

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240714

面向用户侧多元灵活性资源功率聚合的配电网台区 优化运行研究

陈艳波, 张瑞芯, 田昊欣, 张智

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 分布式电源规模化接入给配电网的可靠运行带来挑战, 合理调控用户侧多元灵活性资源可为配电网灵活运行注入新的活力。然而, 传统配电网集中调控的方式难以应对海量节点的能量管理及信息互动需求。为此, 提出一种面向多元灵活性资源功率聚合的配电网台区优化运行方法。首先, 基于蒙特卡洛算法, 对台区内的电动汽车充电负荷、空调电负荷、可中断负荷、用户侧储能等灵活调控资源进行多维度的功率聚合。在此基础上, 建立电动汽车充电负荷、空调负荷和可中断负荷参与不同类型需求响应的模型, 提出了综合考虑经济性与用能舒适度的配电网台区多目标协调优化运行方法。最后, 以某县级配电网台区为例进行分析, 并对各类灵活性资源的需求响应潜力进行评估, 验证了所建立模型的合理性, 证明了所提出的优化运行方法能够有效地增大配电网光伏消纳率。

关键词: 配电网台区; 灵活性资源; 功率聚合; 需求响应; 多目标优化

Optimal operation of distribution substations for aggregating multiple user side flexible resources

CHEN Yanbo, ZHANG Ruixin, TIAN Haoxin, ZHANG Zhi

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The large-scale integration of distributed generation poses challenges to the reliable operation of distribution networks. Proper regulation of multiple user side flexible resources can inject new vitality into the flexible operation of distribution networks. However, traditional centralized control methods in distribution networks are difficult to cope with the energy management and information interaction needs of numerous nodes. This paper proposes an optimal operation method for distribution substation areas focusing on the power aggregation of multiple flexible resources. First, based on Monte Carlo algorithm, this paper aggregates power from flexible controllable resources, such as electric vehicle charging load, air conditioning electric load, interruptible load, and user side energy storage in a multidimensional manner within the substation area. On this basis, models of electric vehicle charging load, air conditioning electric load and interruptible load participating in different types of demand response are established, and a multi-objective coordinated optimization method is proposed that considers both economic efficiency and energy comfort in the operation of the distribution substation area. Finally, an analysis is conducted on a county-level distribution substation area, and the demand response potential of multiple flexible resources is evaluated. The results verify the validity of the established model and proves that the proposed optimal operation method can effectively increase the photovoltaic consumption rate of the distribution network.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U24B2083 and No. 52077076).

Key words: distribution substation area; flexible resources; power aggregation; demand response; multi-objective optimization

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (U24B2083, 52077076); 中国博士后科学基金面上项目资助 (2024M750893); 国家博士后研究人员计划项目资助 (GZC20240463)

0 引言

随着“双碳”目标的持续推进, 电力行业已逐步成为构建清洁低碳能源系统的主力军。配电网作为电力系统“发-输-变-配-用”中的重要一环, 是实现电力系统清洁化、绿色化转型的关键^[1-3]。然而, 负荷需求量较低的县域配电网在新能源大规模接入后会出现源荷不平衡问题, 这使得配电网内分布式光伏发电难以消纳, 甚至出现潮流返送。目前, 相关部门陆续出台政策积极引导配电网解决高质量发展过程中面临的困难, 文献[4]强调: 必须完善电网灵活调节手段, 挖掘用户侧潜力, 提高新业态的系统调节能力, 促进新能源高效消纳。因此, 如何实现配电台区对用户侧不同类型灵活调控资源的用能管控, 挖掘灵活性资源潜力, 是当前亟需解决的重点问题^[5-8]。

海量分布式负荷侧资源全部参与电网调度会极大地增加电力系计算与信息隐私保护的难度。传统的直接监测、调控所有设备的调控思路难以完成对海量资源的集中调控^[9]。为实现负荷侧资源的整体化调控, 现有文献从资源聚合的角度展开了研究。文献[10]提出一种面向各类分布式电源的聚合方法, 以便多类型资源参与实时现货市场。文献[11]提出一种考虑路网和用户满意度的集群电动汽车(electric vehicle, EV)主从博弈优化调度策略, 通过整合 EV 负荷资源, 为不同消费偏好的用户提供差异化服务。文献[12]提出一种聚合 EV 与储能系统参与能量-调频联合市场的最优投标策略。文献[13]提出一种家庭蓄热式电采暖的控制方法, 根据相关数据对用户进行聚类以降低策略求解维度。文献[14]在最大化挖掘负荷可调潜力的同时保证用户舒适度, 提出了一种基于用户空调温度控制的负荷聚合商日前调度双层优化模型。可以看出, 现有文献多针对单一或少数用户侧资源的聚合管理展开研究, 而缺少配电台区场景下多元灵活性资源功率聚合的研究, 限制了台区整体运行调控效率的提升。

为实现配电台区对用户侧不同类型可调控资源的用能管控分析, 需要一种基于多维度分类聚合的配电台区多元负荷参与需求响应(demand response, DR)的优化运行方法, 结合现代通信、大数据和人工智能技术^[15-16], 来提升配电台区运行稳定性、经济性和可再生能源消纳比例, 以构建安全、可靠、高效的智能配电网^[17-18]。文献[19]考虑各类用电设备的用户舒适度和调峰贡献激励措施, 建立了智能小区参与 DR 的双层调度模型。文献[20]考虑洗衣机负荷、EV 与空调冷负荷参与 DR, 建立了农村家

庭柔性负荷多目标优化调度模型。文献[21]考虑公平计费机制, 提出了一种虚拟电厂聚合负荷与分布式电源后的 DR 模型。文献[22]建立了基于广义储能的价格型 DR 模型, 提出了考虑 DR 与虚拟电厂调频性能指标的日前投标鲁棒优化策略。文献[23]考虑空调负荷聚合响应潜力, 提出了引导空调群组有序参与电网需求响应的双层调控框架。以上文献分析了需求侧资源参与 DR, 但鲜有研究能够考虑多元负荷参与不同类型的 DR 并实现综合考虑多目标的配电台区优化运行。另外, 现有研究对用户侧资源可调控潜力的准确分析也较为匮乏, 难以全面评估需求侧灵活性资源的调节能力。

针对现有用户侧资源参与台区配电网优化运行研究的不足, 本文提出一种“配电网-配电台区-灵活性资源”的逐层调度方法, 主要创新点如下:

1) 提出了一种面向台区用户侧多元灵活性资源的功率聚合方法。基于蒙特卡洛模拟算法, 对台区内电动汽车充电负荷、空调负荷、可中断负荷和用户侧储能等进行多维度的功率聚合, 解决了含大量用户侧灵活性资源的配电台区整体运行效率低的问题, 实现了台区内资源的逐层管理。

2) 提出了综合考虑经济性与用能舒适度双重最优的台区多目标优化运行方法。通过对电动汽车、空调负荷和可中断负荷参与不同类型 DR 的详细建模, 解决了台区对各类用户侧资源的调控缺乏针对性的问题, 并实现了对各类用户侧灵活性资源需求响应潜力的评估。

1 用户侧灵活性资源功率聚合模型

配电台区是配电网节点处连接的降压变压器的供电区域, 台区包含的用户侧灵活性资源主要有: EV、温控负荷、可中断负荷、用户侧储能。传统优化运行方法中, 调度直接对管辖范围内的所有可调控负荷进行粗放式管理, 大量可调控资源接入负荷侧使得计算模型愈发复杂, 难以求解, 而且管理过程中的信息交互和共享可能不够充分, 导致调控决策的滞后或不合理。

为解决以上问题, 本文构建了基于负荷分类聚合的“配电网-配电台区-灵活性资源”逐层管理架构, 如图 1 所示。利用分类聚合的方式可以对不同类型的负荷制定相应的控制策略, 实现更有针对性的能量管理。而聚合中心作为一种统一信息平台, 不仅对上负责将关键数据传输给台区管理中心, 还对下负责同类负荷的统一管理, 成为一个信息交互的桥梁, 这种机制确保了信息的集中处理与分散控制相结合, 提高了管理效率和响应速度。

1.1 基于蒙特卡洛模拟法的电动汽车功率聚合模型

区别于传统负荷, EV 充电负荷的不确定性极强。为准确预测 EV 负荷变化, 需要通过 EV 关键特性建模的方式描述其动态行为。

EV 的日行驶里程 x 服从对数正态分布, 其概率密度函数 $f_D(x)$ 的表达式为

$$f_D(x) = \frac{1}{x\delta_D\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_D)^2}{2\delta_D^2}\right] \quad (1)$$

