

考虑动态舒适区间的配网-台区-用户多层级 多目标协同优化方法

马瑞, 李佳乐, 宋晨辉

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114)

摘要: 在“双碳”目标和能源转型的推动下分布式光伏以“点多面广”特性接入配网, 使得配网层级间功率交互更加复杂, 传统的供给侧调节方式难以满足多源协同与多目标协调的运行需求。为此提出一种考虑动态舒适区间的配网-台区-用户多层级多目标协同优化方法。首先, 构建了配网-台区-用户多层级结构及分层调度框架: 将配电网划分为配网层、台区层和用户层, 各层源网荷储资源在本层内实现协同互动, 层与层之间进行双向功率传输和信息交互, 促进资源的合理分配与利用。其次, 建立了考虑动态舒适区间的柔性资源模型, 量化了居民用户在不同电价下的资源调控潜力, 实现了调控边界更新。然后, 建立了配网-台区-用户多层级多目标协同优化模型, 综合考虑不同层级优化目标, 制定自下而上的协调优化机制。最后, 通过算例仿真对所提策略进行了验证, 结果表明, 所提方法能充分挖掘和利用各层级源网荷储资源, 有效提高了光伏消纳、优化负荷曲线、降低用户用电成本以及保障配网安全经济运行。

关键词: 主动配电网; 多层级调度; 柔性资源; 调控潜力; 优化调度

Multi-Level Multi-Objective Collaborative Optimization Method for Distribution Network-Substation Area-End Users Considering Dynamic Comfort Intervals

MA Rui, LI Jiale, SONG Chenhui

(College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Driven by the "dual carbon" goals and energy transition, distributed photovoltaic systems with their characteristics of "numerous points and extensive coverage" are connected to distribution networks, making power interactions between distribution network levels more complex. Traditional supply-side regulation methods struggle to meet the operational demands of multi-source collaboration and multi-objective coordination. To address this, a multi-level multi-objective collaborative optimization method for distribution networks-substation areas-users is proposed, considering dynamic comfort zones. Firstly, a multi-level structure and hierarchical scheduling framework for distribution networks, transformer areas, and users is established. The distribution network is divided into the distribution network layer, transformer area layer, and user layer. Within each layer, source-grid-load-storage resources achieve collaborative interaction, while bidirectional power transfer and information exchange occur between layers, promoting rational resource allocation and utilization. Secondly, a flexible resource model incorporating dynamic comfort zones is developed to quantify residential users' resource regulation potential under varying electricity prices, enabling real-time adjustment of regulation boundaries. Then, a multi-level multi-objective collaborative optimization model for distribution networks-substation areas-users is formulated, comprehensively considering optimization objectives across different levels to establish a bottom-up coordination mechanism. Finally, the proposed strategy is validated through case simulations. The results demonstrate that the method effectively maximizes and utilizes source-grid-load-storage resources across all levels, significantly improving photovoltaic integration, optimizing load curves, reducing user electricity costs, and ensuring safe and economical distribution network operation.

Key words: active distribution network; multi-level scheduling; flexible resources; regulation potential; optimal scheduling

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52307079)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52307079).

0 引言

随着我国“十四五”规划推进,分布式光伏以“点多面广”的特性接入配电网,其出力的波动性和不确定性带来功率返送、电压越限等问题,仅靠供给侧调节已难以保障新型电力系统的安全稳定运行^[1-2]。同时,随着配网规模不断扩大,层级之间功率交互频繁,涉及多元利益主体,配网优化更加复杂。在此背景下,开展配网-台区-用户多层次多目标协同调度方法研究,对保障配网安全运行、促进光伏消纳具有重要意义。

近年来,随着电动汽车、储能、柔性负荷在需求侧所占比重的不断增加,多种需求侧资源蕴含的巨大调控潜力逐渐凸显,为此,精准量化需求侧柔性资源的调控潜力是实现电力系统协调运行的重要前提^[3]。目前,针对需求侧柔性资源的调控潜力分析,国内外学者开展了一定研究工作,其中,居民温控负荷^[4](thermostatically controlled load, TCL)和电动汽车^[5](electric vehicle, EV)作为重要的柔性资源,相关研究主要针对这两类资源的调控潜力展开研究^[6]。在TCL调控潜力研究方面,文献[7]通过EnergyPlus模型获取不同建筑的负荷响应和热力学特性,通过回归模型提取小时时段、温度设定点调整幅度及室外温度等关键变量与TCL需求响应潜力的非线性关系;文献[8]针对居民空调提出了一种估算空调理论时变潜力的方法;文献[9]构建了考虑电价敏感度和热舒适偏好的用户行为模型,以用户满意度为约束计算温控负荷聚合备用容量,量化其调控潜力。

在EV调控潜力研究方面,文献[10]提出考虑用户决策依赖特性的多时段电动汽车可调度域构建方法,构建可调度域模型和多层级协调调控架构,对电动汽车集群的调控潜力进行分析和优化调控;文献[11]考虑经济用能和非完全理性行为因素,建立经济性-舒适度权衡自调度模型,提出了EV再调度能力的精确量化方法。

部分学者针对考虑柔性资源调控潜力的协同优化调度进行了研究,文献[12]将电动汽车、5G基站、温控负荷3种具有调控潜力的柔性资源引入台区作为决策变量进行优化调度,仿真验证3种弹性资源可以有效缓解台区电压越限和光伏发电反送电现象。文献[13]针对温控负荷和电动汽车建立聚合模

型,考虑用户调控意愿,对其聚类分组进行调控潜力评估,构建基于模糊机会约束规划的台区灵活资源多目标日前优化调度模型,为台区灵活资源优化调度提供了有效的方法。文献[14]将用户需求响应调控潜力引入传统用户行为模型进行改进,通过仿真验证了改进用户模型对用户总收益和用能舒适度均有提高。

然而,多数研究仅考虑针对单一类型资源开展研究,研究往往集中在温控负荷和电动汽车,还有其他柔性资源的调控潜力未能深入挖掘,如居民家电中的洗衣机、电饭锅等可时移设备,其运行时间存在一定的可调节特性。因此,应对居民用户各类型柔性资源的调控潜力进行全面评估,系统地量化各类柔性资源的调控潜力,以更好地参与电网优化调度。

在主动配电网分层优化方面,已有研究从输配协同、多微网系统协同运行等角度展开探索^[15]。文献[16]提出一种协调输电网与配点完后的双层协同优化模型,相比单层独立优化提高了系统对可再生能源的消纳能力和经济效益。文献[17]建立了基于数据驱动电压安全域的输-配-微多层级优化模型,将各层优化模型转化为边界变量的可行域,实现了输-配-微最优经济运行。文献[18]构建了双层最优潮流模型,通过将多微网系统视为电源接入配电网,显著提升了系统应对新能源波动的能力。文献[19-22]进一步考虑能量-备用协同控制、三相不平衡建模、P2P交易机制等特性,提出了多微网协同调度与主动配电网的优化策略,拓展了多层次主动配电系统的研究视角。

在配网台区调度方面,文献[23]建立配电网主变-馈线-台区分层优化模型,台区层将内部优化结果传递至馈线层,馈线层依据优化结果将配网划分为多个区域,实现主配协同优化。文献[24]建立计及自治运行优化的配电网台区调控模型,为配电网合理分配调节需求提供参考。文献[25]以配网多台区负载率均衡为目标建立多台区配电网双层优化模型,通过多台区间源荷储设备优化调度有效改善了配电网的负荷分布特性。

然而,针对主动配电网内部多层级之间的交互研究,大多研究只是将接入配网的微网、台区及负荷看作一个包含大量柔性资源的能量系统,忽略其与上层网络之间的边界连接与交互特性,且多数研

究以系统整体效益最优为主,未充分考虑配网、台区与用户各层级之间的目标差异与资源矛盾,随着配电网运行复杂程度的不断提升,有必要对考虑网络结构和层级之间的利益冲突的主动配电网协调优化调度进行研究。

综上所述,本文提出一种考虑动态舒适区间的配网-台区-用户多层次多目标协同优化方法,首先,构建配网-台区-用户多层次结构及分层调度框架,明确各层功能定位,实现层间源网荷储互动与交互协同;其次,针对用户侧多种柔性资源,建立考虑动态舒适区间的柔性资源模型,精准量化居民用户在不同电价环境下的资源调控潜力,实现调控边界的动态更新,为上层优化调度提供准确边界输入;最后,建立下中上三层协同优化模型,求解获得各层系统优化目标决策结果以及可控源荷储调度决策结果,经算例仿真验证了所提模型和方法的有效性。

1 配网-台区-用户多层次结构及分层调度框架

随着分布式光伏、储能、电动汽车、柔性负荷等多类型源荷储资源广泛接入主动配电网,其调度结构呈现出层级化、多主体化的发展趋势。传统集中式调度方式难以充分发挥各层级的调控潜力,也难以应对分布式资源接入下源荷不平衡、电压波动等问题。为此,本文提出一种配网-台区-用户多层次主动配电网结构与分层调度框架:将配网、台区、用户分为上、中、下三层体系,同层体系源网荷储互动运行,层间体系双向交互。

图1为所述配网-台区-用户多层次双向交互结构示意图。其中,配网层包含分布式电源(distributed generation, DG)、储能系统(energy storage system, ESS)、无功补偿器(static var compensator, SVC)等,与台区层可双向潮流传输,实现系统级运行目标如有功损耗、电压越限等;台区层包含具有需求响应能力的用户负荷(load with demand response capability, LDR)、DG、ESS等,与配网层和用户层双向潮流传输,负责协调内部源荷平衡,实现本地功率互济及响应资源整合;用户层包含各类柔性负荷,与台区层双向潮流传输,实现用户用电成本的优化及向上反馈调控潜力。

在该结构下,调度信息流采用“自下而上汇总响应潜力+自上而下分层调控”的双向交互模式:用

户层依据自身状态更新调控边界,台区层整合调控资源,配网层下发调度方案,实现分层调控。

2 考虑动态舒适区间的柔性资源建模与调控潜力分析

2.1 需求响应调整系数

受分时电价的影响,居民用户的需求响应意愿会随电价波动而变化,本文引入需求响应调整系数,建立动态用电舒适区间,量化分析居民用户在不同电价环境下的用电行为和资源调控潜力。

居民用户 t 时段柔性资源 n 需求响应调整系数 $\varepsilon_{n,t}$ 如式(1)所示。

$$\varepsilon_{n,t} = k_n \times \frac{\rho_t - \rho_e}{\rho_{\text{peak}} - \rho_{\text{valley}}} \quad (1)$$

