际上,受天气变化、用户消费心理差异等多重因素的影响,居民参与需求响应的行为具有显著的不确定性^[11]。学者针对负荷需求响应的不确定性进行了深入探讨。例如,文献[12]分析了价格型需求响应中的不确定性问题,并在此基础上构建了分时电价下的负荷模糊响应模型。另有文献[13-14]对柔性电负荷需求响应的不确定性进行了建模,通过引入负荷转移率和隶属度函数,量化了用户参与响应的不确定性,从而更贴近实际负荷需求响应的特征。然而,当前研究普遍忽视了在降低需求侧用电体验损失与提升系统运行可靠性之间寻求平衡的重要性。

随着电动汽车(electric vehicle, EV)的普及,智能充电桩已成为新型居民社区的标配。作为居民住宅NEMG的重要负荷之一, EV的接入对NEMG的电能调度带来了新的挑战。众多学者针对这一调度问题进行了深入研究^[15]。相关文献[16]探讨了在NEMG中利用EV的集群充放电策略来抑制光伏功率波动的效果,研究结果表明, EV的参与数量对抑制效果具有显著影响。另有文献[17]研究了通过有序调度EV来降低系统峰谷差,从而提高系统的稳定性和安全性。还有文献[18]提出了将动态电价机制融入EV参与的微电网调度中,实现了微电网与EV用户的互利共赢,并促进了微电网对新能源的高效消纳。通过对这些文献的深入分析,不难发现, EV充放电调度策略能够有效提升NEMG的经济效益。然而,当前研究较少关注EV用户在充电过程中的个人利益,而这对优化居民电力消费体验至关重要。

为了高效解决上述问题,本文深入研究了居民住宅NEMG中EV的有序充放电行为及其对居民生活用电满意度的影响,并构建了居民住宅NEMG分

层调度优化模型。在上层模型中以最大化EV车主充电效益和居民生活用电满意度为目标,分别对居民负荷曲线与EV充放电负荷进行优化,并将优化后的负荷结果输入至NEMG调度控制中心。下层模型则旨在最小化NEMG的综合运行成本,同时最大化与上级电网交互功率的平滑度。基于NEMG调度控制中心的负荷数据,运用区间信息模糊规划模型构建并求解这一复杂的非线性多目标优化问题,通过调整系统能源供应侧设备的出力确保供需达到最佳平衡状态。最终,通过算例仿真分析验证了本文所提出模型和算法的有效性及其显著的优化效果。

1 居民住宅NEMG及其分层优化框架

本文构建了居民住宅NEMG系统如图1所示。能源供应端由光伏(photovoltaic, PV)、燃气轮机(gas turbine, GT)和电储能(electric energy storage, EES)等分布式电源装置组成。同时, NEMG系统通过向上级配电网进行电力买卖以实现电能供需平衡。负荷侧则由居民住宅的基础电负荷和并网智能充电桩的电动汽车(EV)充电负荷构成。此外,为对各分布式电源的出力进行调控并收集充电桩上停靠车辆的信息,系统配备了必要的通信模块和交互保障设备。

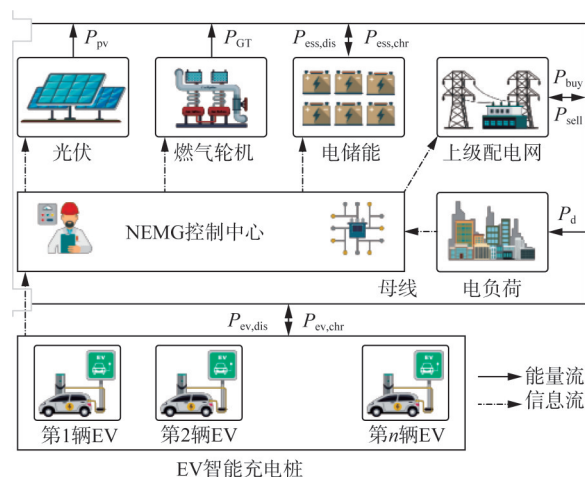


图1 居民住宅新能源微电网架构

Fig. 1 Structure of the NEMG in residential buildings

2 上层负荷优化问题的建模与求解

2.1 优化居民生活用电负荷

在参与需求响应补偿费用的激励下用户根据分

时电价信号自发改变原先电能消费习惯实现 NEMG 需求侧资源协调优化。然而, 由于用户消费习惯的多样性造成用户参与需求响应的不确定性^[19]。这种不确定性体现在负荷转移率上, 即高电价时段的负荷向低电价时段转移的比例^[20]。

当获取到两个时间段之间的电价差异时便可以推导出这两个时段的负荷转移率范围。负荷转移率区间反映了在各种因素影响下不同用户用电习惯所产生的差异程度。具体计算方法如下。

$$\lambda_l^+ = \begin{cases} 0, 0 \leq \Delta p_l \leq S_{l, \max}^+ \\ \frac{\lambda_{l, \max}^+ (\Delta p_l - S_{l, \max}^+)}{b_{l, \max}^+ - S_{l, \max}^+}, S_{l, \max}^+ \leq \Delta p_l \leq b_{l, \max}^+ \\ \lambda_{l, \max}^+, \Delta p_l \geq b_{l, \max}^+ \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δp_l 为电价差; l 为峰谷、峰平、平谷 3 种电负荷时段; λ_l^+ 为负荷转移率; $\lambda_{l, \max}^+$ 、 $S_{l, \max}^+$ 和 $b_{l, \max}^+$ 分别为该时段的最大负荷转移率的上下限、柔性负荷需求响应模型的无效区和极值区间阈值上下限。

在得到谷、平、峰时段下的负荷转移率区间后, 转移后的各时段负荷的计算方式为:

$$P_d^{\pm} = [P_d^{+}, P_d^{-}] = \begin{cases} \hat{P}_d^+ + \lambda_{lg}^+ \bar{P}_d^+ + \lambda_{pg}^+ \bar{P}_d^+, t \in t_g \\ \hat{P}_d^+ + \lambda_{lp}^+ \bar{P}_d^+ - \lambda_{pg}^+ \bar{P}_d^+, t \in t_p \\ \hat{P}_d^+ - \lambda_{lg}^+ \bar{P}_d^+ - \lambda_{lp}^+ \bar{P}_d^+, t \in t_f \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_d^{\pm}$ 为转移后各时段的负荷范围; P_d^{+} 、 P_d^{-} 分别为转移后各时段的负荷上下限; λ_{lg}^+ 、 λ_{pg}^+ 、 λ_{lp}^+ 分别为谷、平、峰时段下的负荷转移率上下限; $\hat{P}_d^+$ 为执行需求响应策略前 t 时段所对应的电负荷; $\bar{P}_d^+$ 和 $\bar{P}_d^0$ 为执行需求响应前峰时段与平时段的电负荷平均值; t_g 、 t_p 和 t_f 分别为居民家用电负荷的谷、平、峰时段。