式中, μ_D 、 δ_D 分别表示 $\ln x$ 的均值和标准差。

以一日为单位, EV 出行前的初始荷电状态服从均匀分布, 其概率密度函数 $f_S(S_{begin}^{ev})$ 表达式为

$$f_S(S_{begin}^{ev}) = \frac{1}{b-a} \quad (2)$$

式中: S_{begin}^{ev} 为 EV 出行前的初始荷电状态; a 、 b 分别为 S_{begin}^{ev} 的下限和上限。

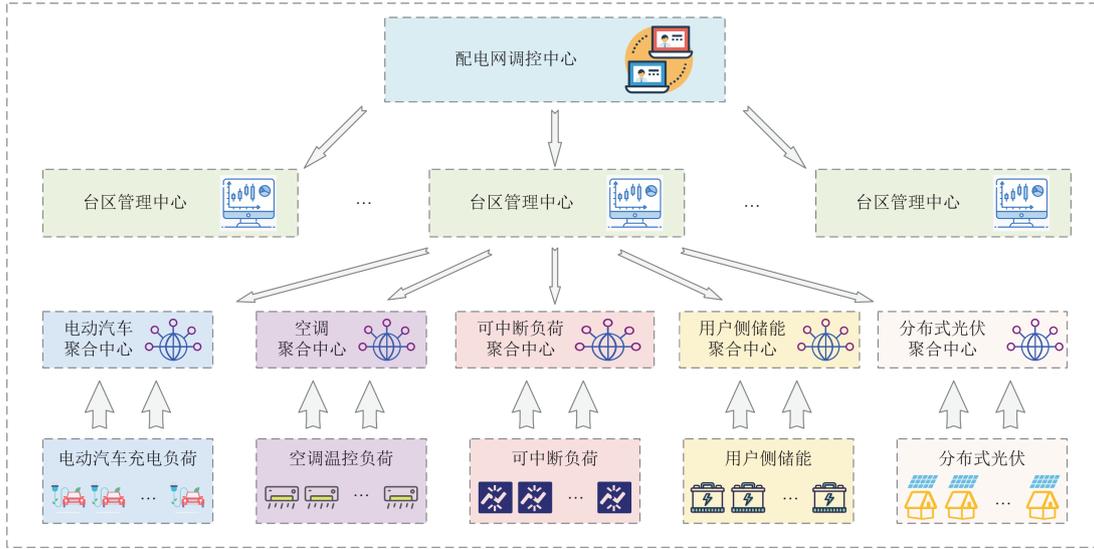


图 1 “配电网-配台区-灵活性资源”逐层管理

Fig. 1 “Distribution network-distribution transformer area-flexible control resources” layer by layer management

EV 行驶至充电站时的荷电状态 S_{arrive}^{ev} 为

$$S_{arrive}^{ev} = S_{begin}^{ev} - \frac{x E_b}{100 E_h} \quad (3)$$

式中: E_h 为 EV 的额定电池容量; E_b 为 EV 百公里耗电量。

EV 入网的起始充电时刻服从正态分布, 其概率密度函数表达式 $f_s(t_{begin})$ 为

$$f_s(t_{begin}) = \frac{1}{\delta_s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{begin} - \mu_s)^2}{2\delta_s^2}\right] \quad (4)$$

式中: t_{begin} 表示 EV 入网的起始充电时刻; μ_s 、 δ_s 分别表示 t_{begin} 的均值和标准差。

EV 完成充电所需时长 t_c 为

$$t_c = \frac{(1 - S_{arrive}^{ev}) E_h}{\eta_{ev} P_{ev}} \quad (5)$$

式中: η_{ev} 为 EV 充电效率; P_{ev} 为 EV 额定充电功率。

EV 充电结束时刻 t_{over} 为

$$t_{over} = t_{begin} + t_c \quad (6)$$

对 EV 的充电结束时刻进行一定处理, 并按时

段表示单辆 EV 的充电负荷功率 H_t , 如式(7)所示。

$$H_t = \begin{cases} \eta_{ev} P_{ev}, & \begin{cases} \text{if } 0 < t_{over} \leq 24, \text{ then} \\ t \in [t_{begin}, t_{over}] \\ \text{if } t_{over} > 24, \text{ then} \\ t \in [t_{begin}, 24] \cup [1, t_{over} - 24] \end{cases} \\ 0, & \text{other cases} \end{cases} \quad (7)$$

经过 M_c 次仿真后, 求平均值得到 N_c 辆 EV 的充电负荷聚合功率 $P_t^{ev(0)}$, 如式(8)所示。

$$P_t^{ev(0)} = \frac{1}{M_c} \sum_{i=1}^{M_c} \sum_{j=1}^{N_c} H_{ij,t} \quad (8)$$

式中, $H_{ij,t}$ 为第 i 次仿真中第 j 辆 EV 在 t 时刻的充电负荷功率。

1.2 温控负荷功率聚合模型

考虑到台区内大多数温控负荷为空调, 故以空调为代表建立功率聚合模型。空调电功率受环境温度影响, 将建筑物热阻、空气热容等效为电路的电阻、电容元件, 将光照、环境温度等效为电路的电源, 采用等效热力学参数模型(equivalent thermal parameter model, ETP)模拟空调热量交换过程^[24], 其

表达式为

$$T_{in,t} = T_{out,t} - k_i P_i^{ac} R - (T_{out,t} - k_i P_i^{ac} R - T_{in,t-1}) e^{-\frac{\Delta t}{RC}} \quad (9)$$

式中: $T_{in,t}$ 表示 t 时刻的室内温度; $T_{out,t}$ 表示 t 时刻的室外温度; k_i 表示第 i 台空调的能效比; P_i^{ac} 表示 t 时刻的空调电功率; R 表示空调热阻; C 表示空调热容; Δt 表示时间步长。

空调的电能消耗量与其运行状态有关^[25]。空调的运行状态判定逻辑表达式为

$$S_t = \begin{cases} 1, & T_{in,t-\delta} \geq T_{set,t} + \varepsilon \\ 0, & T_{in,t-\delta} \leq T_{set,t} - \varepsilon \\ S_{t-\delta}, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

式中: S_t 表示空调在 t 时刻的状态, 为二元变量, 值为 0 表示空调集群处于暂停运转的工作状态, 值为 1 表示空调集群处于额定运转状态; $T_{in,t-\delta}$ 表示 $t-\delta$ 时刻室内温度; $T_{set,t}$ 表示 t 时刻空调的设定温度; ε 表示空调状态转变的温度迟滞区间; δ 表示仿真周期。

空调确定运行状态的逻辑是: 当空调设定温度与迟滞温度之和小于等于室内温度时, 空调应处于额定运转状态; 当空调设定温度与迟滞温度之差大于等于室内温度时, 空调停止运转; 而在其他情况下, 空调保持与前一时刻一致的工作状态不变。因此, 空调聚合后的电功率 $P_t^{ac(0)}$ 可表示为

$$P_t^{ac(0)} = \sum_{i=1}^{N_{ac}} P_{t,i}^{ac} = \sum_{i=1}^{N_{ac}} P_e^{ac} \cdot S_{t,i} \quad (11)$$

式中: $P_{t,i}^{ac}$ 表示台区内 t 时刻第 i 台空调的运行功率; P_e^{ac} 表示空调额定运行功率; $S_{t,i}$ 表示台区内 t 时刻第 i 台空调的运行状态; N_{ac} 表示台区内空调总数。

1.3 可中断负荷聚合模型

根据中断负荷量对用户的不同影响程度, 将可中断负荷分为 3 级, 建立可中断负荷功率聚合模型, 如式(12)所示。

$$P_t^{curt} = \sum_{m=1}^3 P_{m,t}^{curt} \quad (12)$$

式中: P_t^{curt} 为 t 时刻台区可中断负荷整体的中断量;

$P_{m,t}^{curt}$ 为 t 时刻第 m 级可中断负荷的中断量。

1.4 储能与分布式光伏聚合模型

假设用户侧储能与分布式光伏各设备参数服从均匀分布, 分布式光伏发电功率同样由蒙特卡洛算法近似生成, 在分析单个设备功率特性的基础上, 将各设备功率累加, 进而得到聚合后的功率。用户侧储能系统模型描述如式(13)所示。

$$\begin{cases} P_{in,max}^{ess} = \sum_{d=1}^{N_d} P_{in,d,t}^{ess} \eta_{in} \\ P_{out,max}^{ess} = \sum_{d=1}^{N_d} P_{out,d,t}^{ess} / \eta_{out} \\ \alpha_{out} + \alpha_{in} \leq 1 \\ 0 \leq P_{out,t}^{ess} \leq \alpha_{out} P_{out,max}^{ess} \\ 0 \leq P_{in,t}^{ess} \leq \alpha_{in} P_{in,max}^{ess} \\ S_{max}^{ess} = \sum_{d=1}^{N_d} S_{d,max}^{ess}, S_{min}^{ess} = \sum_{d=1}^{N_d} S_{d,min}^{ess} \\ S_{min}^{ess} \leq S_t^{ess} \leq S_{max}^{ess} \\ S_t^{ess} = S_{t-1}^{ess} + P_{in,t}^{ess} \cdot \Delta t - P_{out,t}^{ess} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{in,max}^{ess}$ 、 $P_{out,max}^{ess}$ 分别为聚合后储能系统最大充电、放电功率; $P_{in,d,t}^{ess}$ 、 $P_{out,d,t}^{ess}$ 分别为 t 时刻台区内第 d 个储能的最大充电、放电功率; $P_{in,t}^{ess}$ 、 $P_{out,t}^{ess}$ 分别为聚合后 t 时刻储能系统实际充电、放电功率; η_{in} 、 η_{out} 分别为 t 时刻储能充电、放电效率; α_{in} 、 α_{out} 分别为储能系统充电、放电状态, 为二元变量, 0 表示不工作, 1 表示工作; S_t^{ess} 为聚合后 t 时刻储能系统的实际蓄电量; S_{max}^{ess} 、 S_{min}^{ess} 分别为聚合后储能系统的最大、最小蓄电量; $S_{d,max}^{ess}$ 、 $S_{d,min}^{ess}$ 分别为台区内第 d 个储能的最大、最小蓄电量; N_d 为台区内储能数量。