式中: k_n 为柔性资源 n 电价响应的修正系数,表示居民用户的柔性资源对电价的敏感程度; ρ_t 为时段 t 电价; ρ_e 为基础电价; ρ_{peak} 为峰时电价; ρ_{valley} 为谷时电价。

本文各柔性负荷舒适区间调整量由需求响应调整系数决定,而需求响应调整系数基于分时电价设计,能够反映用户对电价变化的主动响应意愿。 $\varepsilon_{n,t}$ 为正表示为积极响应, $\varepsilon_{n,t}$ 为负表示为消极响应,其值大小反映了时段居民用户的柔性资源响应程度。

2.2 考虑动态舒适区间的可时移负荷用电模型

可时移负荷包括洗衣机、洗碗机、电饭锅等,运行时功率为恒定值,运行时间具有可调性,可时移负荷 i 在时段 t 的运行功率 $P_{i,t}^{\text{Time}}$ 如式(2)所示。

$$P_{i,t}^{\text{Time}} = S_{i,t}^{\text{Time}} P_{iN}^{\text{Time}} \quad (2)$$

式中: P_{iN}^{Time} 为可时移负荷 i 额定运行功率; $S_{i,t}^{\text{Time}}$ 为可时移负荷 i 在时段 t 运行状态, $S_{i,t}^{\text{Time}} = 0$ 表示设备 i 停止运行, $S_{i,t}^{\text{Time}} = 1$ 表示设备 i 开始运行。

可时移负荷可以在居民设定时间范围内选择启动或停止运行的时刻,一旦开始运行便不能中断。考虑动态舒适区间的可时移负荷运行时间可调裕度如式(3)所示。

$$\begin{cases} \Delta t_i = \frac{\varepsilon_{i,t} \times (t_{i,\text{end}}^0 - t_{i,\text{set}}^0)}{2} \\ t_{i,\text{set}} = t_{i,\text{set}}^0 - \Delta t_i \\ t_{i,\text{end}} = t_{i,\text{end}}^0 + \Delta t_i \\ t_{i,\text{set}} \leq t_{i,\text{start}} \leq t_{i,\text{end}} - T_i + 1 \\ \sum_{t=t_{i,\text{start}}}^{t_{i,\text{end}}+T_i-1} S_{i,t}^{\text{Time}} \Delta t = T_i \end{cases} \quad (3)$$

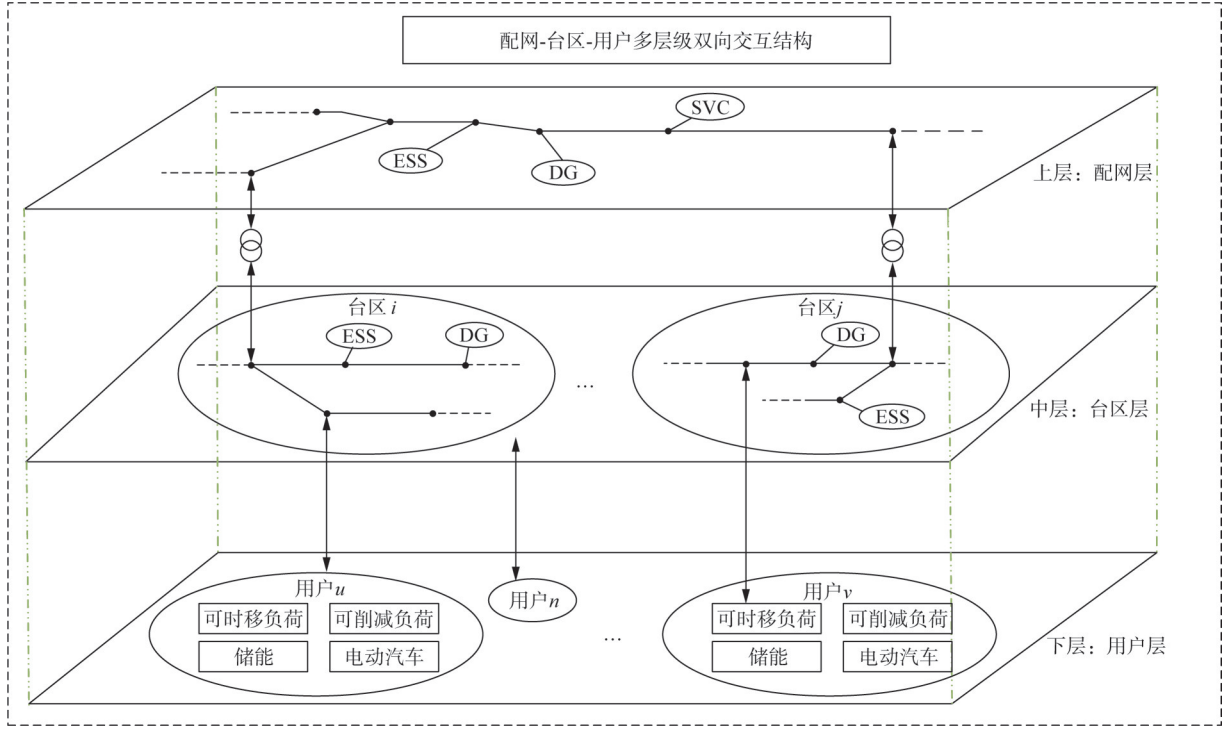


图 1 配网-台区-用户多层级双向交互结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the multi-level bidirectional interaction structure of the distribution network-substation area-end users systems

式中: $t_{i, \text{set}}^0$ 和 $t_{i, \text{end}}^0$ 分别为可时移负荷 i 的用电舒适区间的初始时间边界; Δt_i 为可时移负荷 i 的用电舒适区间的调整量; $t_{i, \text{start}}$ 为可时移负荷 i 开始运行时间; $t_{i, \text{set}}$ 和 $t_{i, \text{end}}$ 分别为调整后可时移负荷 i 的可以运行的起止时间; T_i 为可时移动负荷 i 工作运行时长; Δt 为时间间隔。

用户用电舒适度与设备运行时间的调整程度呈负相关。当负荷调度方案与用户设定的用电计划产生偏离时, 用电体验将受到影响, 偏离程度越大, 舒适度越低。居民用户对于可时移负荷 i 的用电舒适度 L_i 如式(4)所示。

$$L_i = \xi_i^{\text{Time}} |t_{i, \text{start}} - t_{i, \text{set}}| \quad (4)$$

式中 ξ_i^{Time} 为可时移负荷 i 的用电舒适系数, 其大小反映了用户对可时移负荷 i 调整的忍耐力。

考虑动态舒适区间的可时移负荷运行时间调整示意图如图 2 所示。在高峰电价时期, 居民用户的用电舒适时间区间范围扩大, 可时移负荷 i 在原运行时间停止运行, 在新的可运行范围内开始运行, 运行时间从高峰期转移至非高峰期; 在低谷电价时段, 居民用户的用电舒适时间区间范围缩小, 可时移负荷 i 运行时间固定在非高峰期运行。

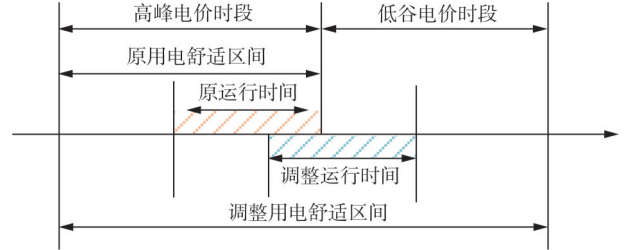


图 2 考虑动态舒适区间的可时移负荷运行时间调整示意图

Fig. 2 Schematic diagram of time-shiftable load operation time adjustment considering dynamic comfort intervals

2.3 考虑动态舒适区间的可削减负荷用电模型

居民用户中可削减负荷一般为温控型负荷, 运行功率具有灵活可调性, 可以通过调整其设定温度来控制设备功率实现调整居民负荷曲线。可削减负荷 j 在时段 t 的运行功率 $P_{j, t}^{\text{Power}}$ 如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_{j, t}^{\text{Power}} = S_{j, t}^{\text{Power}} P_j^{\text{Power}} \\ P_{j, \min}^{\text{Power}} \leq P_j^{\text{Power}} \leq P_{j, \max}^{\text{Power}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_j^{Power} 为可削减负荷 j 运行功率; $P_{j, \max}^{\text{Power}}$ 和 $P_{j, \min}^{\text{Power}}$ 分别为可削减负荷 j 的功率上下限; $S_{j, t}^{\text{Power}}$ 为可削减负荷 j 在时段 t 运行状态, $S_{j, t}^{\text{Power}} = 0$ 表示设备 j 停止运行, $S_{j, t}^{\text{Power}} = 1$ 表示设备 j 开始运行。

考虑动态舒适区间的可削减负荷用电热舒适温度区间如式(6)所示。

$$\begin{cases} \Delta T_{j,t} = \frac{\varepsilon_{j,t}(T_{j,\max} - T_{j,\min})}{2} \\ T_{j,t,\max} = T_{j,\max} + \Delta T_{j,t} \\ T_{j,t,\min} = T_{j,\min} - \Delta T_{j,t} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $T_{j,\max}$ 和 $T_{j,\min}$ 分别为可削减负荷 j 的用电热舒适温度区间初始上下界; $\Delta T_{j,t}$ 为可削减负荷 j 的用电热舒适温度区间的调整量; $T_{j,t,\max}$ 和 $T_{j,t,\min}$ 分别为调整后可削减负荷 j 的用电热舒适温度区间上下界。

对于空调, 室内温度变化和空调运行功率关系应满足式(7)。

$$\begin{cases} T_{in,t+1} = T_{in,t} + \alpha_{AC}(T_{out,t} - T_{in,t}) + \beta_{AC}P_{AC,t}\Delta t \\ T_{in,t,\min} \leq T_{in,t} \leq T_{in,t,\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $T_{in,t}$ 和 $T_{out,t}$ 分别为时段 t 室内和室外温度; $T_{in,t+1}$ 为时段 $t+1$ 室内温度; $T_{in,t,\min}$ 和 $T_{in,t,\max}$ 分别为调整后时段 t 用户可接受的室内最低和最高温度; α_{AC} 为室内外导热惯性因子; β_{AC} 为空调的温度调节系数; $P_{AC,t}$ 为时段 t 空调运行功率。