为研究降低需求侧用户体验损耗和提高系统运行可靠性之间的权衡关系, 需要对制定合理的分时电价进行深入探讨。为此, 提出了一个基于分时电价的多目标优化模型, 旨在平衡系统运行可靠性和用户体验损耗, 从而寻求合理的分时电价。

基于分时电价的多目标优化模型, 其首要目标是尽可能降低负荷峰谷差的平方, 旨在实现负荷削峰填谷, 并提升 NEMG 运行的稳定性。其次, 该模型致力于最大化居民生活用电的满意度, 兼顾用户参与需求响应的主观意愿及其客观收益。该模型通过归一化各时段对应的负荷转移率, 精准反映用户用电习惯的调整幅度。具体而言, 用户的用电满意度与负荷变化量呈反比关系: 当用户维持原有用电

习惯时, 各时段负荷转移率为 0, 用电满意度达到最高值 1。而当用户完全依照需求响应模型调整用电习惯时, 各时段负荷转移率为 1, 用电满意度则降至最低值 0。模型具体如下所示。

$$\begin{cases} \min (\max (P_d^t) - \min (P_d^t))^2 \\ \min (1 - \kappa J) \\ \text{s.t. } p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^{\max}, i \in \{f, p, g\} \end{cases} \quad (3)$$

$$J = \sum_l \frac{\lambda_l^-}{\lambda_{l, \max}^-} + \frac{\lambda_l^+}{\lambda_{l, \max}^+} \quad (4)$$

式中: P_d^t 为执行需求响应策略后 t 时段所对应的电负荷; p_g 、 p_p 和 p_f 分别为谷时段、平时段和峰时段下售电分时电价, 它们是该多目标优化模型的决策变量; 下标 f 、 p 、 g 分别为峰时段、平时段、谷时段; $p_i^{\min}$ 和 $p_i^{\max}$ 分别为 i 时段下售电分时电价的上下限; κ 为权重系数, κJ 为表征负荷变化量的归一化指标, 反映了用户用电习惯的调整程度; λ_l^+ 、 λ_l^- 分别为各时段负荷转移率的上下限; $\lambda_{l, \max}^+$ 、 $\lambda_{l, \max}^-$ 分别为各时段负荷转移率上下限的最大值; l 为负荷时段。

NEMG 控制中心结合该多目标优化模型和可转移负荷需求响应策略, 利用多目标迭代优化算法求得最佳的分时电价, 以实现在尽可能降低用户用电体验损耗的同时优化居民生活用电负荷分布。

2.2 优化 EV 充放电负荷

受 NEMG 控制中心的调度管理, EV 能够在智能充电桩处实现有序充电。其具体过程如下: 在某一时段内智能充电桩将停靠在充电桩处的 EV 的充电停放时间、电池荷电状态等信息发送至 NEMG 调度控制中心。控制中心综合考虑 EV 车主的充电成本和出行便利性, 优化计算出此时所有停靠 EV 的电池充放电量, 并通过电能调度实现 EV 电池的充放电。为此构建了一个多目标优化模型以最大化 EV 车主的综合满意度, 并最小化与上级电网交互功率的波动。该模型在保障 EV 车主充电利益的同时优化了 EV 的充放电负荷曲线。

2.2.1 目标函数

第一个目标函数旨在使 EV 车主的综合满意度最大化, 该满意度由 θ_p^i 和 θ_c^i 组成。

$$\max (\sum_{i=1}^{N_{ev}} \omega_p \mu_p^i + \omega_c \mu_c^i) \quad (5)$$

式中: μ_p^i 和 μ_c^i 分别为第 i 辆 EV 的充电费用满意度和

出行便利满意度; N_{ev} 为 EV 数量; ω_p 和 ω_c 分别为表征两种满意度的权重系数。

1) 充电费用满意度 μ_p^i

$$\mu_p^i = 1 - \frac{C_{ev}^i - C_{ev}^{i-}}{C_{ev}^{i+} - C_{ev}^{i-}} \quad (6)$$

式中: C_{ev}^{i+} 和 C_{ev}^{i-} 分别为第 i 辆 EV 的车主在停驻时间内所需承受的充电费用最大值和最小值; C_{ev}^i 为第 i 辆 EV 的充放电费用。

2) 出行便利满意度 μ_c^i

EV 电动汽车的荷电状态(state of charge, SOC)能够有效地衡量出行的便捷程度。当 EV 以最大速率充电时 SOC 会迅速上升至满充状态并维持不变, 在此情况下 EV 在停车期间累积的 SOC 总值达到最大从而实现最高的出行便利性。计算方法如下。

$$\mu_c^i = \sum_{t=1}^{T_{ev}} S_{ev, soc}^{i, t} / \bar{S}_{ev, soc}^i \quad (7)$$

式中: $S_{ev, soc}^{i, t}$ 为第 i 辆 EV 在 t 时刻下的 SOC 值; $\bar{S}_{ev, soc}^i$ 为第 i 辆 EV 在停驻时间内累计 SOC 的阈值; T_{ev} 为 EV 充电周期。

第二个目标函数旨在引导 EV 有序充电, 最小化充电桩功率波动, 减少其对 NEMG 的冲击, 防止“公地悲剧”的现象发生。

$$\min \left\{ \sum_{t=2}^{T_{ev}} \sum_{i=1}^{N_{ev}} P_{ev}^{i, t} - \sum_{i=1}^{N_{ev}} P_{ev}^{i, t-1} \right\} \quad (8)$$

式中 $P_{ev}^{i, t}$ 和 $P_{ev}^{i, t-1}$ 分别为第 i 辆 EV 在 t 和 $t-1$ 时刻下的充放电量, 正值表示充电, 反之表示放电。