为保证实际消纳光伏量不超过光伏发电量, 对台区消纳屋顶光伏进行约束, 如式(14)所示。

$$\begin{cases} P_{all,t}^{pv} = \sum_{d=1}^{N_{pv}} P_{all,d,t}^{pv} \\ 0 \leq P_t^{pv} \leq P_{all,t}^{pv} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{all,t}^{pv}$ 为 t 时刻台区内光伏发电总量预测值; $P_{all,d,t}^{pv}$ 为 t 时刻台区内第 d 个分布式光伏的发电量预测值; P_t^{pv} 为 t 时刻的光伏消纳功率; N_{pv} 为台区内分布式光伏个数。

2 灵活性资源参与需求响应模型

2.1 电动汽车参与价格型需求响应

根据心理学与经济学理论, 调整电力价格可实现对用户用电行为的调节。调度部门施行分时电价策略, 引导灵活性资源用户形成符合系统调度要求的用电习惯, 充分挖掘灵活性资源的可调控潜力, 为电力系统提供调节空间^[26]。

典型日的分时电价时段划分通过对台区内原始净负荷的 K-means++ 聚类实现, 负荷峰平谷时段分别匹配峰平谷电价。台区原始净负荷模型为

$$P_t^{LOAD} = P_t^{load} + P_t^{ev(0)} + P_t^{ac(0)} - P_{all,t}^{pv} \quad (15)$$

式中: P_t^{LOAD} 为 t 时刻台区的净负荷; P_t^{load} 为 t 时刻台区的基本负荷预测值。

利用需求弹性系数 κ 量化电价变化影响下用户的用电行为变化, 如式(16)所示。

$$\kappa = \frac{\Delta p_t / p_t^{(0)}}{\Delta c_t / c_t^{(0)}} \quad (16)$$

式中: Δp_t 、 Δc_t 分别表示电价变化影响下 EV 充电负荷的变化量与电价变化量; $p_t^{(0)}$ 、 $c_t^{(0)}$ 分别表示 EV 充电负荷初始值与初始电价。式(16)可看作 t 时刻负荷转移率与价格变化率的比值。

需求弹性矩阵 \mathbf{K} 由需求弹性系数组成, 如式(17)所示。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \kappa_{ff} & \kappa_{fp} & \kappa_{fg} \\ \kappa_{pf} & \kappa_{pp} & \kappa_{pg} \\ \kappa_{gf} & \kappa_{gp} & \kappa_{gg} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: 下标 f、p、g 分别表示峰时段、平时段、谷时段, 对角元素为自弹性系数, 表示本时段价格变化对需求变化的影响程度; 非对角元素为互弹性系数, 表示本时段需求变动对其他时段电价变动的响应。

通过电价变化引导 EV 用户用电行为变化, 达到“削峰填谷”的效果, 分时电价响应模型的表达式为

$$\begin{bmatrix} \hat{p}_t^f \\ \hat{p}_t^p \\ \hat{p}_t^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_t^{f(0)} & 0 & 0 \\ 0 & p_t^{p(0)} & 0 \\ 0 & 0 & p_t^{g(0)} \end{bmatrix} \mathbf{K} \begin{bmatrix} \Delta c_t^f / c_t^{f(0)} \\ \Delta c_t^p / c_t^{p(0)} \\ \Delta c_t^g / c_t^{g(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_t^{f(0)} \\ p_t^{p(0)} \\ p_t^{g(0)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: \hat{p}_t^f 、 \hat{p}_t^p 、 \hat{p}_t^g 分别表示响应后峰平谷时段的 EV 充电负荷; $p_t^{f(0)}$ 、 $p_t^{p(0)}$ 、 $p_t^{g(0)}$ 分别表示参与 DR 前 EV 的峰平谷时段充电功率; $c_t^{f(0)}$ 、 $c_t^{p(0)}$ 、 $c_t^{g(0)}$ 与 Δc_t^f 、 Δc_t^p 、 Δc_t^g 分别表示峰平谷时段的初始电价与电价变化量。

作为典型的可转移负荷, EV 充电负荷仅在时间维度上转移, 总量不变, 需满足如式(19)所示的约束条件。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T P_t^{ev} \Delta t = \sum_{t=1}^T P_t^{ev(0)} \Delta t \\ \sum_{t=1}^T [P_t^{ev} (c_t^{(0)} + \Delta c_t)] \Delta t \leq \sum_{t=1}^T [P_t^{ev(0)} c_t^{(0)}] \Delta t \\ P_t^{ev(0)} (1 - \sigma) \leq P_t^{ev} \leq P_t^{ev(0)} (1 + \sigma) \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_t^{ev} 为 DR 后 t 时刻的 EV 充电功率; T 为一个调度周期; σ 为 EV 用户参与 DR 的比例。

2.2 空调参与激励型需求响应

图 2 为 ETP 聚合模型示意图, 图中: k_i 表示聚合前第 i 个空调的能效比; P_i 表示聚合前第 i 个空

调的功率; T_{in} 、 T_{out} 分别表示空调的室内、室外温度。不同空调的运行机理虽然相同, 但等效热阻、等效热容和能效比不同, 在同一温度目标下, 可等效并联台区内所有空调, 得到空调负荷的等效热参数聚合模型, 如式(20)所示。

$$\begin{cases} R_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{ac}} \frac{1}{R_i}} \\ C_{eq} = \sum_{i=1}^{N_{ac}} C_i \\ k_{eq} = \frac{N_{ac}}{\sum_{i=1}^{N_{ac}} \frac{1}{k_i}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: R_{eq} 表示空调聚合后的等效热阻; R_i 表示第 i 台空调的热阻; C_{eq} 表示空调聚合后的等效热容; C_i 表示第 i 台空调的热容; k_{eq} 表示空调聚合后的等效能效比。

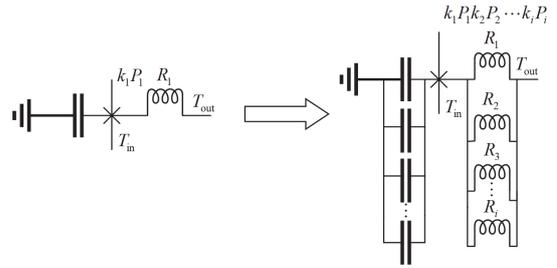


图 2 ETP 聚合模型

Fig. 2 ETP aggregation model

通过改变空调集群的设定温度, 可引导空调负荷参与激励型需求响应, 式(9)可调整为

$$T_{in,eq,t} = T_{out,eq,t} - P_t^{cold} R_{eq} - (T_{out,eq,t} - P_t^{cold} R_{eq} - T_{in,eq,t-1}) e^{-\frac{\Delta t}{R_{eq} C_{eq}}} \quad (21)$$

式中: $T_{in,eq,t}$ 、 $T_{out,eq,t}$ 分别为 t 时刻等效室内、室外温度; P_t^{cold} 为 t 时刻空调聚合后等效制冷功率。

$$\begin{cases} T_{in}^{min} \leq T_{in,eq,t} \leq T_{in}^{max} \\ P_e^{cold} = \sum_{i=1}^{N_{ac}} k_i P_e^{ac} \\ 0 \leq P_t^{cold} \leq P_e^{cold} \cdot S_{eq,t} \\ T_{ac,eq} = \frac{1}{N_{ac}} \sum_{i=1}^{N_{ac}} T_{ac,i} \\ T_{set,eq} = T_{ac,eq} + G \\ 0 \leq G \leq G_{max} \\ P_t^{ac} = \frac{T_{out,eq,t} - T_{in,eq,t}}{k_{eq} R_{eq}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: T_{in}^{\max} 、 T_{in}^{\min} 分别为室内温度最大、最小值; P_e^{cold} 表示空调集群等效额定制冷功率; $S_{eq,t}$ 为 t 时刻聚合模型的空调实时运行状态; $T_{ac,eq}$ 表示空调集群的等效原始设定温度; $T_{ac,i}$ 表示第 i 台空调的原始设定温度; $T_{set,eq}$ 表示参与 DR 后空调集群的设定温度; G 表示空调温度调节等级; G_{\max} 表示空调温度最高调节等级。