对于热水器, 其运行约束如式(8)所示。

$$\begin{cases} cpL_{\max}T_{ewh,t+1} = (1 - \alpha_{ewh})\{cp[(L_{\max} - L_t)T_{ewh,t} + L_tT_{cold} + \beta_{ewh}P_{ewh,t}\Delta t\} \\ T_{ewh,t,\min} \leq T_{ewh,t} \leq T_{ewh,t,\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $T_{ewh,t}$ 和 $T_{ewh,t+1}$ 分别为时段 t 和时段 $t+1$ 热水器的水温; α_{ewh} 为散热系数; c 为水的比热; ρ 为水的密度; $L_{\max}$ 为热水器容积; L_t 为时段 t 热水器用水量; T_{cold} 为进水温度; β_{ewh} 为电热转换系数; $P_{ewh,t}$ 为时段 t 热水器运行功率; $T_{ewh,t,\max}$ 和 $T_{ewh,t,\min}$ 分别为调整后时段 t 用户可接受的最高和最低水温。

负荷功率的改变会通过改变温度, 对用户的用电体验产生负面作用, 当室内温度或水温偏离用户设定的舒适温度范围时, 用户舒适度会降低。居民用户对于可削减负荷 j 的用电舒适度 L_j 如式(9)所示。

$$L_j = \xi_j^{\text{Power}} |T_{j,t} - T_{j,\text{set}}| \quad (9)$$

式中: ξ_j^{Power} 为可削减负荷 j 的用电舒适系数, 其大小反映了用户对可削减负荷 j 调整的忍耐度; $T_{j,t}$ 为用户设定温度; $T_{j,\text{set}}$ 为用户设定最适温度。

调整前后可削减负荷用电热舒适温度区间如图 3—4 所示。

低谷电价时段, 居民用户对参与电网调控持消

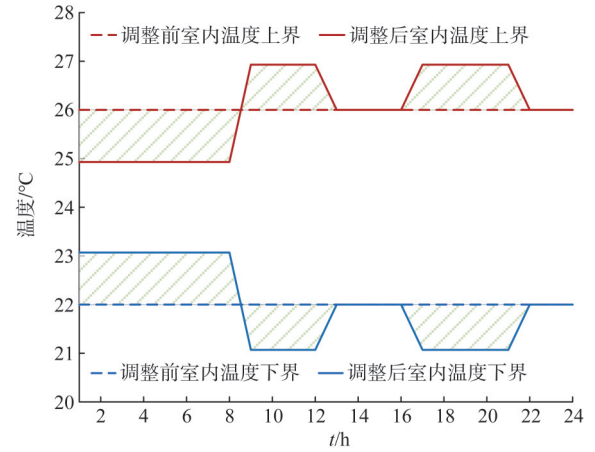


图 3 调整前后室内热舒适温度区间

Fig. 3 Indoor thermal comfort temperature ranges before and after adjustment

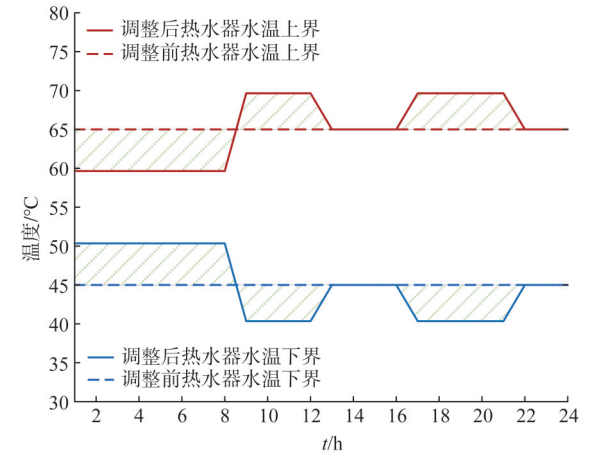


图 4 调整前后热舒适水温区间

Fig. 4 Thermal-comfort water temperature intervals before and after adjustment

极态度, 对于可削减负荷空调和热水器的温度要求提高, 高峰电价时段, 居民用户对参与电网调控持积极态度, 愿意牺牲一定的舒适度以降低用电成本, 对空调和热水器的温度要求降低。阴影部分表示热舒适温度区间上下调整范围。

2.4 考虑动态舒适区间的电动汽车充放电模型

本文在建立电动汽车充放电模型时采用车网互动(vehicle-to-grid, V2G)模式, 可以与电网进行双向互动, 即并网时段不仅可以充电, 也可以放电, 虽然在放电过程中电动汽车的电池寿命会受到一定影响, 但在一定相应补贴激励下, 基于降低用电成本的考虑, 用户倾向于选择让电动汽车放电。电动汽车充放电功率 $P_{EV,t}$ 如式(10)所示。

$$\begin{cases} P_{EV,t} = S_{EV,t} (v_{EV,t}^{ch} P_{EV,ch} - v_{EV,t}^{dis} P_{EV,dis}) \\ 0 \leq P_{EV,ch} \leq \eta_{EV,ch} P_{EV,N} \\ 0 \leq P_{EV,dis} \leq \frac{1}{\eta_{EV,dis}} P_{EV,N} \\ v_{EV,t}^{ch} + v_{EV,t}^{dis} \leq 1 \\ \sum_{t=t_a}^{t_1} S_{EV,t} \Delta t = T_{EV,ch} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $P_{EV,ch}$ 和 $P_{EV,dis}$ 分别为电动汽车充电和放电功率； $P_{EV,N}$ 为电动汽车额定充放电功率； $S_{EV,t}$ 为电动汽车时段 t 状态， $S_{EV,t} = 0$ 表示电动汽车离网， $S_{EV,t} = 1$ 表示电动汽车并网； $v_{EV,t}^{ch}$ 和 $v_{EV,t}^{dis}$ 分别为时段 t 电动汽车充放电状态，电动汽车充放电状态不能同时存在； $\eta_{EV,ch}$ 和 $\eta_{EV,dis}$ 分别为电动汽车的充放电效率； t_a 和 t_1 分别为电动汽车并网和离网时间； $T_{EV,ch}$ 为电动汽车所需充电时长。

考虑动态舒适区间的电动汽车充放电约束如式 (11) 所示。

$$\begin{cases} \Delta S_{OC EV,t} = \frac{\varepsilon_{EV,t} (S_{OC EV,max} - S_{OC EV,min})}{2} \\ S_{OC EV,t,max} = S_{OC EV,max} + \Delta S_{OC EV,t} \\ S_{OC EV,t,min} = S_{OC EV,min} - \Delta S_{OC EV,t} \\ S_{OC EV,t+1} = S_{OC EV,t} + \frac{P_{EV,t}}{E_{EV}} \cdot \Delta t \\ S_{OC EV,t,min} \leq S_{OC EV,t} \leq S_{OC EV,t,max} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $S_{OC EV,min}$ 和 $S_{OC EV,max}$ 分别为电动汽车充放电初始边界； $\Delta S_{OC EV,t}$ 为电动汽车充放电边界调整量； E_{EV} 为电动汽车额定容量； $S_{OC EV,t,max}$ 和 $S_{OC EV,t,min}$ 分别为调整后电动汽车 SOC 上下限。

电动汽车离网时 $S_{OC EV,1}$ 将对用户用电舒适度产生影响，当出行越偏离用户出行期望 $S_{OC EV,e}$ ，用户用电舒适度越低。居民用户对于电动汽车的用电舒适度 L_{EV} 如式 (12) 所示。

$$L_{EV} = \xi_{EV} |S_{OC EV,1} - S_{OC EV,e}| \quad (12)$$

式中 ξ_{EV} 为电动汽车的用电舒适系数，其大小反映了用户对电动汽车调整的忍耐力。

调整前后电动汽车充放电边界如图 5 所示。图中蓝色曲线表示定舒适区间的电动汽车充放电边界，红色曲线表示考虑动态用电舒适区间的电动汽车充放电边界。

2.5 考虑动态舒适区间的储能充放电模型

本文考虑用户侧配置小型户用储能单元，实现对户用光伏富裕电量的就地存储，并在负荷高峰或

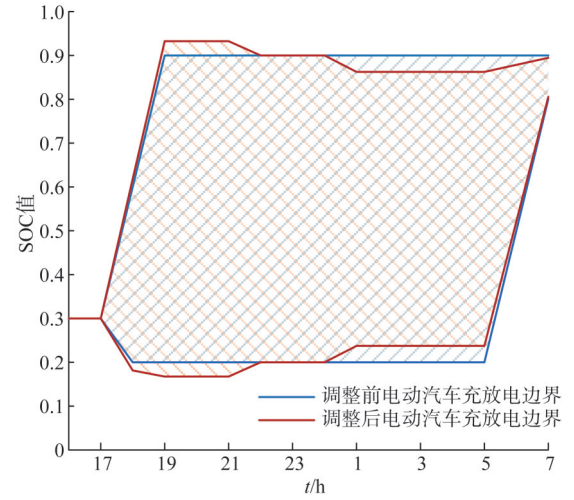


图 5 调整前后电动汽车充放电区间

Fig. 5 EV charging/discharging ranges before and after adjustment

高峰电价时段向用户负荷供电。同时，用户可根据自身用电偏好和调控意愿设定充放电上下限，实现主动参与多层级调度。

储能充放电功率 $P_{ESS,t}$ 如式 (13) 所示。

$$\begin{cases} P_{ESS,t} = v_{ESS,t}^{ch} P_{ESS,ch} - v_{ESS,t}^{dis} P_{ESS,dis} \\ 0 \leq P_{ESS,ch} \leq \eta_{ESS,ch} P_{ESS,N} \\ 0 \leq P_{ESS,dis} \leq \frac{1}{\eta_{ESS,dis}} P_{ESS,N} \\ v_{ESS,t}^{ch} + v_{ESS,t}^{dis} \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中： $P_{ESS,ch}$ 和 $P_{ESS,dis}$ 分别为户用储能单元充电和放电功率； $P_{ESS,N}$ 为其额定充放电功率； $v_{ESS,t}^{ch}$ 和 $v_{ESS,t}^{dis}$ 分别为时段 t 储能充放电状态，储能充放电状态不能同时存在； $\eta_{ESS,ch}$ 和 $\eta_{ESS,dis}$ 分别为储能的充放电效率。

考虑动态舒适区间的储能充放电约束如式 (14) 所示。

$$\begin{cases} \Delta S_{OC ESS,t} = \frac{\varepsilon_{ESS,t} (S_{OC ESS,max} - S_{OC ESS,min})}{2} \\ S_{OC ESS,t,max} = S_{OC ESS,max} + \Delta S_{OC ESS,t} \\ S_{OC ESS,t,min} = S_{OC ESS,min} - \Delta S_{OC ESS,t} \\ S_{OC ESS,t+1} = S_{OC ESS,t} + \frac{P_{ESS,t}}{E_{ESS}} \cdot \Delta t \\ S_{OC ESS,t,min} \leq S_{OC ESS,t} \leq S_{OC ESS,t,max} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $S_{OC ESS,min}$ 和 $S_{OC ESS,max}$ 分别为户用储能单元充放电初始边界； $\Delta S_{OC ESS,t}$ 为其充放电边界的调整量； E_{ESS} 为户用储能单元额定容量； $S_{OC ESS,t,max}$ 和 $S_{OC ESS,t,min}$ 分别为调整后户用储能单元 SOC 上下限。