2.2.2 约束条件

1) 充放电量 $P_{ev}^{i, t}$ 约束

$$P_{ev, dis}^{max} \leq P_{ev}^{i, t} \leq P_{ev, chr}^{max} \quad (9)$$

2) 充放电状态约束

$$0 \leq U_{ev, chr}^{i, t} + U_{ev, dis}^{i, t} \leq 1 \quad (10)$$

3) 荷电状态 $S_{ev, soc}^{i, t}$ 约束

$$S_{ev, soc}^{min} \leq S_{ev, soc}^{i, t} \leq S_{ev, soc}^{max} \quad (11)$$

$$S_{ev, soc}^{i, t} E_{ev} = S_{ev, soc}^{i, t-1} E_{ev} + P_{ev}^{i, t} U_{ev, chr}^{i, t} \eta_{ev, chr} + \frac{P_{ev}^{i, t} U_{ev, dis}^{i, t}}{\eta_{ev, dis}} \quad (12)$$

式中: $P_{ev, chr}^{max}$ 和 $P_{ev, dis}^{max}$ 分别为 EV 的最大充放电量; $U_{ev, chr}^{i, t}$ 和 $U_{ev, dis}^{i, t}$ 分别为第 i 辆 EV 在 t 时刻下的充电和放电状态, 状态变量取值为 1 即表示处于何种状态; $S_{ev, soc}^{i, t}$ 为第 i 辆 EV 在 t 时刻下的荷电状态; $S_{ev, soc}^{max}$ 和 $S_{ev, soc}^{min}$ 分别为 EV 荷电状态的上下限; $\eta_{ev, chr}$ 和 $\eta_{ev, dis}$ 分别为 EV 的充放电效率; E_{ev} 为 EV 电池的额

定容量。

3 下层调度优化问题的建模与求解

通过上层模型可以精确刻画居民住宅的总用电负荷需求。将上层优化后的负荷结果输入至 NEMG 调度控制中心, 依据收集到的负荷数据、可再生能源出力等信息执行下层模型。该模型旨在构建并求解一个优化调度模型, 以实现 NEMG 运行成本最小化及与上级电网交互功率波动最小化的双重目标。通过此过程能够获得系统各设备的最优出力方案, 在确保系统供需平衡的同时显著提升系统运行效益。

在下层模型中采用了一种区间信息模糊规划模型, 该模型利用区间数有效刻画了 NEMG 中可再生能源出力和负荷的不确定性, 增强 NEMG 的鲁棒性和适应性, 并结合多目标模糊优化方法, 以综合平衡多个目标的最优求解, 同时提高 NEMG 的多方面运行效益。

3.1 区间信息模糊规划原理

将系统内所有单向机组的出力决策变量及系统内不确定性变量均采用区间数表示, 并执行优化调度方法, 称为“完全区间优化方法”^[21]。然而, 该方法在拆解区间等式约束进行优化时存在同一单向机组的区间数在目标函数与约束条件中取值矛盾的问题。例如, 为获得最优目标函数某设备的出力区间数需保持低且大幅波动; 但为满足系统电平衡又要求该设备出力高且稳定。这种矛盾导致系统供需失衡, 降低了 NEMG 调度计划的可靠性。为此, 提出了区间信息模糊规划模型, 该模型仅用区间数表示不确定性变量, 既避免了上述问题又兼顾多目标最优求解, 从而提升了 NEMG 的运行效益。

区间信息模糊规划模型如下所示。

$$\begin{cases} \min Z_k = \sum_{j=1}^n [c_{kj}^-, c_{kj}^+] x_j \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n [a_{ij}^-, a_{ij}^+] x_j \geq [b_i^-, b_i^+] \\ \sum_{j=1}^n [d_{ij}^-, d_{ij}^+] x_j = [e_i^-, e_i^+] \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中: Z_k 为第 k 个目标函数; i 为第 i 个约束条件; x_j 为第 j 个决策变量; c_{kj}^+ 、 c_{kj}^- 分别为区间信息模糊规划模型辅助系数的上下限; a_{ij}^+ 、 a_{ij}^- 分别为不等式约束辅助系数的上下限; b_i^+ 、 b_i^- 分别为边界不等式的上下限; d_{ij}^+ 、 d_{ij}^- 分别为等式约束辅助系数的上下

限； e_i^+ 、 e_i^- 分别为边界等式的上下限； n 为决策变量的数量。

展开上述模型中所有区间数，则有：

$$\begin{aligned} \min Z_k &= \sum_{j=1}^n c_{kj}^- + q_{c,kj} (c_{kj}^+ - c_{kj}^-) \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} x_j \geq 0, & 0 \leq q \leq x_j, & 0 \leq r \leq 1 \\ \sum_{j=1}^n a_{ij}^- x_j + q_{a,ij} (a_{ij}^+ - a_{ij}^-) \geq b_{ij}^- + r_{b,i} (b_i^+ - b_i^-) \\ \sum_{j=1}^n d_{ij}^- x_j + q_{d,ij} (d_{ij}^+ - d_{ij}^-) = e_{ij}^- + r_{e,i} (e_i^+ - e_i^-) \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

式中： $q_{a,ij}$ 、 $q_{c,kj}$ 、 $q_{d,ij}$ 均为区间长度的辅助系数； $r_{b,i}$ 、 $r_{e,i}$ 分别为边界区间的辅助系数； r 和 q 为辅助系数，表示相应区间的长度。

定义第 k 个子目标的隶属度函数 $G_k(x, q)$ 为：

$$G_k(x, q) = \begin{cases} 0, & G_k(x, q) \geq Z_k^+ \\ \frac{Z_k^+ - Z_k}{Z_k^+ - Z_k^-}, & Z_k^- \leq G_k(x, q) \leq Z_k^+ \\ 1, & G_k(x, q) \leq Z_k^- \end{cases} \quad (15)$$

式中 Z_k^+ 和 Z_k^- 分别为区间信息模糊规划模型第 k 个子目标的最大、最小最优值。

将式(15)代入式(14)从而将多目标优化问题等价转换为单目标区间模糊规划问题，并对得到的式子进行分解，构造出区间线性规划的最好最优值模型和最劣最优值模型^[22]如式(16)所示。

$$\begin{aligned} \max G^+ \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} (Z_k^+ - Z_k^-)G^+ + \sum_{j=1}^n c_{kj}^+, & x_j \leq Z_k^+ \\ \sum_{j=1}^n a_{ij}^- x_j \geq b_{ij}^+, & x_j \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