式(10)可改进为

$$S_{eq,t} = \begin{cases} 1, & T_{in,eq,t-1} \geq T_{set,eq,t} + \varepsilon \\ 0, & T_{in,eq,t-1} \leq T_{set,eq,t} - \varepsilon \\ S_{eq,t-\delta}, & \text{else} \end{cases} \quad (23)$$

式中, $T_{set,eq,t}$ 表示 t 时刻参与 DR 后空调集群的设定温度。

2.3 可中断负荷参与需求响应

根据可中断负荷等级, 制定不同的中断比例系数与用户补偿价格, 中断等级越高, 比例系数越小, 补偿价格越高。建立可中断负荷需求响应模型如下:

$$\begin{cases} P_{m,t}^{\text{curt}} + P_{m,t-1}^{\text{curt}} \leq P_{m,t,\max}^{\text{cl}} = aP_t^{\text{load1}} \\ 0 \leq P_{m,t}^{\text{curt}} \leq \chi_{cil} P_t^{\text{load1}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{m,t,\max}^{\text{cl}}$ 为 $t-1 \sim t$ 时段内 m 级中断负荷量之和的最大量; P_t^{load1} 为台区可中断负荷总量; a 为 $P_{m,t,\max}^{\text{cl}}$ 与 P_t^{load1} 的比例系数; χ_{cil} 为可中断负荷与总负荷的比例系数。

3 面向多元灵活性资源聚合的配电台区协调运行模型

各类灵活性资源在聚合后, 接受台区管理中心的统一管理, 管理中心为实现整体供需平衡, 需要统计各类灵活性资源与分布式电源数据, 并与配电网进行交互, 当台区内部“缺电”时, 管理中心从配电网购电进行补充, 当台区内部存在“余电”时, 管理中心向配电网售电获得利润, 购售电功率即为台区与配电网间的联络功率。

3.1 聚合模型调控目标

为充分调动负荷参与需求响应、协助光伏消纳的积极性, 且考虑到台区内用户的切身感受, 本文从经济性和用户温度满意度两方面构建目标函数, 建立多目标优化调度模型。不同目标函数数量纲不同, 故需要进行归一化处理。

$$C'_{econ} = \frac{C_{econ} - C_{econ,\min}}{C_{econ,\max} - C_{econ,\min}} \quad (25)$$

式中: C_{econ} 为经济性指标归一化处理前的实际成本值; C'_{econ} 为经济性指标归一化处理后的值; $C_{econ,\max}$ 、

$C_{econ,\min}$ 分别为经济性指标归一化处理前可能取得的最大、最小值。用户温度满意度指标以百分比形式表达, 故不再进行归一化处理。综上, 总目标函数 C 可表示为

$$C = \omega_1 C'_{econ} + \omega_2 C_{temp} \quad (26)$$

式中: ω_1 、 ω_2 分别为两个目标函数对应的权重系数, 且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$; C_{temp} 表示用户温度满意度。

3.1.1 经济性指标

经济性指标从台区管理中心的角度出发, 考虑各类灵活性资源在一个周期 T 内的调控成本, 其表达式为

$$C_{econ} = \min \sum_{t=1}^T (C_t^{\text{DW}} + C_t^{\text{DR}} + C_t^{\text{PV}} + C_t^{\text{ESS}}) \quad (27)$$

式中: C_t^{DW} 为 t 时刻台区管理中心支付给配电网的费用; C_t^{DR} 为 t 时刻台区管理中心支付给参与 DR 用户的补偿费用; C_t^{PV} 为 t 时刻弃光惩罚费用; C_t^{ESS} 为 t 时刻台区内储能运行维护费用。

$$C_t^{\text{DW}} = [c_t^{(0)} P_{buy,t}^{\text{grid}} - c_t^{(0)} P_{sell,t}^{\text{grid}} / k_p] \Delta t \quad (28)$$

式中: $P_{buy,t}^{\text{grid}}$ 、 $P_{sell,t}^{\text{grid}}$ 分别为 t 时刻台区向配电网购电、售电功率; k_p 为台区购电系数, 表示购电电价与售电电价之比。

$$C_t^{\text{DR}} = \left[\sum_{m=1}^3 (\lambda_m^{\text{curt}} P_{m,t}^{\text{curt}}) + \sum_{t=1}^T |P_t^{\text{ac}} - P_t^{\text{ac}(0)}| \lambda_{AC} + \sum_{t=1}^T |P_t^{\text{ev}} - P_t^{\text{ev}(0)}| \lambda_{EV} \right] \Delta t \quad (29)$$

式中: λ_m^{curt} 为对第 m 级的可中断负荷的补偿单价; λ_{AC} 、 λ_{EV} 分别为支付给空调用户、EV 用户的补偿费用单价。

$$C_t^{\text{PV}} = \sum_{t=1}^T c_{pv} (P_{all,t}^{\text{pv}} - P_t^{\text{pv}}) \Delta t \quad (30)$$

式中, c_{pv} 为单位弃光量惩罚费用。

$$C_t^{\text{ESS}} = \sum_{t=1}^T (P_{out,t}^{\text{ess}} + P_{in,t}^{\text{ess}}) y_{ess} \Delta t \quad (31)$$

式中, y_{ess} 为单位储能充、放电功率运行维护费用。

3.1.2 用户温度满意度指标

由于台区管理中心改变了参与 DR 的空调的用户初始设定温度, 用户的实际室内温度与其预期值有一定差异, 影响到用户舒适度, 若差异过大, 甚至会引起用户的不满, 故需要对用户温度满意度进行评估。首先计算室内温度与最适温度的偏差 $B_{temp,t}$, 如式(32)所示。

$$B_{temp,t} = \frac{|T_{in,eq,t} - 0.5(T_{in}^{\max} + T_{in}^{\min})|}{0.5(T_{in}^{\max} - T_{in}^{\min})} \quad (32)$$

进而将用户温度满意度 C_{temp} 表达为

$$C_{temp} = \min \left(\frac{\sum_{t=1}^T S_{eq,t} \left(\frac{e^{B_{temp,t}} - 1}{e - 1} \right)}{\sum_{t=1}^T S_{eq,t}} \right) \quad (33)$$

3.2 台区整体约束条件

除了满足各类负荷与电源的调控约束，如式(13)、式(14)、式(19)、式(22)、式(24)所示，各时段还需满足源荷功率平衡约束，可表示为

$$P_t^{load0} + P_t^{ev} + P_t^{ac} + P_t^{load1} - \sum_{m=1}^3 P_{m,t}^{curt} + P_{sell,t}^{grid} + P_{in,t}^{ess} = P_t^{pv} + P_{buy,t}^{grid} + P_{out,t}^{ess} \quad (34)$$

式中， P_t^{load0} 为 t 时刻台区固定负荷功率。

配电台区与上级电网的联络功率受配电变压器容量及配电台区与配电网间联络线承载能力所限，约束条件如式(35)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{buy,t}^{grid} \leq u_{buy,t} P_{buy,max}^{grid} \\ 0 \leq P_{sell,t}^{grid} \leq u_{sell,t} P_{sell,max}^{grid} \\ 0 \leq u_{buy,t} + u_{sell,t} \leq 1 \end{cases} \quad (35)$$

式中： $u_{buy,t}$ 、 $u_{sell,t}$ 分别表示 t 时刻台区向配电网购电状态的 0-1 变量； $P_{buy,max}^{grid}$ 、 $P_{sell,max}^{grid}$ 分别表示购电、售电功率的最大值。

4 算例分析

本文以河南省某配电台区为测试对象，以夏季典型日为例，验证本文所提模型的有效性。本文通过 Matlab 软件平台基于 YALMIP 工具箱调用 GUROBI 求解器求解模型。

进行正式求解前，需对模型进行预处理，过程见附录 A 所示。

本算例所测试的台区，选取当地用户参与 DR 意愿较为强烈的台区，台区容量为 2 MW，包含 1000 台屋顶光伏设备、900 辆电动汽车、1000 台空调，10 台分布式储能，基础用电中有 50% 为可中断负荷，台区 EV 用户普遍习惯在剩余电量小于 50% 额定电量时开始充电动作。