户用储能单元的充放电次数 n_{ESS} 将对用户用电舒适度产生影响, 频繁的充放电循环会加速储能设备的老化进程, 影响储能的运行可靠性, 导致用户用电舒适度下降。居民用户对于储能的用电舒适度 L_{ESS} 如式(15)所示。

$$L_{\text{ESS}} = \xi_{\text{ESS}} n_{\text{ESS}} \quad (15)$$

式中 ξ_{ESS} 为用户用储能单元的用电舒适系数, 其大小反映了用户对其频繁充放的忍耐力。

调整前后储能充放电边界如图 6 所示。图中蓝色曲线表示定舒适区间的储能充放电边界, 红色曲线表示考虑动态用电舒适区间的储能充放电边界。

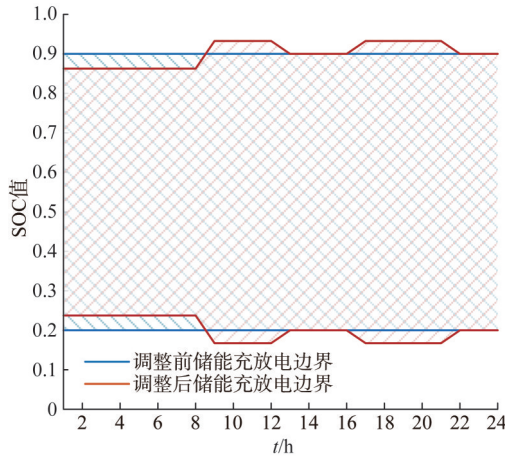


图 6 调整前后储能充放电区间

Fig. 6 Energy storage charge/discharging ranges before and after adjustment

2.6 用户调控潜力分析

基于本文所建立考虑动态舒适区间的柔性资源模型, 得到居民用户各调度时段内的调控潜力区间, 该区间反映了用户在保障其舒适性的前提下, 可上下调节的功率范围, 为台区层和配网层的优化调度提供调控区间。用户 n 调控潜力 $P_{n,t}^{\text{adj}}$ 如式(16)所示。

$$P_{n,t}^{\text{adj}} \in [P_{n,\min,t}^{\text{adj}}, P_{n,\max,t}^{\text{adj}}] \quad (16)$$

式中 $P_{n,\max,t}^{\text{adj}}$ 和 $P_{n,\min,t}^{\text{adj}}$ 分别为用户 n 在时段 t 的最大和最小调控范围。

考虑动态舒适区间的用户调控潜力如图 7 所示。

3 配网-台区-用户多层次多目标协同优化方法

3.1 下层: 用户侧柔性资源协同优化调度模型

3.1.1 目标函数

建立用户侧柔性资源协同优化调度模型, 如式

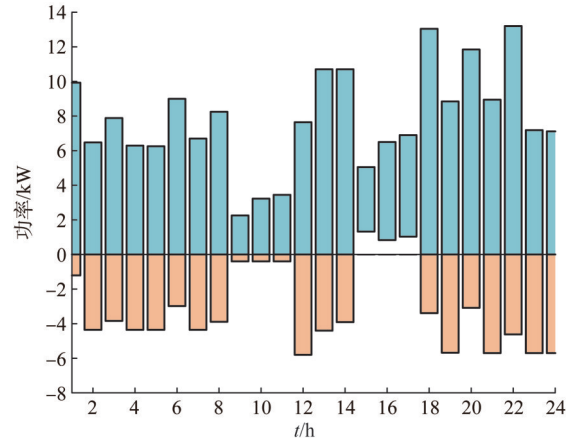


图 7 考虑动态舒适区间的用户调控潜力

Fig. 7 Demand-side flexibility potential considering dynamic comfort intervals

(17) 所示。

$$\begin{cases} \min f_{1\text{user}} = \min (C_{\text{ele}} + C_{\text{deg}}) \\ \min f_{2\text{user}} = \min \left(\sum_{i=1}^N L_i + \sum_{j=1}^M L_j + L_{\text{EV}} + L_{\text{ESS}} \right) \\ \min f_{3\text{user}} = \min \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{\text{load},t} - P_{\text{av}})^2 \end{cases} \quad (17)$$

式中: 目标函数 $f_{1\text{user}}$ 、 $f_{2\text{user}}$ 、 $f_{3\text{user}}$ 分别为用户用电成本、用电舒适度及用户负荷波动; C_{ele} 为用户购售电成本; C_{deg} 为用户电动汽车和户用储能单元电池折旧成本; $P_{\text{load},t}$ 为 t 时段居民用户用电净负荷; P_{av} 为居民用户用电净负荷平均值。

其中 C_{ele} 和 C_{deg} 表达如式(18)所示。

$$\begin{cases} C_{\text{ele}} = \sum_{t=1}^T (P_{\text{download},t} \rho_t - P_{\text{upload},t} \rho_{\text{re}}) \Delta t \\ C_{\text{deg}} = \sum_{t=1}^T (|P_{\text{EV},t}| + |P_{\text{ESS},t}|) \Delta t \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{\text{download},t}$ 为 t 时段居民用户向电网购买的电功率; $P_{\text{upload},t}$ 为 t 时段居民用户向电网售出的电功率; ρ_{re} 为 t 时段居售电价格。

3.1.2 约束条件

1) 电功率平衡约束

$$P_{\text{PV},t} + P_{\text{download},t} - \Delta P_{\text{PV},t} = \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{Time}} + \sum_{j=1}^M P_{j,t}^{\text{Power}} + P_{\text{EV},t} + P_{\text{ESS},t} + P_{\text{upload},t} \quad (19)$$

式中 $\Delta P_{\text{PV},t}$ 为 t 时段弃光量。

2) 居民各设备功率约束

居民用户各柔性资源功率约束见第 2 节, 具体各设备功率约束此处不再赘述。

3) 储能充放电约束

$$\begin{cases} S_{\text{OC ESS, end}} = S_{\text{OC ESS, start}} \\ \sum_{t=1}^{T_{\text{ESS}}} Y_{\text{ESS}, t} \leq N_{\text{ESS}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $S_{\text{OC ESS, start}}$ 和 $S_{\text{OC ESS, end}}$ 分别为户用储能单元调度开始和结束的 SOC 值; T_{ESS} 为户用储能单元的一个调度周期时长; $Y_{\text{ESS}, t}$ 为其充放电转换状态; N_{ESS} 为其一个调度周期内充放电转换最大次数。

4) 电动汽车出行期望 SOC 约束

为了保证电动汽车在离网时具备足够的电量, 满足用户出行需求, 需要满足以下条件。

$$S_{\text{OC EV, l}} \geq S_{\text{OC EV, t, e}} \quad (21)$$

式中 $S_{\text{OC EV, l}}$ 为电动汽车离网时的荷电状态。

5) 反送电约束

$$P_{\text{upload, t}} \leq P_{\text{upload, max}} \quad (22)$$

式中 $P_{\text{upload, max}}$ 为用户可反送功率最大值。

3.2 中层: 多用户交互响应的台区最优潮流模型

3.2.1 目标函数

以台区分布式光伏弃光量与运行成本最小为目标, 建立多用户交互响应的台区最优潮流模型, 如式(23)所示。

$$\begin{cases} \min f_{1\text{TA}} = \min \sum_{u=1}^U \sum_{t=1}^T P_{u, \text{valley}, t} \\ \min f_{2\text{TA}} = \min \left(\sum_{u=1}^U C_{u-\text{ADN}} + \sum_{u=1}^U C_{u-\text{user}} \right) \end{cases} \quad (23)$$

式中: 目标函数 $f_{1\text{TA}}$ 、 $f_{2\text{TA}}$ 分别为台区层分布式光伏弃光量、台区层运行成本; $P_{u, \text{valley}, t}$ 为台区 u 弃光量; $C_{u-\text{ADN}}$ 为台区 u 与配网交互成本; $C_{u-\text{user}}$ 为台区 u 与用户交互成本。

在多用户交互机制下, 结合潮流功率平衡、节点电压限制等约束实现对台区内部源荷资源与用户响应行为的协调控制。

3.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{\text{Gp}, t} - P_{\text{Lp}, t} = U_{p, t} \sum_{q \in \Omega_{\text{clsc}, p}} U_{q, t} (G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) \\ Q_{\text{Gp}, t} - Q_{\text{Lp}, t} = U_{p, t} \sum_{q \in \Omega_{\text{clsc}, p}} U_{q, t} (G_{pq} \sin \theta_{pq} - B_{pq} \cos \theta_{pq}) \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{\text{Gp}, t}$ 和 $Q_{\text{Gp}, t}$ 分别为 t 时段节点 p 注入的电源有功功率和无功功率; $P_{\text{Lp}, t}$ 和 $Q_{\text{Lp}, t}$ 分别为 t 时段节点 p 流出的负荷有功功率和无功功率; $\Omega_{\text{clsc}, p}$ 为与节点 p

相连的所有节点的集合; θ_{pq} 为节点 p 、 q 之间的相角差; G_{pq} 和 B_{pq} 分别为节点 p 、 q 之间的线路电导和电纳。

2) 台区安全运行约束

$$\begin{cases} U_{p, \min} \leq U_{p, t} \leq U_{p, \max} \\ P_{u-\text{ADN}, \min} \leq P_{u-\text{ADN}, t} \leq P_{u-\text{ADN}, \max} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $U_{p, \max}$ 和 $U_{p, \min}$ 分别为 t 时段节点 p 电压幅值的上限和下限; $P_{u-\text{ADN}, \max}$ 和 $P_{u-\text{ADN}, \min}$ 分别为台区与上层配网交互功率的上限和下限。

3) 台区与用户交互边界约束

$$\begin{cases} P_{u-n, t} + P_{n-u, t} = 0 \\ Q_{u-n, t} + Q_{n-u, t} = 0 \\ U_{u-n, t} = U_{n-u, t} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $Q_{u-n, t}$ 为 t 时段台区 u 向用户 n 输送无功功率; $Q_{u-\text{ADN}, t}$ 为 t 时段用户 n 向台区 u 输送无功功率; $U_{u-n, t}$ 和 $U_{n-u, t}$ 为 t 时段台区 u 与用户 n 相连节点处电压幅值。

$$\max \{ x_n^{\min}, x_u^{\min} \} \leq \{ x_{\text{user}, t}, x_{\text{TA}, t} \} \leq \min \{ x_n^{\max}, x_u^{\max} \} \quad (27)$$