式中： G^+ 分别为最好最优值模型与最劣最优值模型的总满意度；上标“+”与“-”分别代表两种不同场景，“+”为最好场景，“-”为最恶劣场景。

分别求解上述两个最优值模型，参考文献[23]的证明过程可知两个模型的最优解分别表示最大总满意度和最小总满意度下式(13)模型的帕累托解。将帕累托解代入到式(13)模型中可以得到各子目标函数的最优值区间。

3.2 下层优化模型

3.2.1 目标函数

NEMG以24 h为运行周期、1 h为时间间隔，以最小化运行周期内NEMG的综合运行成本 F_1 为

目标函数，具体形式如式(17)所示。

$$F_1 = \min \sum_{t=1}^{24} (R_{\text{fl}}^t + R_{\text{m}}^t + R_{\text{dr}}^t + R_{\text{po}}^t) \quad (17)$$

式中： R_{fl}^t 为燃料成本； R_{m}^t 为设备维护成本； R_{dr}^t 为需求响应成本； R_{po}^t 为污染治理成本。

目标函数 F_2 为最小化对上级电网的影响，旨在减小NEMG与上级电网交互电能的最大值，实现提高上级电网设施利用率的目标，形式如下。

$$F_2 = \min \max \{ \max (P_{\text{buy}}^t), \max (P_{\text{sell}}^t) \} \quad (18)$$

式中 P_{buy}^t 和 P_{sell}^t 分别为 t 时刻下NEMG与上级电网的购买、销售电量。

令 $Z = \max \{ \max (P_{\text{buy}}^t), \max (P_{\text{sell}}^t) \}$ ，通过增加约束条件的形式将其线性化^[24]，则转化为：

$$\begin{cases} F_2 = \min Z \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} Z \geq P_{\text{buy}}^t, & t = 1, \dots, 24 \\ Z \geq P_{\text{sell}}^t, & t = 1, \dots, 24 \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

3.2.2 约束条件

1) 电平衡约束

$$\begin{aligned} [P_{\text{d}}^t, P_{\text{d}}^{t+}] X_{\text{d}}^t &= [\hat{P}_{\text{pv}}^t, \hat{P}_{\text{pv}}^{t+}] X_{\text{pv}}^t + P_{\text{ev,dis}}^t - P_{\text{ev,chr}}^t + \\ &P_{\text{GT}}^t + P_{\text{buy}}^t - P_{\text{sell}}^t + P_{\text{ees,dis}}^t - P_{\text{ees,chr}}^t \end{aligned} \quad (20)$$

式中： $[\hat{P}_{\text{pv}}^t, \hat{P}_{\text{pv}}^{t+}]$ 为 t 时刻下光伏机组的发电预测值范围，其中 $\hat{P}_{\text{pv}}^t$ 和 $\hat{P}_{\text{pv}}^{t+}$ 分别为预测值的上下限； X_{d}^t 和 X_{pv}^t 分别为需求响应后电负荷和光伏不确定性区间的区间变量； P_{GT}^t 为GT的出力； $P_{\text{ees,dis}}^t$ 和 $P_{\text{ees,chr}}^t$ 分别为EES充放电量。

2) 分布式电源出力约束

$$\begin{cases} P_{\text{GT}}^{\min} \leq P_{\text{GT}}^t \leq P_{\text{GT}}^{\max} \\ P_{\text{ees,chr}}^{\min} U_{\text{ees,chr}}^t \leq P_{\text{ees,chr}}^t \leq U_{\text{ees,chr}}^t P_{\text{ees,chr}}^{\max} \\ P_{\text{ees,dis}}^{\min} U_{\text{ees,dis}}^t \leq P_{\text{ees,dis}}^t \leq U_{\text{ees,dis}}^t P_{\text{ees,dis}}^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中： $P_{\text{GT}}^{\min}$ 、 $P_{\text{GT}}^{\max}$ 、 $P_{\text{ees,chr}}^{\min}$ 、 $P_{\text{ees,chr}}^{\max}$ 、 $P_{\text{ees,dis}}^{\min}$ 和 $P_{\text{ees,dis}}^{\max}$ 分别为GT出力上下限和EES充放电上下限； $U_{\text{ees,chr}}^t$ 和 $U_{\text{ees,dis}}^t$ 分别为EES充放电的状态变量。

3) EES充放电约束

$$S_{\text{ees,soc}}^{t=0} = S_{\text{ees,soc}}^{t=24}, \quad S_{\text{ees,soc}}^{\min} \leq S_{\text{ees,soc}}^t \leq S_{\text{ees,soc}}^{\max} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{ees,soc}}^t E_{\text{ees}} &= S_{\text{ees,soc}}^{t-1} E_{\text{ees}} + P_{\text{ees,chr}}^t U_{\text{ees,chr}}^t \eta_{\text{ees,chr}} - \\ &P_{\text{ees,dis}}^t U_{\text{ees,dis}}^t / \eta_{\text{ees,dis}} \end{aligned} \quad (23)$$

式中： $S_{\text{ees,soc}}^t$ 为 t 时刻下EES的荷电状态； $S_{\text{ees,soc}}^{\max}$ 和 $S_{\text{ees,soc}}^{\min}$ 分别为ES荷电状态的上下限； E_{ees} 为EES的额定容量； $\eta_{\text{ees,chr}}$ 和 $\eta_{\text{ees,dis}}$ 分别为EES充放电效率。

4 仿真与分析

以山东省某社区为研究对象,基于 100 户居民住宅的生活用电负荷和新能源发电数据构建了 NEMG 模型,如图 2 所示。假设 50 % 的居民持有电动私家车,采用蒙特卡洛模拟并根据 EV 出行规律^[25],得到 EV 停驻时间、初始 SOC 和行驶里程等基本信息^[26]。