在测试系统中，结合用户实际用电习惯，设定台区内 EV 相关参数如附录 B 表 B1 所示。并假设 EV 一日初始荷电状态服从(0,1)的均匀分布，20% 的 EV 起始充电时刻服从正态分布(8.5, 2.14²)，80% 的 EV 起始充电时刻服从正态分布(19, 3.14²)。空调相关参数如附录 B 表 B2 所示，室外温度变化曲线见附录 B 图 B1，储能相关参数如附录 B 表 B3 所示，

分布式光伏相关参数如附录 B 表 B4 所示。可中断负荷分为 3 类，分别对应最大中断比例为 20%、10%、10%，中断补偿费用分别为 400、500、800 元/MWh，同一类可中断负荷在连续时间段内持续中断量不超过可中断负荷总量的 20%。此外，设定峰、平、谷时电价分别为 1.1596、0.751、0.3926 元/kWh。在求得台区原始净负荷后对其进行 K-means++ 聚类，具体实现流程见附录 C 图 C1。由于需要划分出峰、平、谷 3 个时段，所以分别以 1、2、3 表示簇的数量 k 。从数据集中随机抽取 k 个需求数据点作为初始聚类中心，计算集合中每个数据点与 k 个数据中心的距离，将数据分配到距离最近的簇中，基于当前簇中的数据点，重新计算每个簇的聚类中心。判断新的聚类中心与上一次迭代的聚类中心是否重合，若重合，则聚类完成，反之，回到计算距离环节，继续迭代计算。最终聚类结果如附录 C 图 C2 所示，确定出台区负荷的峰、平、谷时段后，对应匹配峰、平、谷电价，结果如图 3 所示。

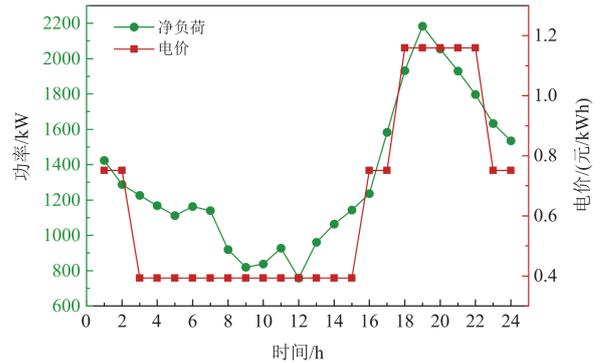


图 3 台区原始净负荷与分时电价

Fig. 3 Original net load and time-of-use electricity price in the distribution transformer area

4.1 用户侧灵活性资源功率聚合分析

EV 充电负荷聚合前状态如图 4 所示，空调电负荷聚合前状态如图 5 所示，EV 与空调均只有不工作

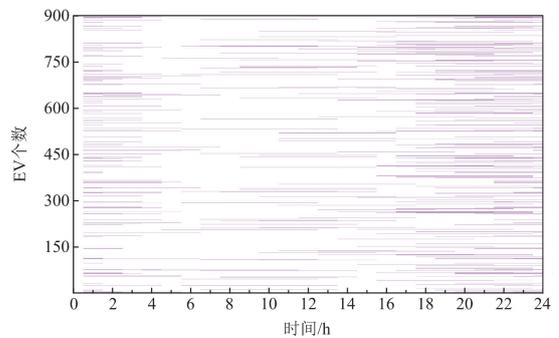


图 4 EV 聚合前状态

Fig. 4 State of EV before polymerization

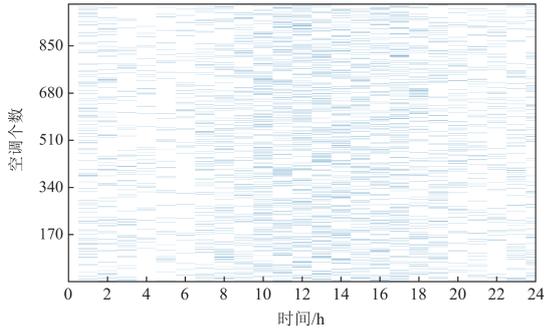


图5 空调电负荷聚合前状态

Fig. 5 State of air conditioning electric load before polymerization

与额定工作两种状态, 彩色部分表示设备处于额定工作状态, 白色部分表示设备不工作。

通过蒙特卡洛法聚合光伏、EV 与空调的功率曲线以及台区原始负荷曲线, 结果如图 6 所示。

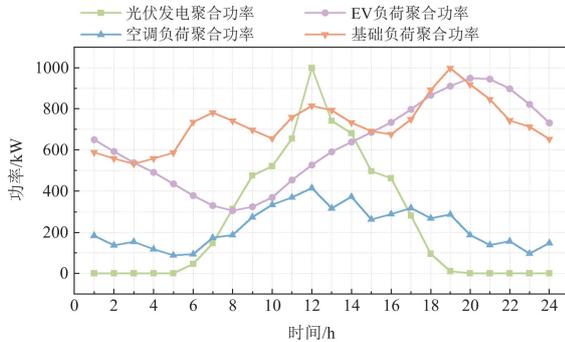


图6 灵活性资源功率聚合结果

Fig. 6 Flexibility resource aggregation results

针对图 6 中光伏发电聚合功率曲线, 光伏发电设备实际出力受光照强度影响, 通常会在光照强度最强的正午时段大规模发电, 对应 11:00—14:00 时段, 而在光照较少的傍晚时段发电量减少, 对应 16:00—19:00 时段, 在 20:00—次日 05:00 没有光照的时段, 光伏发电量为 0。

针对图 6 中 EV 负荷聚合功率曲线, 大多数居民区 EV 用户会在白天驱车前往工作地点、离开住处, 晚上重返居民区, 同时开始充电, 只有少数居民的作息与之相反, 所以居民区配电台区的 EV 充电负荷峰值会出现在晚上, 体现在 20:00 时, 低谷出现在早晨, 体现在 06:00—10:00 时段。可见, EV 充电负荷与用户出行习惯成正相关。

针对图 6 中空调负荷聚合功率曲线, 台区夏季正午室外温度最高, 用户会在温度高时降低空调的设定温度以保持室内温度舒适, 故台区的空调电负荷会在温度较高的白天上升, 空调电负荷于正午 12:00 达到峰值, 下午至晚上时段, 随着气温的降

低, 空调电负荷也逐渐降低, 用电规律与气温变化是匹配的。

针对图 6 中基础负荷聚合功率曲线, 基础负荷在晚上 19:00 左右达到峰值, 早晨 07:00 开始有大多数居民起床开始用电, 正午 12:00 有一些居民返家午休, 故基础负荷会在这两个时刻出现次峰值, 基础负荷同样与居民用户作息正相关。

由上述分析可知, 根据本文的功率聚合模型进行仿真后, 所得结果符合实际, 模型具备可行性。

4.2 灵活性资源优化调度结果分析

当 EV 与空调负荷均参与 DR, 且经济性指标与舒适度指标各占评测的 50% 时, 配电台区调度结果如图 7(a) 所示, 图中上半部分表示台区内各类负荷用电功率, 下半部分表示台区各类“电源”出力功率; 仅考虑经济性指标而忽略舒适度时, 配电台区调度结果如图 7(b) 所示。上述两种对比算例的结果显示, 台区的负荷功率与电源功率时刻保持平衡。经济性与用户温度满意度占不同比重时所得结果见表 1, 由于只考虑舒适度指标时, 仅能确定空调电负荷, 无法确定其他类负荷大小, 故此情况不在算例对比设置范围内。

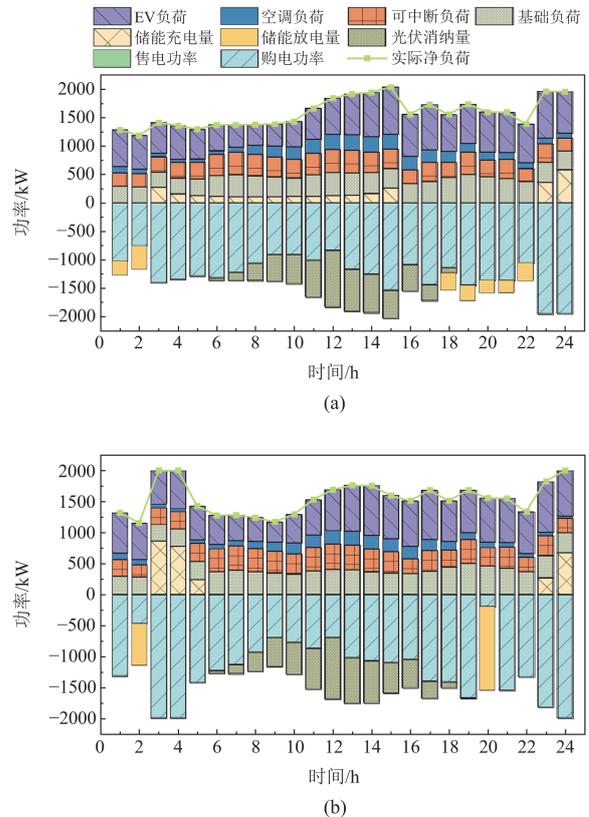


图7 台区可控资源优化调度结果对比

Fig. 7 Comparison of optimal scheduling results of controllable resources in the distribution transformer area