式中: $x_{n, t} \supseteq \{ P_{n-u, t}, Q_{n-u, t}, U_{n-u, t} \}$; $x_{u, t} \supseteq \{ P_{u-n, t}, Q_{u-n, t}, U_{u-n, t} \}$ 。

4) 用户之间交互功率约束

$$\begin{cases} P_{n-m, t} + P_{m-n, t} = 0 \\ Q_{n-m, t} + Q_{m-n, t} = 0 \end{cases} \quad (28)$$

5) 需求响应约束

$$0 \leq P_{\text{dr}, n, t} \leq P_{\text{dr}, n, \max} \quad (29)$$

式中 $P_{\text{dr}, n, \max}$ 为用户 n 需求响应最大调整功率。

3.3 上层: 多台区互联的 ADN 最优潮流模型

3.3.1 目标函数

以配网运行成本和有功网损最小为目标, 建立了多台区互联的 ADN 最优潮流模型, 如式(30)所示。

$$\begin{cases} \min f_{1\text{ADN}} = \min (C_{\text{ADN}-\text{TA}} + C_{\text{PV}} + C_{\text{ESS}} + C_{\text{CB}} + C_{\text{dr}}) \\ \min f_{2\text{ADN}} = \min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{(p, q) \in L} Z_{pq} \left(\frac{P_{pq, t}^2 + Q_{pq, t}^2}{U_{p, t}^2} \right) \right) \end{cases} \quad (30)$$

式中: 目标函数 $f_{1\text{ADN}}$ 、 $f_{2\text{ADN}}$ 分别为配网层总运行成本及有功功率网损; $C_{\text{ADN}-\text{TA}}$ 为配网与台区交互成本; C_{PV} 为配网中光伏发电运维成本; C_{ESS} 为配网中储能系统调度成本; C_{CB} 为配网中补偿电容器组调度成本; C_{dr} 为配网中台区需求响应调度成本; L 为网络支路; Z_{pq} 为节点 p 、 q 之间的支路阻抗;

$P_{pq,t}$ 、 $Q_{pq,t}$ 分别为 t 时段支路 pq 的有功和无功功率;
 $U_{p,t}$ 为 t 时段节点 p 的电压幅值。

3.3.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{Gp,t} - P_{Lp,t} = U_{p,t} \sum_{q \in \Omega_{\text{dis}p}} U_{q,t} (G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) \\ Q_{Gp,t} - Q_{Lp,t} = U_{p,t} \sum_{q \in \Omega_{\text{dis}p}} U_{q,t} (G_{pq} \sin \theta_{pq} - B_{pq} \cos \theta_{pq}) \end{cases} \quad (31)$$

2) 配网安全运行约束

$$\begin{cases} U_{p,\min} \leq U_{p,t} \leq U_{p,\max} \\ P_{\text{net},\min} \leq P_{\text{net},t} \leq P_{\text{net},\max} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $P_{\text{net},t}$ 为 t 时段配网与主网联络线的交互功率;
 $P_{\text{net},\max}$ 和 $P_{\text{net},\min}$ 分别为配网与主网联络线交互功率
上限和下限。

3) 配网与台区交互边界约束

$$\begin{cases} P_{u-\text{ADN},t} + P_{\text{ADN}-u,t} = 0 \\ Q_{u-\text{ADN},t} + Q_{\text{ADN}-u,t} = 0 \\ U_{u-\text{ADN},t} = U_{\text{ADN}-u,t} \end{cases} \quad (33)$$

式中: $Q_{u-\text{ADN},t}$ 为 t 时段台区 u 向配网输送无功功率;
 $Q_{u-\text{ADN},t}$ 为 t 时段配网向台区 u 输送无功功率; $U_{u-\text{ADN},t}$
和 $U_{\text{ADN}-u,t}$ 为 t 时段台区 u 与ADN相连节点处电压
幅值。

$$\max \{x_{\text{ADN}}^{\min}, x_u^{\min}\} \leq \{x_{\text{ADN},t}, x_{\text{TA},t}\} \leq \min \{x_{\text{ADN}}^{\max}, x_u^{\max}\} \quad (34)$$

式中: $x_{\text{ADN},t} \supseteq \{P_{\text{ADN}-u,t}, Q_{\text{ADN}-u,t}, U_{\text{ADN}-u,t}\}$; $x_{\text{TA},t} \supseteq \{P_{u-\text{ADN},t}$
 $Q_{u-\text{ADN},t}, U_{u-\text{ADN},t}\}$ 。

4) 台区之间交互约束

$$\begin{cases} P_{u-v,t} + P_{v-u,t} = 0 \\ Q_{u-v,t} + Q_{v-u,t} = 0 \end{cases} \quad (35)$$

式中: $P_{u-v,t}$ 和 $Q_{u-v,t}$ 分别为台区 u 向台区 v 输送的有
功功率和无功功率; $P_{v-u,t}$ 和 $Q_{v-u,t}$ 分别为台区 v 向台
区 u 输送的有功功率和无功功率。

5) 补偿电容器组约束

$$\begin{cases} Q_{\text{CB},c,t} = G_{\text{CB},c,t} Q_{\text{CB},c,\text{step}} \\ G_{\text{CB},c,t} \leq G_{\text{CB},c,\max} \\ |Q_{\text{CB},c,t+1} - Q_{\text{CB},c,t}| \leq Q_{\text{CB},c,\text{step}} \end{cases} \quad (36)$$

式中: $Q_{\text{CB},c,t}$ 为 t 时段补偿电容器组 c 投运补偿功
率; $Q_{\text{CB},c,\text{step}}$ 为补偿电容器组 c 每组补偿功率;
 $G_{\text{CB},c,t}$ 为 t 时段补偿电容器组 c 的投运补偿组数;
 $G_{\text{CB},c,\max}$ 为补偿电容器组 c 的最大投运补偿组数;受

设备使用寿命的限制,每一次投切都必须是成组操
作且单次投切组数只能为一组。

6) 需求响应约束

$$0 \leq P_{\text{dr},u,t} \leq P_{\text{dr},u,\max} \quad (37)$$

式中 $P_{\text{dr},u,\max}$ 为台区 u 需求响应最大调整功率。

3.4 配网-台区-用户多层次多目标协同优化方法

基于配网-台区-用户多层次双向交互结构与各
层级优化模型,提出配网-台区-用户多层次多目标
协同优化方法。各层级有不同的优化目标,以满足
不同层级的需求:用户层以降低用电成本、减小负
荷波动为目标,台区层以提高光伏消纳、降低运行
成本为目标,配网层以降低有功网损和运行成本为
目标。层级间通过潮流功率平衡、节点电压限制与
边界功率交互等约束条件实现全局协同。在此基础
上,结合前推回代、粒子群算法进行求解,求解算
法流程如图8所示。

具体求解步骤如下。

步骤1:输入主动配电网的结构信息以及各层
级源荷储设备参数,基于随机模糊模拟获取光伏随
机模糊出力,设置 $t=1$;

对于用户 n ,执行以下步骤。

步骤2:基于主动配电网制定的分时电价,依
据用户设备运行计划计算时段 t 动态舒适区间及各
类柔性资源调控潜力区间;

步骤3:以用户用电成本和用电舒适度为优化
目标,通过粒子群算法优化得到时段 t 用户各柔性
资源协同优化结果以及净负荷/出力;

步骤4:将用户调控潜力区间及优化结果作为
输入变量传输至中层台区层;

对于台区 u ,执行以下步骤。

步骤5:获取各用户时段 t 调控潜力区间和净负
荷/出力信息,以台区光伏消纳及运行成本为优化
目标,通过粒子群算法优化得到时段 t 台区内各用
户交互响应功率和与台区交互功率,以及台区内各
源储设备出力,计算光伏消纳率;

步骤6:获取时段 t 台区-用户连接点功率交互
信息和节点电压信息,通过前推回代计算时段 t 台
区 u 潮流,得到台区内各节点功率、电压及相角
数据;

步骤7:计算时段 t 所有用户与台区交互边界并
行收敛结果,台区 u 与用户 n 并行收敛条件如下。

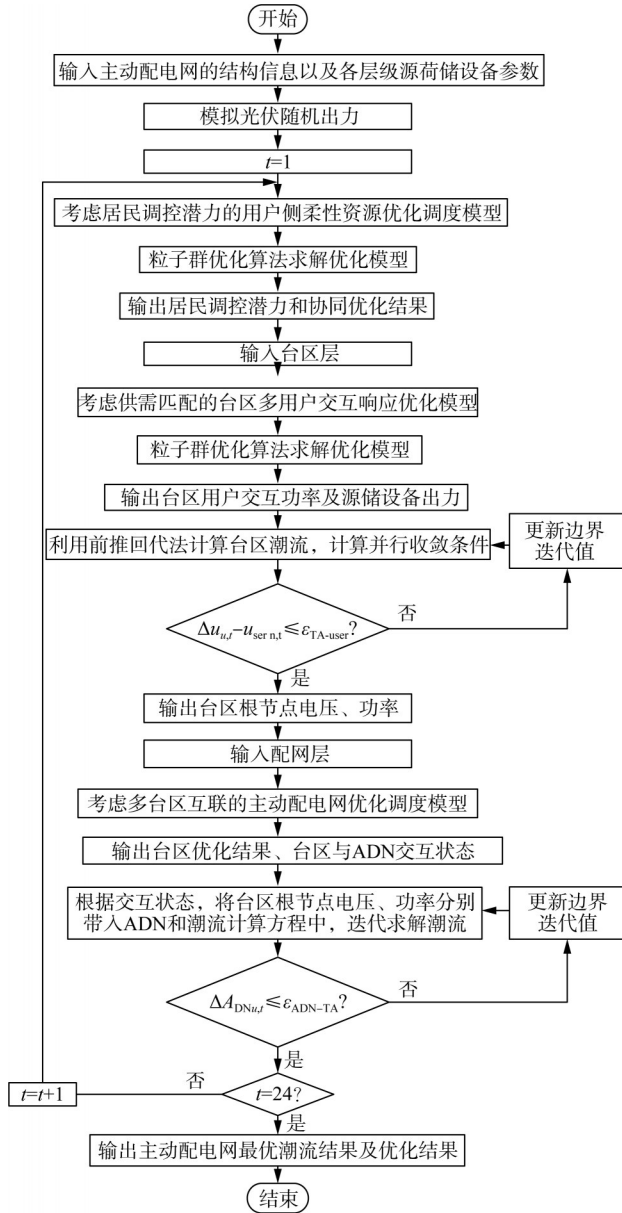


图 8 算法流程图

Fig. 8 Algorithm flow chart

$$\Delta u_{u,t} - u_{ser n,t} = \left| \frac{P_{u-n,t} + P_{n-u,t}}{U_{u-n,t} - U_{n-u,t}} \right| \quad (38)$$