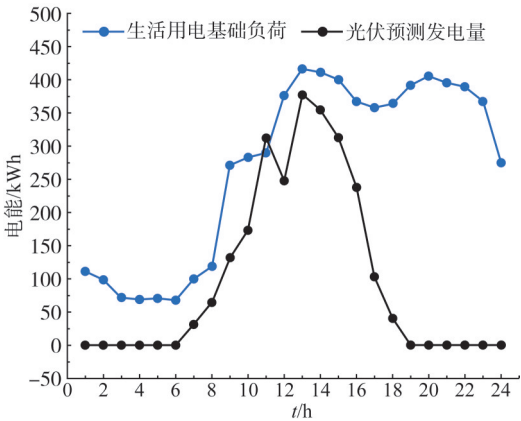


图 2 初始电负荷和光伏发电量

Fig. 2 Initial electric loads and PV power generations

NEMG 综合运行参数如表 1 所示。其中,利用层次分析法确定上层模型中两个多目标模型的权重系数,该非线性多目标问题通过 MATLAB 采用 Gurobi 求解器求解。

4.1 负荷需求响应成效分析

本文基于柔性负荷需求响应的不确定性模型提出了一个多目标优化模型,以协调提升 NEMG 运行可靠性和降低用户需求侧体验损耗的矛盾。利用 NSGA-Ⅱ 多目标算法得到 NEMG 分时电价,即可通过柔性负荷需求响应的不确定性模型求得居民用电负荷区间。NSGA-Ⅱ 多目标算法的种群规模为 50,最大遗传代数为 100,图 3 展示了该多目标模型的帕累托前沿解集。

根据非支配解的分布特征,对应的电负荷峰谷差平方值范围为 80 000~120 000 kWh²,而居民生活用电满意度则在 0.3~1.0 之间。对各数据进行归一化处理和熵值计算,得到各指标变异程度的结果,如表 2 所示。“满意度”的信息熵处于最低水平,但其信息效用值最高,这直接映射出该维度信息亟待重点关注与优化提升。

根据表 1 的信息,确定“满意度”和“峰谷差”的

表 1 NEMG 综合运行参数

Tab. 1 NEMG comprehensive operation parameters

参数类型	参数名称	参数取值
EV 相关运行参数	EV 数量/辆	50
	仿真周期/h	48
	EV 电池容量/kWh	50
	EV 最大充电量/kWh	6
	EV 最大放电量/kWh	-6
	EV 电池荷电状态最小值	0.1
	EV 电池荷电状态最大值	1.0
	EV 电池充电效率	0.9
	EV 电池放电效率	0.9
NEMG 发电设备 相关运行参数	ESS 最小放电量/kWh	0
	ESS 最大放电量/kWh	40
	ESS 最小充电量/kWh	0
	ESS 最大充电量/kWh	40
	ESS 荷电状态最小值	0.05
	ESS 荷电状态最大值	0.95
	GT 最小发电量/kWh	10
	GT 最大发电量/kWh	240
运行成本相关参数	GT 运行效率	0.4
	谷荷时段单位电价下限/(元·kWh ⁻¹)	0.28
	谷荷时段单位电价上限/(元·kWh ⁻¹)	0.35
	平荷时段单位电价下限/(元·kWh ⁻¹)	0.60
	平荷时段单位电价上限/(元·kWh ⁻¹)	0.70
	峰荷时段单位电价下限/(元·kWh ⁻¹)	0.90
	峰荷时段单位电价上限/(元·kWh ⁻¹)	1.10
	CO ₂ 治理成本转换系数/(元·kWh ⁻¹)	0.017
	SO ₂ 治理成本转换系数/(元·kWh ⁻¹)	0.002 16
	NO _x 治理成本转换系数/(元·kWh ⁻¹)	0.001 6
	ESS 单位维护成本/(元·kWh ⁻¹)	0.001 8
	GT 单位维护成本/(元·kWh ⁻¹)	0.025
	PV 单位维护成本/(元·kWh ⁻¹)	0.021 6
	需求响应单位补偿成本/(元·kWh ⁻¹)	0.010
	天然气单价/(元·kWh ⁻¹)	2.35

权重系数分别为 46.87 % 和 53.13 %。然后运用熵权-TOPSIS 法筛选出最优解,得到 NEMG 分时电价信息,如图 4 所示。

为更好地分析所提实施需求响应后 NEMG 运行性能的变化情况,对比帕累托图中高偏值点、低偏值点和最优解点 3 处的电负荷优化情况。高偏值点和低偏值点在单项指标上的绝对支配优势:高偏值点的负荷转移率接近 0,减少了需求响应对用户体验的干扰,体现了其重视居民良好的用电体验;低偏值点的电负荷峰谷差降低了约 17.5 %,实现了良好

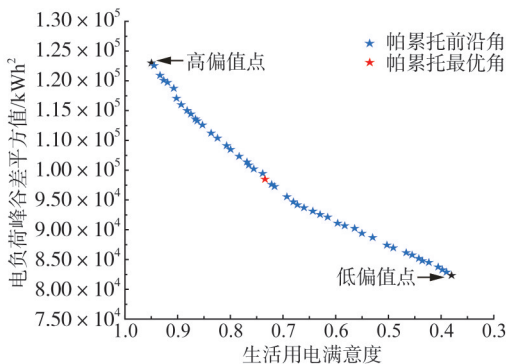


图3 需求响应多目标模型的帕累托前沿解集

Fig. 3 Pareto front solution set of the multi-objective model for demand response

表2 各指标变异程度的结果

Tab. 2 Results of the variation degrees of each indicator

帕累托指标	信息熵值	信息效用值
峰谷差平方值	0.956 9	0.043 1
生活用电满意度	0.951 2	0.048 8

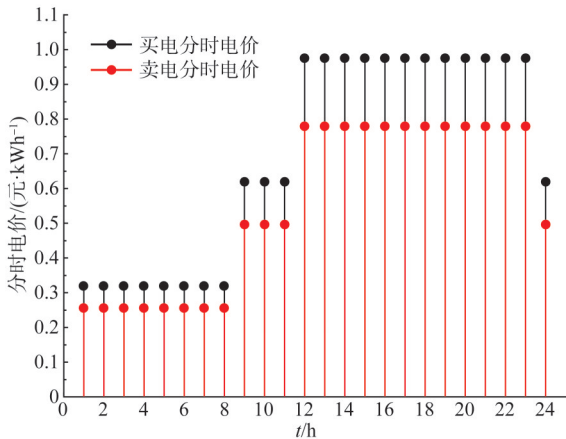


图4 NEMG分时电价

Fig. 4 Time-of-use prices of NEMG

的削峰填谷效果，但却大幅度降低了居民的用电体验。而客观筛选出的最优解点则协调了两个目标之间的相互博弈：一方面，其结果能将电负荷峰谷差降低了约9.49%，如图5所示，取得了一定的削峰填谷效果，另一方面，其结果还能保持用电满意度高达73.4%，照顾了大多数居民的用电感受。