C_{temp} 取值介于 0 和 1 之间, 其值越接近 0 说明室内温度越接近设定的最佳室内温度, 即用户对温度的满意程度越高。上文中提到两目标函数权重系数之和为 1, 通过表 1 可分析出, 当 ω_1 取 1 时, C_{econ} 达到最小, 此时的调度问题为单目标优化, 用户的舒适度被忽视。当 ω_1 逐渐减小时, ω_2 自然增大, 调度变为多目标优化, 结果显示用户满意程度急速上升, 而经济性有所下降, 场景 2, C_{econ} 相比场景 1 增加约 0.5%。当 ω_1 、 ω_2 各占 0.5 时, C_{temp} 取值为 0, 说明用户满意程度已达到最佳水平, 而 C_{econ} 上升约 1.5%。若继续减小 ω_1 , 会发现 C_{temp} 与 C_{econ} 不再变化, 权重系数变化作用不明显。由此可见, 两个目标函数的变化并非线性的, ω_1 自 1 至 0.5 下降过程中, C_{econ} 增加的速率逐渐加快, C_{temp} 减小的速率呈减小趋势。考虑到台区调度, 为保证用户满意度而牺牲的经济性在可承受范围内, 本文建议将 ω_1 与 ω_2 均设置为 0.5。

表 1 不同算例参数设置与结果对比

Table 1 Parameter setting and result comparison of different example cases

场景	不同目标函数对应的权重系数		目标函数结果			
	ω_1	ω_2	C	C'_{econ}	$C_{econ}/元$	C_{temp}
	1	1	0	0	0	21 116.55
2	0.7	0.3	0.17	0.10	21 224.21	0.32
3	0.5	0.5	0.16	0.31	21 437.84	0
4	0.3	0.7	0.09	0.31	21 437.84	0
5	0.1	0.9	0.03	0.31	21 437.84	0

海量分布式负荷侧资源参与配电台区运行会增大电网调度难度。传统思路应对此类调度问题通常采用“一对一”式控制办法, 对管辖范围内所有可控负荷进行单一控制, 每台设备在每个时段均有一组“0-1”变量, 使得混合整数线性规划问题变得非常复杂, 计算时间极长, 甚至无法得到有效的解决方案。故本文提出负荷分类聚合方法, 实现台区内逐层调度, 在保证精确度的同时, 减小计算难度。传统方法与分类聚合方法的计算结果对比如表 2 所示, 其中设置了 3 组不同场景, 结果中包含不同数量的空调参与 DR 后台区调度所需计算时长, 以及以 20:00 空调的转移功率为代表的调度结果的对比。在求解效率方面, 随着参与 DR 的空调数量增加, 传统方法的计算时间明显远超过本文的分类聚合方法, 当空调数量增加到一定程度时, 传统方法将无法给出有效解; 从求解精度方面来看, 基于聚

合方法的负荷侧资源转移功率与传统方法接近, 且随着资源数量增加, 聚合精度也不会降低。以上分析表明, 基于资源聚合的逐层调度方法, 可以显著提升模型的求解效率, 且能保证一定的精度。

表 2 不同调度方法计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results of different scheduling methods

调度方法	计算结果	参与调度空调数量/台		
		100	500	1000
传统方法	求解时长/s	1254.61	5391.33	—
	空调转移功率/kW	-13.02	-31.00	—
分类聚合方法	求解时长/s	4.27	6.96	8.43
	空调转移功率/kW	-11.69	-29.74	-49.44

4.3 需求响应结果分析

本节分析了不同灵活性资源参与 DR 调控的结果。空调参与 DR 前后的用电功率与室内实际温度数据如图 8 所示, EV 参与 DR 前后的充电功率与分时电价曲线如图 9 所示, 可中断负荷参与 DR 后的实际中断量如图 10 所示, 储能充放电功率与蓄电量变化如图 11 所示。

分析图 8 可知, 台区内空调负荷在参与激励型需求响应后, 为保证调度经济性, 除 23:00 外各时段用电功率均有减少, 但依然保持室内温度不超过 27.68 °C 的最高室内温度约束, 对用户舒适度有保障, 通过调控空调负荷在台区维度实现台区运行优化。通过计算可知, 空调负荷在 12:00 可以减少 151.7 kW 电负荷, 为一日范围内电负荷减少量最大值, 可代表空调负荷向下调控的潜力, 23:00 空调电负荷增大 5.4 kW, 证明空调依然存在向上调控的潜力。

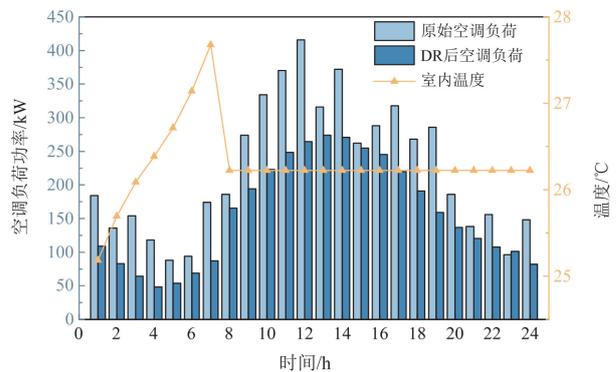


图 8 台区空调参与 DR 前后用电功率与室内温度

Fig. 8 Electric power and indoor temperature of the air conditioner before and after participating in DR in the distribution transformer area

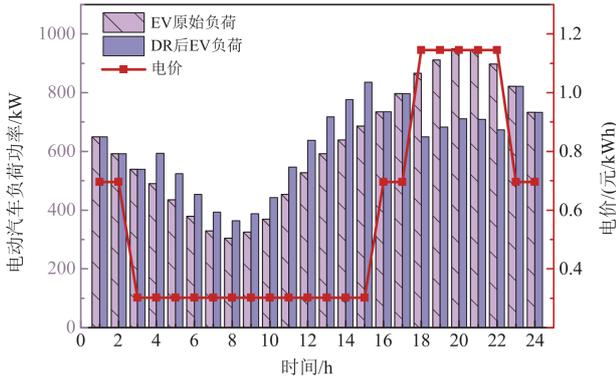


图9 台区EV参与DR前后充电功率与分时电价

Fig. 9 Charging power and time-of-use electricity price before and after EV participating in DR in the distribution transformer area

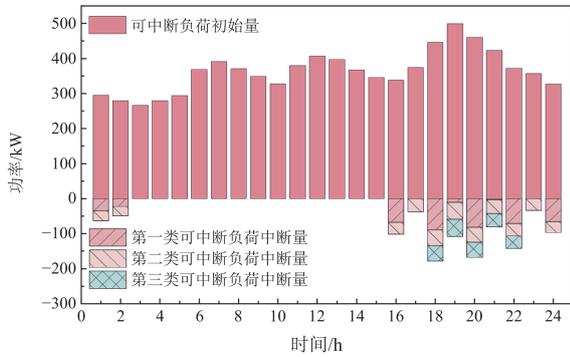


图10 台区可中断负荷参与DR后的中断量

Fig. 10 Amount of interruption after the interruptible load of the distribution transformer area participating in DR

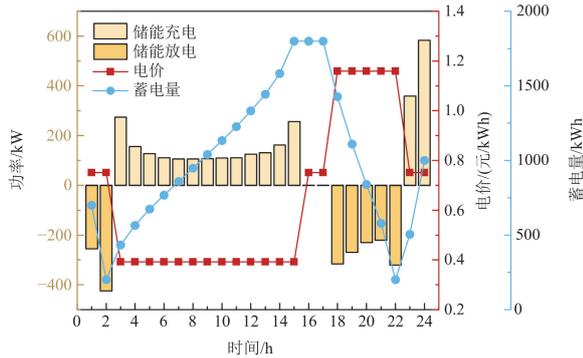


图11 台区储能充放电功率与蓄电量

Fig. 11 Charging and discharging power and storage capacity of energy storage in the distribution transformer area

由图9可知, EV用户参与价格型DR后, 在峰时段减少充电, 而转移至谷时段充电, 接受了分时电价的引导, 减少了用电成本, 也起到了削峰填谷的作用。由于EV在本文的调度模型中可归属为可

转移负荷, 故调度结果仅改变EV充电时段, 参与DR前后一个周期内EV充电总负荷不变, 在时间维度对台区进行了运行优化。EV通过参与DR可以实现充电负荷在时间维度的转移, 通过计算可知, 在谷时段, EV可最高增多149.6 kW的充电负荷, 在峰时段可最高减少237.2 kW的充电负荷, 为台区提供了可控潜力。