判断 $\Delta u_{u,t} - u_{ser n,t} \leq \varepsilon_{TA-user}$ ，若满足，则输出台区 u 潮流结果，将台区 u 根节点功率作为净负荷/出力传输至上层配网层；若不满足，则令用户 n 边界向量等于台区 u 边界向量，返回步骤 6；

对于主动配电网，执行以下步骤。

步骤 8：获取时段 t 各台区净负荷/出力信息，以配网运行成本和有功网损为目标，优化得到时段 t 各台区节点与配网交互功率值与台区间功率交互

值，以及时段 t 配网各源储设备出力；

步骤 9：获取时段 t 所有配网-台区连接点功率交互信息和节点电压信息，通过牛顿拉夫逊法计算主动配电网潮流，得到配网内各节点功率、电压及相角数据；

步骤 10：计算时段 t 所有台区与配网交互边界并行收敛结果，配网与台区 u 并行收敛条件如下。

$$\Delta A_{DNu,t} = \left| \frac{P_{ADN-u,t} + P_{u-ADN,t}}{U_{ADN-u,t} - U_{u-ADN,t}} \right| \quad (39)$$

判断 $\Delta A_{DNu,t} \leq \varepsilon_{ADN-TA}$ ，若满足，则输出主动配电网潮流结果；若不满足，则令台区 u 边界向量等于配网边界向量，返回步骤 9；

步骤 11：判断 t 是否达到 24，若未达到，则令 $t = t + 1$ ，返回步骤 2，若达到，输出主动配电网最优潮流结果及调度计划。

4 算例仿真与结果分析

4.1 算例系统及其参数

算例采用改进 IEEE 33 节点配电网进行仿真验证，算例结构见图 9；IEEE 33 节点配网系统和低压台区节点负荷和支路阻抗值见表 1—2；用户各设备参数如表 3—5 所示。

4.2 算例仿真结果分析

4.2.1 下层用户层优化结果分析

本文所建模型根据用户需求与调控意愿对用户层每户用户进行差异化优化，仿真采用相同的优化流程对所有用户逐户求解。图 10—13 所展示结果为用 1 典型响应过程，定舒适区间和动舒适区间下用户 1 各负荷一个调度周期内优化结果如图 10—11 所示。

结果表明，优化后用户各负荷错峰运行，户用储能单元于白天光伏出力充足时期充电，夜间负荷高峰期放电；电动汽车于午间并网充电消纳光伏，傍晚并网于高峰电价时段放电供居民其他负荷运行，低谷电价时段充电，以降低居民用电成本。对比定舒适区间下用户优化，由于舒适区间的动态调整，可时移负荷的运行时间更灵活，可削减负荷低电价时段运行功率区间更宽泛，负荷分布更均匀。

定舒适区间和动舒适区间下优化后用户室温、热水器水温变化情况如图 12—13 所示。两种舒适区间设定下，优化调度后的室温均维持在满足居

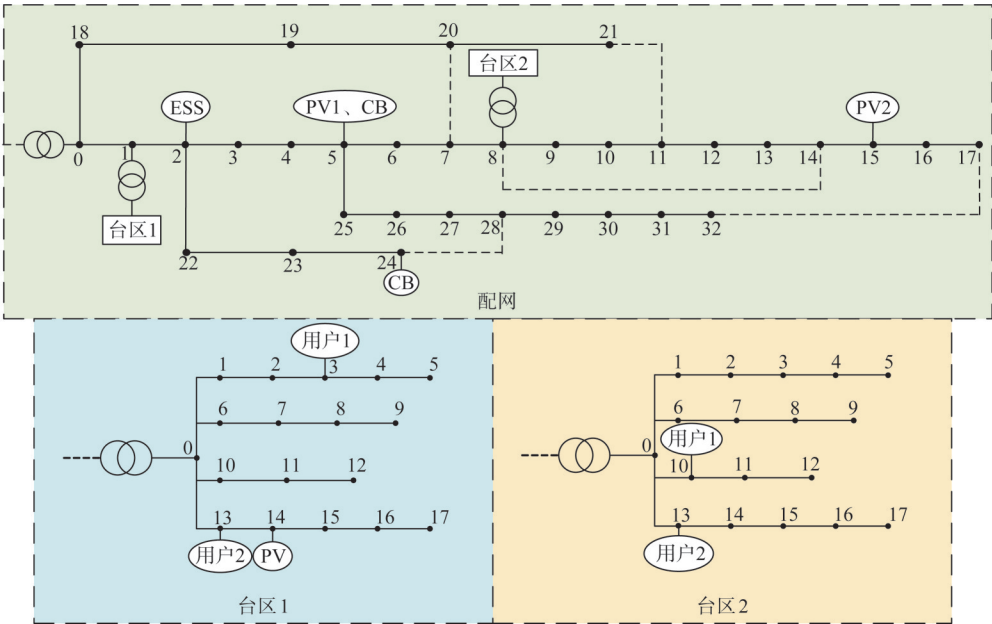


图9 定舒适区间下用户优化结果

Fig. 9 User optimization results under a defined comfort range

表 1 配网各支路阻抗和节点负荷

Tab. 1 Impedance of various branches and the node loads in the distribution network

节点 p	节点 q	支路阻抗	节点 q 负荷	节点 p	节点 q	支路阻抗	节点 q 负荷
0	1	0.092 2+j0.047 0	100+j60	16	17	0.372 0+j0.574 0	90+j40
1	2	0.914 7+j3.558 6	90+j40	0	18	0.164 0+j0.156 5	90+j40
2	3	0.366 0+j0.186 4	120+j80	18	19	1.504 2+j1.355 4	90+j40
3	4	0.381 1+j0.194 1	60+j30	19	20	0.409 5+j0.478 4	90+j40
4	5	0.819 0+j0.707 0	60+j20	20	21	0.708 9+j0.937 3	90+j40
5	6	0.187 2+j0.618 8	200+j100	2	22	0.451 2+j0.308 3	90+j50
6	7	0.711 4+j0.235 1	200+j100	22	23	0.898 0+j0.709 1	420+j200
7	8	1.030 0+j0.740 0	60+j20	23	24	1.317 7+j4.008 6	420+j200
8	9	1.465 7+j4.047 5	60+j20	5	25	0.203 0+j0.103 4	60+j25
9	10	0.196 6+j0.065 0	45+j30	25	26	0.284 2+j0.144 7	60+j25
10	11	0.374 4+j0.123 8	60+j35	26	27	1.059 0+j0.933 7	60+j20
11	12	1.468 0+j1.155 0	60+j35	27	28	0.804 2+j0.700 6	120+j70
12	13	0.541 6+j0.712 9	120+j80	28	29	0.507 5+j0.258 5	200+j600
13	14	0.591 0+j0.526 0	60+j10	29	30	0.974 4+j0.963 0	150+j70
14	15	0.746 3+j0.545 0	60+j20	30	31	0.310 5+j0.361 9	210+j100
15	16	1.289 0+j1.721 0	20+j20	31	32	0.341 0+j0.536 2	60+j40

民舒适度要求的范围内。室温定舒适区间为22~26℃,定舒适区间优化下,0时—8时低电价时段,室内温度几乎贴着最低温度界限运行,空调运行功率较高;随着室外温度逐渐升高,室内温度也随之逐渐增长,14时之后室内温度保持在26℃左右。室温动舒适区间范围随着电价变化而变化,动舒适区间优化下,0时—8时低电价时段,

用户更在意用电体验的舒适性,室温维持在最适温度24℃左右,9时—12时和17时—21时高电价时段,此时用户更在意用电成本,对于室温要求适当放宽,室温于21时达到最高温度26.8℃。

对于热水器运行调控,仅在用户用水需求时间段内进行,非用水时段,水温随时间自然衰减。目标舒适温度区间由用户按需设定,本文所提方

表 2 低压台区各支路阻抗和节点负荷

Tab. 2 Impedances of various branches and the node loads in the low-voltage distribution area

节点 p	节点 q	支路阻抗	节点 q 负荷	节点 p	节点 q	支路阻抗	节点 q 负荷
0	1	0.220 2+j0.170 5	13.775 0+j4.180 7	0	10	0.007 0+j0.005 4	2.920 0+j0.908 0
1	2	0.016 6+j0.012 9	25.219 0+j15.560 0	10	11	0.054 8+j0.042 4	12.633 0+j5.826 9
2	3	0.029 0+j0.022 5	1.522 9+j0.650 5	11	12	0.362 3+j0.942 0	8.389 6+j6.715 2
3	4	0.053 7+j0.041 5	31.067 0+j29.226 0	0	13	0.019 4+j0.024 7	15.569 0+j13.747 0
4	5	0.010 7+j0.008 3	2.279 2+j1.827 2	13	14	0.057 6+j0.046 9	0.208 3+j0.129 1
0	6	0.251 4+j0.194 6	5.050 8+j3.786 3	14	15	0.026 1+j0.038 2	61.250 0+j40.746 0
6	7	0.038 7+j0.029 9	24.067 0+j23.626 0	15	16	0.020 4+j0.029 9	12.781 0+j9.161 0
7	8	0.079 5+j0.061 5	12.772 0+j8.504 7	16	17	0.054 7+j0.026 0	22.625 0+j17.508 0
8	9	0.135 9+j0.105 2	7.279 2+j4.871 8	17	18	0.059 9+j0.022 5	7.900 0+j5.134 0

表 3 居民柔性家电设备运行参数

Tab. 3 Residential flexible household appliances operating parameters

设备	初始设置	功率/kW
空调/℃	[23,26]	[0,1.5]
热水器/℃	[50,60]	[0,2.5]
洗衣机	06:00—22:00	0.4
洗碗机	18:00—22:00	2
电饭锅	10:00—13:00 16:00—18:00	1.2
照明	18:00—00:00	0.3
冰箱	01:00—00:00	0.2

表 4 居民电动汽车相关参数

Tab. 4 Operating parameters of flexible household appliances for residential use

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电池容量/kWh	40	额定充电功率/kW	8
最大允许荷电状态	0.9	额定放电功率/kW	8
最小允许荷电状态	0.1	充电效率/%	95
电动汽车并网时间	17:00—次日 07:00	放电功率/%	95

表 5 居民户用储能单元相关参数

Tab. 5 Relevant parameters of the residential energy storage system

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定容量/kWh	3	额定充电功率/kW	0.5
初始荷电状态	0.5	额定放电功率/kW	0.5
最大允许荷电状态	0.9	充电效率/%	95
最小允许荷电状态	0.1	放电功率/%	95