综上所述，上述分析凸显了实施需求响应策略时考虑用户体验的必要性以及所提基于分时电价多目标优化模型应用的有效性。

4.2 电动汽车充电规划结果分析

本文设置5种不同的EV充电策略，如表3所

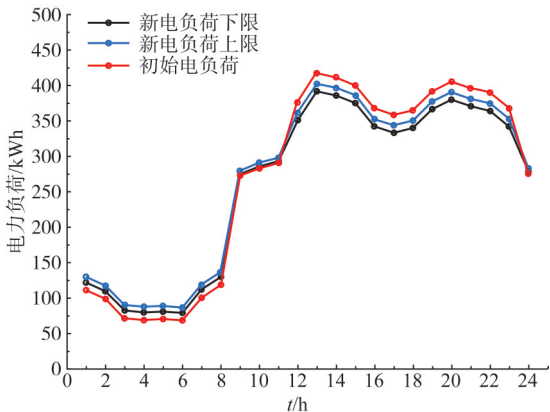


图5 需求响应作用下的电负荷分布情况

Fig. 5 Distribution of electric loads under the effect of demand response

示，目标函数1和目标函数2分别为EV车主的综合满意度和最小化充电桩功率波动。其中，策略1为本文所提多目标优化模型。

表3 5种不同的EV充电策略

Tab. 3 Five different EV charging strategies

电动汽车 充电策略	目标函数1		目标函数2
	充电费用	出行便利度	有序充电
策略1	√	√	√
策略2	√	×	×
策略3	×	√	×
策略4	×	×	√
策略5	√	√	×

对比5种策略下的叠加负荷以及优化性能，采用归一化法向约束法求解得到帕累托前沿解的分布，并由熵权-TOPSIS法筛选出最优解，结果如表4所示。

如表4所示，策略4专注于减轻充电功率波动的影响，却忽视了EV车主的个人利益，在尽量满足EV车主充电需求的同时力求维持充电负荷的平

表4 不同EV充电策略下的优化性能

Tab. 4 Optimized performances under different EV charging strategies

充电策略	叠加负荷 峰谷差/kWh	充电费用 满意度均值	出行便利 满意度均值	最大充电功 率波动/kWh
策略1	280.213	0.770	0.875	85.960
策略2	295.420	1.000	0.730	268.692
策略3	383.628	0.416	1.000	131.081
策略4	351.435	0.520	0.953	8.591
策略5	314.058	0.996	0.778	379.699

稳性。然而,这种做法却带来了双重挑战:首先,高峰时段的负荷总量增加了 163.37 kWh,大幅增加了高峰时段 NEMG 的供电压力;其次,降低了 EV 车主的充电费用满意度,进而削弱了他们的充电积极性。这凸显了本文提到的将 EV 车主的充电利益纳入考量的重要性。

相比之下,策略 2 和策略 5 虽然在减少 EV 车主充电费用的基础上有效改善了车主的充电体验,使各项满意度指标上升至 0.7 以上,但在有效引导和调节 EV 充电行为方面表现不佳,导致了“公地悲剧”的出现。由于大多数 EV 车主都倾向于在谷时的前两个小时充电以节省成本和时间,这就造成了电网的负荷不平衡和供需失衡。尤其是策略 5,在保证出行便利度的同时更加加剧了这种情况。同样地,策略 3 由于仅关注 EV 车主的出行便利度,缺乏对 EV 充电的有序引导,加上大部分 EV 是在峰荷时段入驻充电桩,导致了在峰荷时段后期出现大规模充电的情况,这使得策略 3 的峰谷差反增了 10.13%,大大加剧了 NEMG 在峰荷时段的供电压力。因此,上述 3 种策略所导致的结果均突出了兼顾 EV 车主充电利益和平滑系统负荷曲线的优化策略的必要性。

实际上,策略 1 所展现出的卓越成效充分验证了本文所提出的 EV 充电多目标优化模型的效能与实际应用价值。具体而言,在叠加负荷分布的均衡性上策略 1 实现了显著的优化,其峰谷差的缩小幅度达到了 19.56%,相比未优化状态有了明显的改善,图 6 清晰地显示了策略 1 在削峰填谷方面的显著效果;在 EV 车主的充电利益方面策略 1 显著提升了车主对于充电费用与出行便利的满意度,分别达到 0.77 和 0.875,这意味着超过 3/4 的 EV 车主能够享受到充电成本和时间上的双重节省;在充电功率波动方面策略 1 展现出卓越的负荷均衡能力,确保了同一时间段内负荷波动的最小化。综合审视各项指标,本文提出的基于 EV 充电满意度的多目标优化模型不仅成功调和了 EV 车主充电利益与 NEMG 供电负担之间的冲突,还实现了向更加理想化状态的迈进。