分析图10可知, 台区管理中心在谷时段不需要对可中断负荷进行中断操作, 而通常在平时段与峰时段对可中断负荷进行中断操作, 为保证同一类负荷在连续时间内持续中断量不超过可中断负荷总量20%的约束, 且同一类负荷在各时间点中断量不超过各自规定的最大量, 台区优先选择中断第一类可中断负荷, 以尽可能减少对用户生产、生活的影响, 但不持续中断第一类可中断负荷, 会在下时段配合第二类与第三类可中断负荷进行中断操作。通过计算可知, 台区可中断负荷可最高达到407.2 kW的中断量, 其向下调控的能力超过EV。

由图11可知, 受到购售电价与储能容量的影响, 台区主要选择利用储能节省用电成本。图11调度结果显示, 谷时段电价低, 储能大量充电, 在峰时段储能放电供应负荷, 减少峰时段向配电网购电的成本, 成功响应分时电价号召。通过计算可知, 储能通过充电实现向上调控的最高值可达到582.9 kW, 通过放电实现向下调控的最高值可达到424.4 kW。

不同季节新能源发电和负荷呈现出不同特性, 如在光伏大发至远超台区负荷总量的场景下, 弃光现象易出现在正午时段。表3对比了不同季节典型日下的光伏消纳情况, 并考虑了用户侧资源参与DR对光伏消纳的影响。算例选取了台区内各季节光伏大发的典型日, 对某参与DR意愿中等的台区

表3 光伏大发日灵活性资源是否参与DR的台区光伏消纳率结果对比

Table 3 Comparison of the results of photovoltaic consumption rate in DR stations with or without flexible resources in photovoltaic abundant day

场景	季节	消纳率/%			
		11时	12时	13时	14时
灵活性资源 不参与DR	春季	83.49	87.41	78.72	100
	夏季	100	83.00	100	94.70
	秋季	87.62	79.13	100	100
灵活性资源 参与DR	春季	100	88.78	93.78	100
	夏季	100	91.10	100	100
	秋季	100	91.01	100	100

进行春、夏、秋 3 个季节的测试，此台区范围较小，台区容量为 1 MW，有 400 辆电动汽车参与 DR。由表 3 结果可知，在夏季 12 时，台区光伏消纳率由 83.00% 上升至 91.10%，在夏季 14 时，由 94.70% 上升至 100%，春、秋两季同理。可见，在光伏大发时段，用户侧灵活性资源参与 DR 相较于不参与 DR，可以明显增大台区光伏消纳率。所以，减少台区弃光可以采用调整灵活性资源用电曲线的方法，根据台区需要，对用户侧资源进行必要的调控。

5 结论

在配电网高质量发展的新形势下，将灵活性资源功率聚合，进行集中式调控，通过需求响应引导负荷自觉参与台区调度，能够有效实现台区整体削峰填谷，提升光伏消纳率。本文对配电台区的各类灵活性资源优化调度问题进行了研究，得到如下结论。

1) 通过对不同类型灵活性资源进行功率聚合，保持了负荷基本特性。通过台区管理中心对各类负荷聚合中心的直接管理，实现了高效的整体调度，有效避免了台区管理中心调度所有灵活性资源所带来的不必要的计算难度与计算量。

2) 提出了不同类型灵活性资源参与不同类型需求响应的模型，使各类负荷结合自身运行条件作出调整，充分调动了可控资源的灵活性，有利于负荷削峰填谷。同时，计算了各类灵活性资源的可调控潜力，证明灵活性资源为台区提供了充足的可调控空间。

3) 本文构建的台区多目标优化运行模型兼顾经济性与舒适度。结果表明，多目标优化相较于传统仅考虑经济性的单目标优化更加全面，并且台区原本存在弃光现象，经过运行优化后，台区提高了光伏消纳率，实现了光伏全额消纳，符合能源绿色转型的要求，为类似场景提供了一种可行的优化运行与光伏消纳方案。

本文仅考虑配电台区内部的优化调度，未来将结合配电网网络拓扑结构，计及台区与配电网之间的交互影响，实现配电网的协同优化运行。

附录 A

由于模型的目标函数中存在非线性部分，如式(32)、式(33)所示，故需要对其进行线性化处理，以方便求解器求解。

首先，为消除 $B_{temp,t}$ 中所含绝对值项对求解带来的影响，用 Ω_t 代替 $B_{temp,t}$ ，并附加约束条件，将式(33)转化为

$$C_{temp} = \min \left(\frac{\sum_{t=1}^T S_{eq,t} \frac{e^{\Omega_t} - 1}{e - 1}}{\sum_{t=1}^T S_{eq,t}} \right)$$

$$\Omega_t \geq \frac{T_{in,eq,t} - 0.5(T_{in}^{max} + T_{in}^{min})}{0.5(T_{in}^{max} - T_{in}^{min})} \quad (A1)$$

$$\Omega_t \geq \frac{-T_{in,eq,t} + 0.5(T_{in}^{max} + T_{in}^{min})}{0.5(T_{in}^{max} - T_{in}^{min})}$$

将 Ω_t 取值在 0、1 之间时的 $y_1 = \frac{e^{\Omega_t} - 1}{e - 1}$ 用 $y_2 = \Omega_t$ 进行线性化拟合，如图 A1 所示。

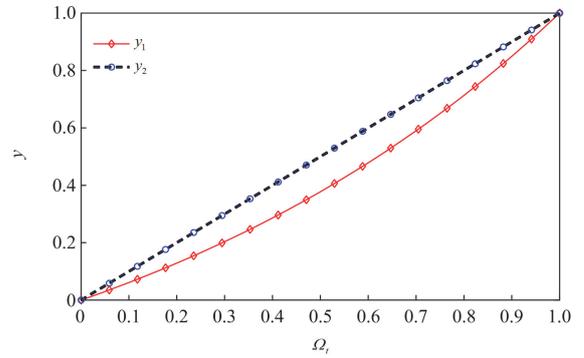


图 A1 线性化拟合

Fig. A1 Linear fitting

由此，式(A1)中等式可等效为

$$C_{temp} = \min \left(\frac{\sum_{t=1}^T S_{eq,t} \Omega_t}{\sum_{t=1}^T S_{eq,t}} \right) \quad (A2)$$

将分子中 0-1 变量与连续变量的乘积进行线性化处理，令 $\varphi_t = S_{eq,t} \Omega_t$ ，目标函数进一步转化为

$$C_{temp} = \min \left(\frac{\sum_{t=1}^T \varphi_t}{\sum_{t=1}^T S_{eq,t}} \right) \quad (A3)$$

且有对 φ_t 的约束，如式(A4)所示。

$$\begin{cases} \Omega_t - (1 - S_{eq,t}) \leq \varphi_t \leq \Omega_t \\ 0 \leq \varphi_t \leq S_{eq,t} \end{cases} \quad (A4)$$

令 $\Gamma = \min \frac{1}{\sum_{t=1}^T S_{eq,t}}$ ，式(A3)可由含 0-1 变量的分

式转化为

$$C_{temp} = \min \sum_{t=1}^T \varphi_t \cdot \Gamma \quad (A5)$$

并令 $\Gamma'_i = \Gamma S_{eq,t}$, 且有对 Γ'_i 的约束如式(A6)所示。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^T \Gamma'_i = 1 \\ \Gamma - (1 - S_{eq,t}) \leq \Gamma'_i \leq \Gamma \\ \frac{S_{eq,t}}{T} \leq \Gamma'_i \leq S_{eq,t} \end{cases} \quad (A6)$$

附录 B

表 B1 EV 参数

Table B1 EV parameters

参数名称	参数值
N_e /辆	900
E_h /kWh	50
P_{ev} /kW	8
E_b /kWh	18.89
η_{ev} /%	90
λ_{EV} /(元/kWh)	0.3
σ /%	15

表 B2 空调参数

Table B2 Air conditioning parameters

参数名称	参数值
$T_{in}^{max}, T_{in}^{min}$ /°C	27.68、24.77
G_{max} /°C	3
N_{ac} /个	1000
P_{ac}^{ac} /kW	2
λ_{AC} /(元/kWh)	0.3
ε /°C	3

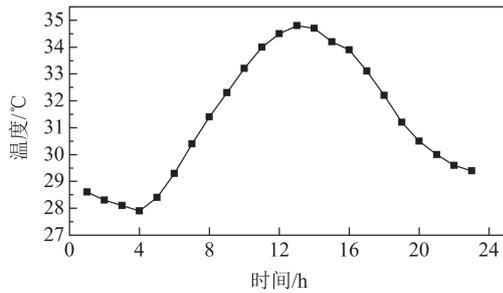


图 B1 室外温度变化曲线

Fig. B1 Outdoor temperature change curve

表 B3 储能参数

Table B3 ESS parameters

参数名称	参数值
$P_{in,max}^{ess}, P_{out,max}^{ess}$ /kW	150, 150
$S_{d,min}^{ess}, S_{d,max}^{ess}$ /kWh	20, 180
η_{in}, η_{out} /%	85, 85
γ_{ess} /(元/kWh)	0.02
N_d /个	10