法根据用户需求与调控意愿输出优化后动态舒适区间，如图 13 所示，两种舒适区间设定下，优化调度后的水温在居民用户用水期间均能维持在满

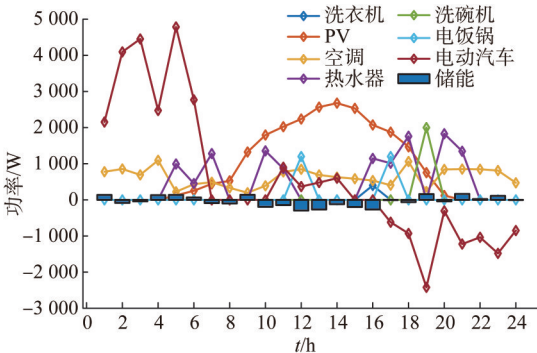


图 10 定舒适区间下用户优化结果

Fig. 10 User optimization results under fixed comfort intervals

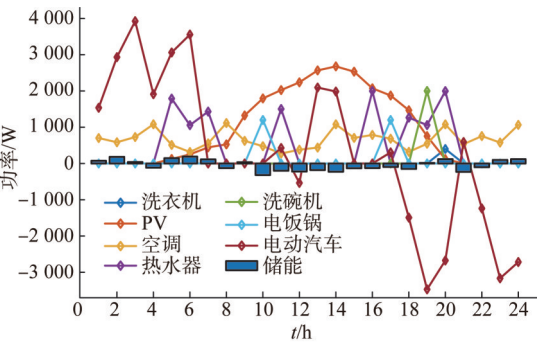


图 11 动舒适区间下用户优化结果

Fig. 11 User optimization results under dynamic adaptive comfort intervals

足居民舒适度要求的范围内。与定舒适区间下水温变化情况相比，动舒适区间下水温曲线波动相对较平缓，表明热水器在用水时段加热后就保持在相对较低的功率运行，也能保证水温在舒适区间运行。

定舒适区间下和动舒适区间下居民用电成本、光伏消纳率对比如表 6 所示。

由表 6 可知，本文所提考虑动态舒适区间的用

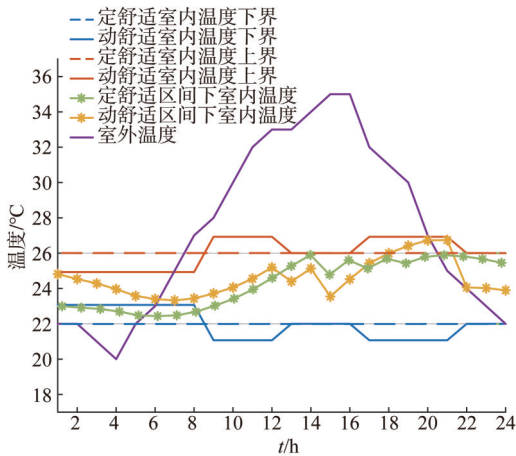


图 12 室温变化情况

Fig. 12 Indoor temperature variation profile

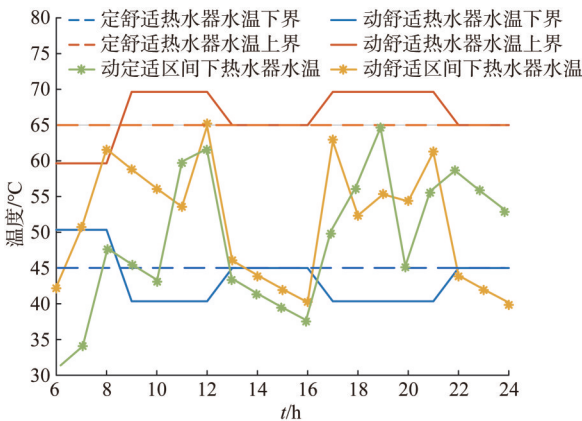


图 13 热水器水温变化情况

Fig. 13 Water temperature variation profile in water heater

表 6 居民优化结果对比

Tab. 6 Comparison of resident optimization outcomes

优化场景	用电成本/元	光伏消纳率/%
定舒适区间	18.327 6	84.76
动舒适区间	16.675 2	94.39

户侧柔性资源优化调度模型使得用户用电成本降低 9.02%，光伏消纳提高 10.68%。

4.2.2 中层多用户的台区优化结果分析

台区层各用户负荷功率交互情况如图 14—15 所示，其中用户 1 配备分布式光伏系统，为供电型用户，用户 2 为普通需求型用户。

结合图 14—15，在用户源荷特性不同时，通过参与交互响应用户曲线高峰与低谷时段交错，可以平滑台区整体负荷曲线。

不参与交互响应与参与交互响应各用户用电成本对比和光伏就地消纳率对比如表 7 所示。

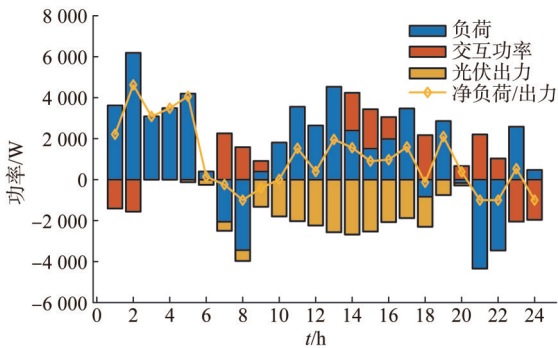


图 14 用户 1 功率流向

Fig. 14 Power flow direction of user 1

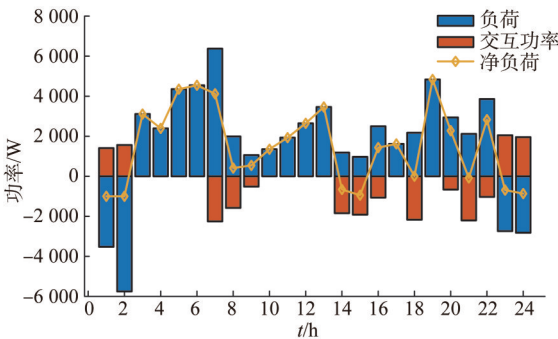


图 15 用户 2 功率流向

Fig. 15 Power flow direction of user 2

表 7 台区不同场景优化结果对比

Tab. 7 Comparative analysis of optimization results for transformer zones under different scenarios

优化场景	用电成本/元		总用电成本/元	光伏消纳率/%
	用户 1	用户 2		
仅参与考虑动舒适区间的需求响应	10.895 2	23.363 9	34.259 1	94.39
参与考虑动舒适区间的需求响应的同时参与交互响应	11.662 6	20.754 7	32.417 3	97.61

由表 7 可知，用户参与交互响应后，用户 1 成本上升了 7.04%，用户 2 用电成本下降了 11.17%，总用电成本下降 5.38%；光伏消纳提高了 3.22%。

4.2.3 上层多台区交互的 ADN 优化结果分析

配网层台区独立运行与互联运行下各源荷储设备交互情况如图 16—19 所示，台区需求响应调整为正表示台区削减负荷需求，需求响应调整为负表示台区扩大负荷需求；光伏、储能系统、其他台区与台区交互功率为正表示向台区输送电能，与台区交互功率为负表示从台区输送电能；配网与台区交

互功率为正表示配网向台区输送电能,此时台区作为负荷接入主动配电网;与台区交互功率为负表示台区向配网输送电能,此时台区作为电源接入主动配电网。

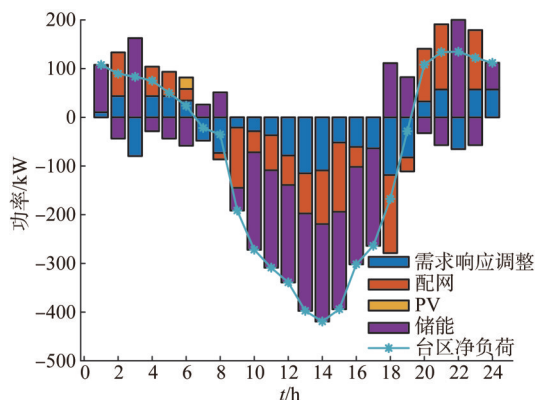


图 16 独立运行下台区 1 电能交互情况

Fig. 16 Power exchange status of transformer zone 1 in islanded operation mode

图 16 描述了独立运行下台区 1 电能交互情况,台区 1 属于供能型台区,在 0 时—6 时以及 20 时—24 时时段,台区用电需求大于供电量,此时台区 1 内用户通过主动参与需求响应和交互响应,削减负荷需求,其主要购电渠道为储能系统与配网,优先从储能系统购电;供电量大于用电需求的时段,台区 1 通过用户主动参与需求响应和交互响应,增大负荷需求,主要向储能系统供电,剩余电能输送至上级电网。

图 17 描述了独立运行下台区 2 电能交互情况,台区 2 属于需求型台区,优先通过台区内用户主动参与需求响应和交互响应调整负荷需求,其主要购

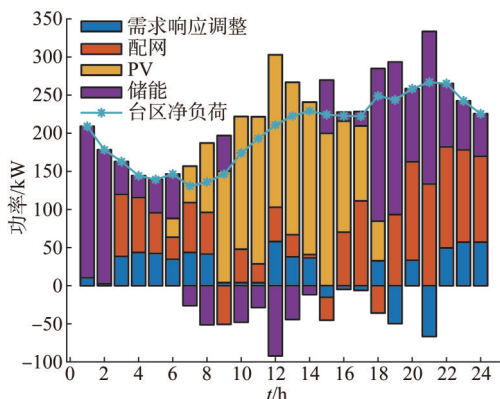


图 17 独立运行下台区 2 电能交互情况

Fig. 17 Powers exchange status of substation area 2 in islanded operation mode

电来源包括光伏系统、储能系统与配网。白天光伏发电时段,优先从光伏系统购电;夜间则优先从储能系统购电,不足或多余电能与配网进行交互补充。由于白天光伏出力过剩,台区 2 所购电量还用于向储能系统供电。

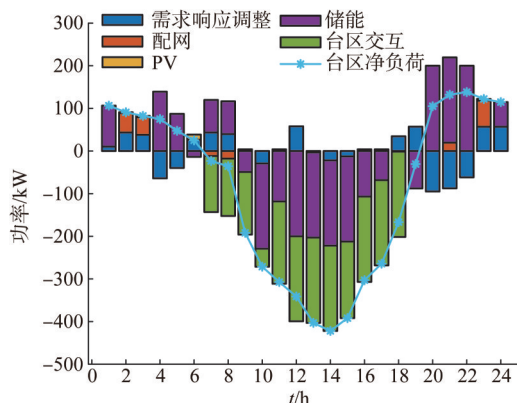


图 18 互联运行下台区 1 电能交互情况

Fig. 18 Powers exchange characteristics of substation area 1 in grid-connected operation