4.3 区间信息模糊规划模型的结果分析

为验证所提区间优化模型的有效性,构建了 4 种方案进行对比分析。

Case 1: 单目标区间线性规划模型, 仅以 NEMG 综合运行成本最小化为目标函数。

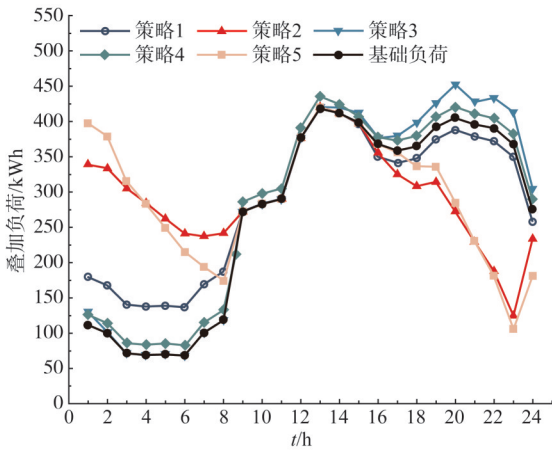


图 6 不同 EV 充电策略下的负荷曲线

Fig. 6 Load curves under different EV charging strategies

Case 2: 单目标区间线性规划模型, 仅以系统与上级电网交互电能峰值最小化为目标函数。

Case 3: 完全区间多目标模糊优化模型, 以 NEMG 综合运行成本最小化和与上级电网交互电能峰值最小化为目标函数。

Case 4: 所提区间信息模糊规划模型。

4 种方案均以相同的居民住宅 NEMG 结构为例进行建模, 负荷输入依据上层模型的结果确定, 光伏发电量依据光伏预测发电量波动 $\pm 5\%$ 确定。

表 5 对比了不同方案下 NEMG 的优化运行效益。其中, 单目标优化模型在其所针对的单项运行指标上均达到了最佳的优化效果, 例如, Case 1 相比于 Case 3 和 Case 4 在综合运行成本区间均值上分别降低了 8.45% 和 12.65%。然而, 在另一项非主要优化指标上单目标模型的优化效果却表现极差。相反地, 多目标优化模型在两项指标上均达到了次优的水平, 体现了一种平衡策略, 这突出了在 NEMG 运行过程中考虑多目标优化的必要性。

对比 Case 3 和 Case 4, Case 3 相比 Case 4 可以取得更低的综合运行成本、更小的交互电能峰值和更高的满意度。然而, 这并不意味着 Case 3 的优化效果一

表 5 不同方案下 NEMG 的运行效益情况

Tab. 5 Operational benefits of NEMG under different schemes

运行 案例	NEMG 综合 运行成本/元	交互电能 峰值/kWh	区间 标准差	满意度 区间
Case 1 [2 424. 1, 2 428. 8]		280. 7	2. 35/0. 0	
Case 2 [3 829. 7, 3 831. 7]		82. 07	1. 0/0. 0	
Case 3 [2 429. 2, 2 871. 8]	[82. 1, 124. 7]	221. 3/21. 3	[0. 878, 1. 00]	
Case 4 [2 629. 6, 2 926. 3]	[101. 1, 129. 2]	148. 4/14. 1	[0. 860, 0. 95]	

定强于Case 4, 因为从区间分布的角度来看, Case 4在NEMG运行效益指标方面的区间宽度和区间标准差均明显小于Case 3, 这两项指标是衡量区间数离散程度的变量, 其值越小代表着其结果更加稳定, 调度员在实时调度中对调度计划的调整难度也将越小。因此, Case 3的区间宽度及区间标准差相较于Case 4的更大, 这表明更广的区间所获得的更大经济效益或更优的稳定效益并不可靠。以GT出力为例, 如图7所示Case 3要想取得更好的运行效益, 需要在调度周期的大部分时间内使GT出力低且大幅度波动, 而为了满足系统电平衡又要求GT出力高且稳定, 这种情况在现实中显然是不可能实现的。相比之下, Case 4下GT出力波动幅度较小, 且在目标函数和约束条件中的取值一致, 未出现矛盾现象, 因此其优化效果更加可靠。综上所述, 上述分析验证了所提区间信息模糊规划模型的有效性。

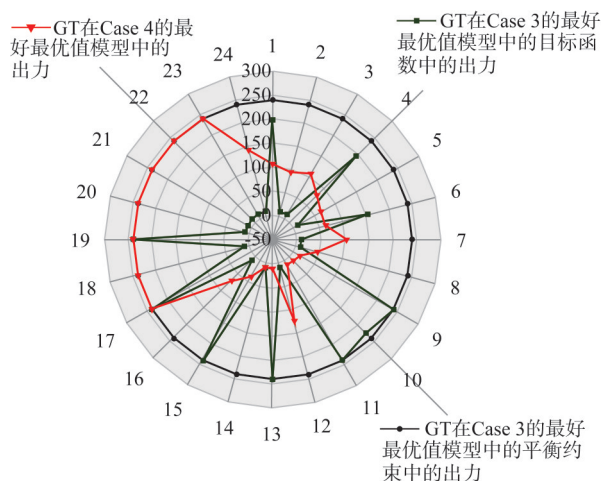


图7 不同区间优化模型下GT的发电功率分布

Fig. 7 GT generation powers distribution under different interval optimization models

5 结论

本文从居民用户和NEMG系统双方的利益出发构建了分层优化策略。上层模型综合考虑了居民的多样化用电场景, 平衡了居民用电偏好和NEMG的稳定性需求; 下层模型针对NEMG的运行特性克服了NEMG运行的不确定性和多重运行效益冲突的困难, 实现了NEMG运行效益的最优化。通过仿真验证得出以下结论。

1) 针对负荷需求响应的不确定性提出了基于分时电价的多目标优化模型, 既保证用电满意度高达

73.4%又有效地将电负荷峰谷差降低了9.49%, 实现了负荷削峰填谷。

2) 针对EV充电问题提出了EV充电多目标优化模型, 使EV充放电更加合理, 相比优化前降低了19.56%的峰谷差, 有效地协调了EV充电利益和NEMG供电压力之间的矛盾。

3) 针对NEMG运行过程中的不确定性和多重运行效益冲突的问题建立了区间信息模糊规划模型, 并与同类型优化模型进行了对比分析, 验证了所提模型应用的有效性。

参考文献

- [1] 郑玉平, 王丹, 万灿, 等. 面向新型城镇的能源互联网关键技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 2-15.
ZHENG Yuping, WANG Dan, WAN Can, et al. Key technology and application of energy internet oriented to new-type towns [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 2-15.
- [2] 顾海飞, 喻洁, 李扬, 等. 环境约束下含多能园区的新型城镇双层组合优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2441-2453.
GU Haifei, YU Jie, LI Yang, et al. Bi-level joint optimization economic dispatch of new-type town with multi-energy parks under environmental constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2441-2453.
- [3] 国家发展改革委, 国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016-2030)[R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2016.
- [4] 张仕鹏, 聂涌泉, 胡亚平, 等. 基于云边协同的多微电网双层分布式能源调度[J]. 南方电网技术, 2025, 19(4): 27-38.
ZHANG Shipeng, NIE Yongquan, HU Yaping, et al. Cloud-edge collaboration based two-level distributed energy dispatch for multi-microgrids [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(4): 27-38.
- [5] 李铁成, 杨少波, 傅本栋, 等. 主动负荷参与的含高比例分布式光伏台区经济自治运行[J]. 南方电网技术, 2022, 16(8): 12-21.
LI Tiecheng, YANG Shaobo, FU Bendong, et al. Active load participation with a high proportion of distributed photovoltaic area economic autonomous operation [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(8): 12-21.
- [6] 胡志强, 叶远誉, 俞林刚, 等. 主动负荷参与的低压台区三相负荷不平衡自动均衡方法[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 49-54.
HU Zhiqiang, YE Yuanyu, YU Lingang, et al. Active load participation in automatic balancing of three-phase load imbalance in low-voltage substations [J]. Electric Power, 2024, 57(2): 49-54.
- [7] AJOULABADI A, RAVADANEGH N S, MOHAMMADI-IVATLOO B. Flexible dispatch of reconfigurable microgrid-based distribution networks considering demand response program [J]. Energy, 2020(196): 117024.1-117024.10.
- [8] GAO B, CHEN C, QIN Y, et al. Evolutionary game-theoretic analysis for residential users considering integrated demand