表 B4 分布式光伏参数

Table B4 Distributed photovoltaic parameters

参数名称	参数值
c_{pv} /(元/kWh)	1.2
N_{pv} /个	1000

附录 C

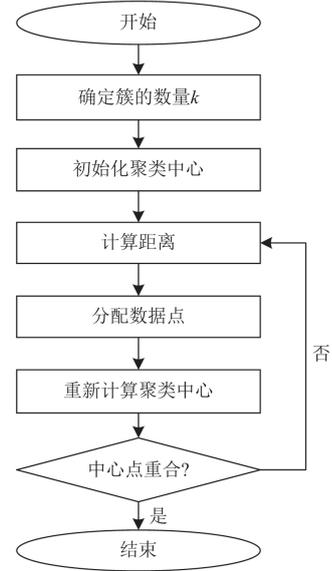


图 C1 K-means++聚类流程图

Fig. C1 K-means++ clustering flow chart

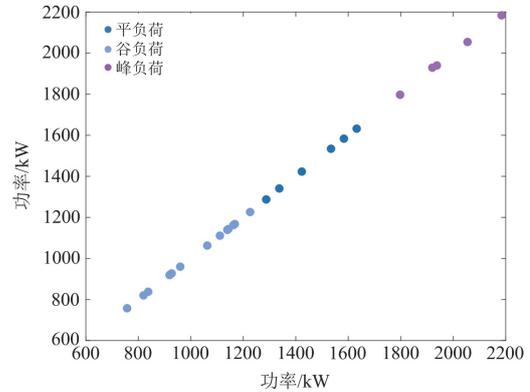


图 C2 K-means++聚类结果

Fig. C2 K-means++ clustering results

参考文献

- [1] 陈心宜, 胡秦然, 石庆鑫, 等. 新型电力系统居民分布式资源管理综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 157-175.
CHEN Xinyi, HU Qinran, SHI Qingxin, et al. Review on residential distributed energy resource management in new power system[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2024, 48(5): 157-175.
- [2] SAIF A, KHADEM S K, CONLON M F, et al. Impact of distributed energy resources in smart homes and community-based electricity market[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 59-69.
- [3] 张海春, 陈望达, 沈浚, 等. 计及灵活性资源的配电网韧性研究评述[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 66-84.
ZHANG Haichun, CHEN Wangda, SHEN Jun, et al. Review of power distribution network resilience studies considering flexibility resources[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 66-84.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于新形势下配电网高质量发展的指导意见[EB/OL]. [2024-02-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6935790.htm.
National Development and Reform Commission. National Energy Administration. Guidance on high-quality development of distribution networks under new circumstances[EB/OL]. [2024-02-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6935790.htm.
- [5] LIU Z, CHEN Y, ZHANG Z, et al. Identification of vulnerable nodes and sensitivity analysis of control parameters for multiple grid-connected converter systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024: 1-11.
- [6] XIE X, ZHANG J, SUN Y, et al. A measurement-based dynamic harmonic model for single-phase diode bridge rectifier-type devices[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-13.
- [7] WU S, WANG Q, CHEN Q, et al. Cyber-physical integrated planning of distribution networks considering spatial-temporal flexible resources[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(3): 142-156.
- [8] 潘超, 王锦鹏, 包钰婷, 等. 考虑源荷侧灵活性资源的风光消纳互动调控[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 1-8.
PAN Chao, WANG Jinpeng, BAO Yuting, et al. Interactive control of wind and photovoltaic power consumption considering source-load side flexible resources[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 1-8.
- [9] 吴文传, 张伯明, 孙宏斌, 等. 主动配电网能量管理与分布式资源集群控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 111-118.
WU Wenchuan, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. Energy management and distributed energy resources cluster control for active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 111-118.
- [10] QU M, DING T, WEI W, et al. An analytical method for generation unit aggregation in virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5466-5469.
- [11] 张美霞, 王晓晴, 杨秀, 等. 考虑路网和用户满意度的集群电动汽车主从博弈优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 1-11.
ZHANG Meixia, WANG Xiaoqing, YANG Xiu, et al. Stackelberg game optimization scheduling strategy for aggregated electric vehicles considering customer satisfaction and the road network[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 1-11.
- [12] VATANDOUST B, AHMADIAN A, GOLKAR M A, et al. Risk-averse optimal bidding of electric vehicles and energy storage aggregator in day-ahead frequency regulation market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2036-2047.
- [13] 杨桂兴, 王维庆, 姚红雨, 等. 面向广域分布的家庭蓄热式电采暖集群控制方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(8): 56-62.
YANG Guixing, WANG Weiqing, YAO Hongyu, et al. Control method of wide-area distributed household regenerative electric heating clusters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8): 56-62.
- [14] 范德金, 张姝, 王杨, 等. 考虑用户调节行为多样性的空调负荷聚合商日前调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 133-142.
FAN Dejin, ZHANG Shu, WANG Yang, et al. Day ahead scheduling strategy for air conditioning load aggregators considering user regulation behavior diversity[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 133-142.
- [15] 齐宁, 程林, 田立亭, 等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 193-207.
QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 193-207.
- [16] 蒲天骄, 刘克文, 陈乃仕, 等. 基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3511-3521.
PU Tianjiao, LIU Kewen, CHEN Naishi, et al. Design of ADN based urban energy internet architecture and its technological issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3511-3521.
- [17] 钟浩, 舒栋, 张磊, 等. 考虑电能质量的配电网增值服务双层优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 16-25.
ZHONG Hao, SHU Dong, ZHANG Lei, et al. A two-layer optimization model of value-added service in a distribution network considering power quality[J]. Power

- System Protection and Control, 2023, 51(23): 16-25.
- [18] 杨杉, 傅桐, 李泮洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 1-12.
CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.
- [19] 杨秀, 卢炜, 余文昶, 等. 智能小区居民负荷参与优化调度及控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 22-34.
YANG Xiu, LU Wei, YU Wenchang, et al. Optimal dispatching and control strategies for residential load of intelligent communities[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 22-34.
- [20] 刘艳峰, 杨燕子, 罗西. 关中农村不同类型家庭夏季柔性用能负荷多目标优化调度研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 110-118.
LIU Yanfeng, YANG Yanzi, LUO Xi. Multi-objective optimization scheduling model of flexible energy consumption load in summer for different types of rural households in Guanzhong plain[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(8): 110-118.
- [21] MNATSAKANYAN A, KENNEDY S W. A novel demand response model with an application for a virtual power plant[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 230-237.
- [22] 李孟阳, 李国杰, 汪可友, 等. 考虑需求响应及调频性能变化的虚拟电厂日前投标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 13-25.
LI Mengyang, LI Guojie, WANG Keyou, et al. Day-ahead bidding strategy for virtual power plant considering demand response and frequency regulation performance variation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 13-25.
- [23] 杨秀, 傅广努, 刘方, 等. 考虑多重因素的空调负荷聚合响应潜力评估及控制策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 699-714.
YANG Xiu, FU Guangnu, LIU Fang, et al. Potential evaluation and control strategy of air conditioning load aggregation response considering multiple factors[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 699-714.
- [24] 汪锋, 刘智强, 张克勇, 等. 基于分时电价与储能充放电策略的台区可控资源聚合及调度[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1204-1214.
WANG Feng, LIU Zhiqiang, ZHANG Keyong, et al. Adjustable resource aggregation and scheduling in distribution transformer station areas based on time-of-use price and charge-discharge strategy of energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1204-1214.
- [25] 谢敦见. 温控负荷的需求响应潜力评估及其协同优化管理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
XIE Dunjian. Demand response evaluation and coordinated optimization of thermostatically controlled loads[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [26] 陈艳波, 田昊欣, 刘宇翔, 等. 计及电动汽车需求响应的高速公路服务区光储充鲁棒优化配置[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-16[2024-05-22]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231850>.
CHEN Yanbo, TIAN Haoxin, LIU Yuxiang, et al. Robust optimization configuration of photovoltaic-energy storage-charging integrated system in expressway service area considering demand response of electric vehicles[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-16[2024-05-22]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231850>.

收稿日期: 2024-06-10; 修回日期: 2024-09-24

作者简介:

陈艳波(1982—), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为新能源电力系统分析, 电力系统优化调度等; E-mail: chenyanbo@ncepu.edu.cn

张瑞芯(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统分析, 电力系统优化调度等; E-mail: 18830258021@163.com

张智(1994—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为新能源电力系统运行等。E-mail: zz_dqgc@163.com

(编辑 周金梅)