图 18 描述了互联运行下台区 1 电能交互情况,对于台区 1,用电需求大于供电能力时,台区 1 内优先通过用户主动参与需求响应和交互响应,削减负荷需求,其主要购电渠道为储能系统与配网,优先从储能系统购电,以缓解电网供电压力;而在供电能力大于用电需求的时段,台区 1 优先通过用户主动参与需求响应和交互响应,增大负荷需求,剩余电能通过与其他台区交互、向储能系统充电,无法消纳的部分向配网输送。

图 19 描述了互联运行下台区 2 电能交互情况,对于台区 2,优先通过台区内用户主动参与需求响应和交互响应调整负荷需求,其主要购电来源包括光伏系统、其他台区电能交互、储能系统与配网。台区 1 向外供能时段和白天光伏发电时段,台区 2 优先消纳台区 1 剩余电能和光伏;夜间则优先从储能系统购电,不足或多余电能与配网进行交互补充。台区 2 所购电量还用于向储能系统供电。

主动配电网最优潮流如图 20 所示,由图 20 可知,最优潮流下主动配电网各节点电压幅值没有出现越限的情况,通过配网各层级源网荷储协调优化的作用,实现了对电压的有效控制。

考虑台区独立运行和互联运行优化对比结果如

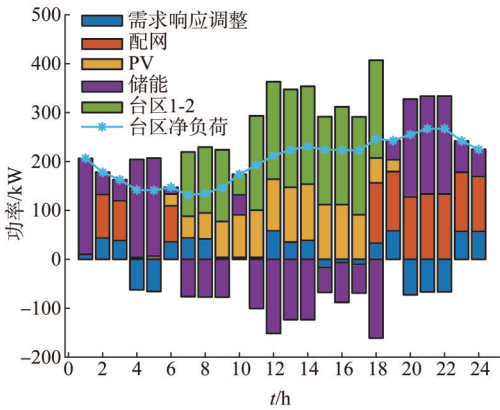


图 19 互联运行下台区2电能交互情况

Fig. 19 Power exchange characteristics of substation area 2 in grid-connected operation

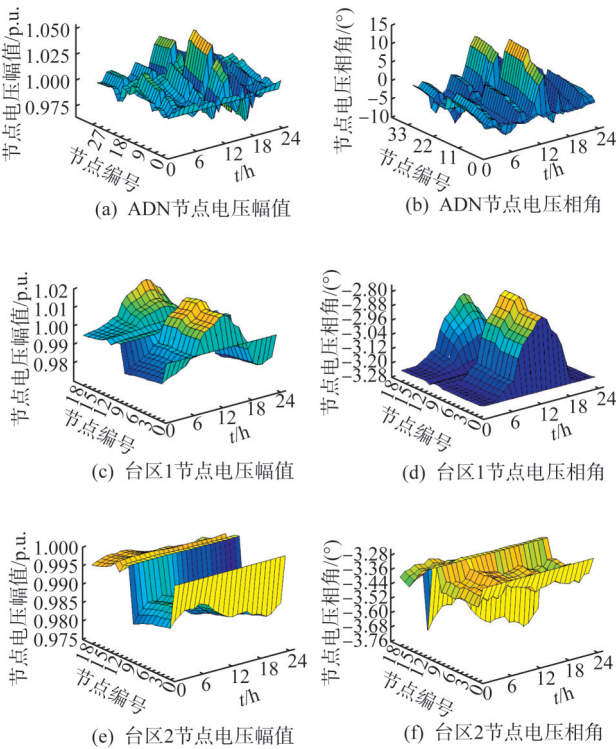


图 20 主动配网最优潮流结果

Fig. 20 Optimal power flow results for active distribution networks

表 8 所示。

对比台区独立运行和互联运行的优化结果,与

台区独立运行相比,互联运行下总运行成本降低 64.52%,台区 1 运行成本降低 59.46%,台区 2 运行成本降低 66.61%。同时,台区互联运行使得台区与配网的功率交互大幅降低,相比独立运行时降低了 89.37%,而台区间交互功率达到 2 025.840 6 kW。通过台区互联和多层级协调优化,不仅减少了各台区从配网的购电量,降低了运行成本,还增强了台区间的功率互济能力,提高了整个配电网的运行经济性和稳定性。

5 结论

本文针对主动配电网分层级多目标协同调度需求,构建了配网-台区-用户多层级主动配电系统结构,提出考虑动态舒适区间的柔性资源调控建模方法和多层级多目标协同优化模型,主要工作如下。

1)提出了配网-台区-用户多层级结构及分层调度框架,明确各层功能定位与决策变量,实现了层间源网荷储深度互动及层间交互协同。

2)建立了考虑动态舒适区间的柔性资源模型以及开展用户调控潜力研究。通过引入需求响应调整系数构建动态用电舒适区间,实现了调控边界的动态更新。所建模型能精准量化居民用户在不同电价环境下的资源调控潜力,为上层优化调度提供了准确的边界输入,提高了资源调度的精确性和灵活性。

3)配网-台区-用户多层级结构中,针对用户、台区、配网建立了下中上三层协同优化模型,描述各层源网荷储互动及层间交互协同行为,获得各层系统优化目标决策结果,以及各层可控源荷储调度决策结果。

未来研究将考虑新能源预测误差对优化调度的影响以及优化求解算法,以提升大规模系统下的计算效率与求解性能,得到更贴合应用实际的优化调度结果。

表 8 配网不同场景优化结果对比

Tab. 8 Comparative analysis of optimization results for transformer zones under different scenarios

优化场景	运行成本成本/元		配网层运行成本/元	台区与配网交互功率/kW	台区间交互功率/kW
	台区 1	台区 2			
台区独立运行	1 555.475 0	3 769.302 5	5 324.777 4	3 327.121 2	0
台区互联运行	630.603 1	1 258.461 0	1 889.064 1	353.402 6	2 025.840 6

参考文献

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806–2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects of constructing new power system under carbon neutrality target[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806–2819.
- [2] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663–1672.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 43(5): 1663–1672.
- [3] 吴林林, 陈臻, 胡俊杰, 等. 支撑新能源电力系统灵活性需求的用户侧资源应用与关键技术[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1435–1450.
WU Linlin, CHEN Can, HU Junjie, et al. User side resource application and key technologies for flexibility demand of renewable energy power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1435–1450.
- [4] 余洋, 向小平, 李梦璐, 等. 面向电网调峰的聚合温控负荷多目标优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(11): 164–170, 186.
YU Yang, XIANG Xiaoping, LI Menglu, et al. Grid peaking oriented multi-objective optimal control method for aggregated thermostatically controlled load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(11): 164–170, 186.
- [5] 周星月, 黄向敏, 张勇军, 等. 基于需求响应潜力模糊评估的电动汽车实时调控优化模型[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 30–37.
ZHOU Xingyue, HUANG Xiangmin, ZHANG Yongjun, et al. Real-time scheduling and optimization model of electric vehicles based on fuzzy evaluation of demand response potential[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 30–37.
- [6] 李亚平, 姚建国, 雍太有, 等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5519–5528, 5829.
LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5519–5528, 5829.
- [7] YIN R, KARA E C, LI Y, et al. Quantifying flexibility of commercial and residential loads for demand response using setpoint changes[J]. Applied Energy, 2016(177): 149–164.
- [8] SONG Z, SHI J, LI S, et al. Data-driven and physical model-based evaluation method for the achievable demand response potential of residential consumers' air conditioning loads[J]. Applied Energy, 2022(307): 118017.
- [9] XIE D, HUI H, DING Y, et al. Operating reserve capacity evaluation of aggregated heterogeneous TCLs with price signals[J]. Applied Energy, 2018(216): 338–347.
- [10] 张睿骐, 阳辉, 王子睿, 等. 面向车-库-网多层次协调控制系统的电动汽车多时段可调度域的构建和分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(13): 4256–4275.
ZAHNG Ruiqi, YANG Hui, WANG Zirui, et al. Establishment and analysis of multi-stage dispatchable region in vehicles-garage-grid multi-level coordinated control system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(13): 4256–4275.
- [11] 朱旭, 孙元章, 杨博闻, 等. 考虑不确定性与非完全理性用能行为的电动汽车集群可调度潜力计算方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 245–254.
ZHU Xu, SUN Yuanzhang, YANG Bowen, et al. Calculation method of EV cluster's schedulable potential capacity considering uncertainties and bounded rational energy consumption behaviors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 245–254.
- [12] 周志恒, 张琳娟, 王晓冬, 等. 计及多种弹性资源储能潜力挖掘的居民台区优化调度策略[J]. 南方电网技术, 2025, 19(2): 102–114.
ZHOU Zhiheng, ZHANG Linjuan, WANG Xiaodong, et al. Optimal scheduling strategy of residential station area considering the potential mining of energy storage of various elastic resources[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(2): 102–114.
- [13] 张世帅, 陈毓春, 邵雪松, 等. 基于居民用户调控潜力精细评估的台区侧灵活资源多目标日前优化调度[J]. 供用电, 2022, 39(9): 42–50.
ZHANG Shishuai, CHEN Yuchun, SHAO Xuesong, et al. Day-ahead optimal scheduling of flexibility resources for distribution area based on the fine evaluation of residential users' regulatory control potential[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 42–50.
- [14] 许刚, 郭子轩. 考虑多态能源系统中用户多维响应特性的激励型综合需求响应优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9398–9411.
XU Gang, GUO Zixuan. Optimization strategy for incentive-based integrated demand response considering multi-dimensional user response characteristics in multi-energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9398–9411.
- [15] SHENG H, WANG C, LIANG J. Multi-timescale active distribution network optimal scheduling considering temporal-spatial reserve coordination[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(125): 106526.
- [16] LIU J, ZENG P P, XING H, et al. Hierarchical duality-based planning of transmission networks coordinating active distribution network operation[J]. Energy, 2020(213): 118488.
- [17] 杨明通, 刘一欣, 郭力, 等. 基于数据驱动安全域的输-配-微多层级分布式经济调度方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1–17 [2025–02–26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20250225.1334.007.html>.
YANG Mingtong, LIU Yixin, GUO Li, et al. Data-driven security-constrained distributed economic dispatch method for multi-level transmission-distribution-microgrids [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1–17 [2025–02–26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20250225.1334.007.html>.
- [18] 叶亮, 吕智林, 王蒙, 等. 基于最优潮流的含多微网的主动配电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 27–37.
YE Liang, LÜ Zhilin, WANG Meng, et al. Bi-level programming optimal scheduling of ADN with a multi-microgrid based on optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 27–37.

(下转第 49 页 Continued on Page 49)