- response [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9(6): 1500 – 1509.
- [9] WAN Y, QIN J, YU X, et al. Price-based residential demand response management in smart grids: a reinforcement learning-based approach [J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, 9(1): 123 – 134.
- [10] 魏震波, 张海涛, 魏平松, 等. 考虑动态激励型需求响应的微电网两阶段优化调度 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(19): 1 – 10.
WEI Zhenbo, ZHANG Haitao, WEI Ping'an, et al. Two-stage optimal dispatching for microgrid considering dynamic incentive-based demand response [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(19): 1 – 10.
- [11] 齐先军, 王朋, 张付华. 考虑需求响应不确定性的配电网模糊可信约束规划 [J]. *南方电网技术*, 2022, 16(12): 76 – 87.
Qi Xianjun, WANG Peng, ZHANG Fuhua. Fuzzy trusted constraint programming of distribution network considering demand response uncertainty [J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(12): 76 – 87.
- [12] 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.
- [13] 孙宇军, 王岩, 王蓓蓓, 等. 考虑需求响应不确定性的多时间尺度源荷互动决策方法 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(2): 106 – 113, 159.
SUN Yujun, WANG Yan, WANG Beibei, et al. Multi-time scale decision method for source-load interaction considering demand response uncertainty [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(2): 106 – 113, 159.
- [14] 赵冬梅, 宋原, 王云龙, 等. 考虑柔性负荷响应不确定性的多时间尺度协调调度模型 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(22): 21 – 30.
ZHAO Dongmei, SONG Yuan, WANG Yunlong, et al. Coordinated dispatch model with multiple time scales considering response uncertainty of flexible load [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(22): 21 – 30.
- [15] HUANG Z, GUO Z, MA P, et al. Economic-environmental dispatch of microgrid considering V2G-enabled electric vehicles integration [J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2022(32): 100872.1 – 100872.8.
- [16] 胡俊杰, 周华嫣然, 李阳. 集群电动汽车平抑光伏波动实时调度策略 [J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2552 – 2560.
HU Junjie, ZHOU Huayanran, LI Yang. Real-time dispatching strategy for aggregated electric vehicles to smooth power fluctuation of photovoltaics [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2552 – 2560.
- [17] 李一鸣, 王江江, 金莺, 等. 计及电动汽车有序调度的社区微网能量管理 [J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(19): 8090 – 8098.
LI Yiming, WANG Jiangjiang, JIN Ying, et al. Energy management of community micro grid considering the orderly dispatch of electric vehicles [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(19): 8090 – 8098.
- [18] 夏鑫, 钟浩, 张磊, 等. 计及动态电价的电动汽车参与微电网调度双层优化策略 [J]. *电力工程技术*, 2024, 43(3): 140 – 150.
- XIA Xin, ZHONG Hao, ZHANG Lei, et al. A two-layer optimization strategy for electric vehicles participating in microgrid dispatch considering dynamic electricity prices [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(3): 140 – 150.
- [19] SILVA C, FARIA P, VALE Z, et al. Demand response performance and uncertainty: A systematic literature review [J]. *Energy Strategy Reviews*, 2022 (41): 100857.1 – 100857.7.
- [20] 闫梦阳, 李华强, 王俊翔, 等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(2): 163 – 175.
YAN Mengyang, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Optimal operation model of a park integrated energy system considering uncertainty of integrated demand response [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(2): 163 – 175.
- [21] 崔杨, 郭福音, 仲悟之, 等. 多重不确定性环境下的综合能源系统区间多目标优化调度 [J]. *电网技术*, 2022, 46(8): 2964 – 2975.
CUI Yang, GUO Fuyin, ZHONG Wuzhi, et al. Interval multi-objective optimal dispatch of integrated energy system under multiple uncertainty environment [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(8): 2964 – 2975.
- [22] 朱晓荣, 谢婉莹, 鹿国微. 采用区间多目标线性规划法的热电联供型微网日前调度 [J]. *高电压技术*, 2021, 47(8): 2668 – 2679.
ZHU Xiaorong, XIE Wanying, LU Guowei. Day-ahead dispatch of combined heating and power microgrid with the interval multi-objective linear programming [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(8): 2668 – 2679.
- [23] BAKY A I. Solving multi-level multi-objective linear programming problems through fuzzy goal programming approach [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, 34(9): 2377 – 2387.
- [24] YANG X H, LENG Z Y, XU S P, et al. Multi-objective optimal dispatch for CCHP microgrids considering peak-load reduction by augmented-constraint method [J]. *New Energy*, 2021(172): 408 – 423.
- [25] 张良, 严正, 冯冬涵, 等. 采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略 [J]. *电网技术*, 2014, 38(4): 967 – 973.
ZHANG Liang, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Two-Stage optimization model based coordinated charging for EV charging Station [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(4): 967 – 973.
- [26] 程杉, 王贤宁, 冯毅焜. 电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(1): 39 – 46.
CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen. Decentralized optimization of ordered charging dispatch in electric vehicle charging station [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(1): 39 – 46.

收稿日期: 2024-06-11; 网络首发日期: 2024-10-28

作者简介:

杨晓辉(1978), 男, 教授, 博士, 研究方向为配电网优化调度和新能源并网技术, yangxiaohui@ncu.edu.cn;

黄泽中(2000), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为综合能源运行规划, 437844164@qq.com;

王晓鹏(1998), 男, 硕士, 研究方向为新能源微电网优化调度。