

计及电动汽车和温控负荷集群的负荷控制用户组合优化方法

李思维^{1,2}, 许中平², 于龙², 杜立石², 岳靓², 张喜润², 王小明³

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 北京中电飞华通信有限公司, 北京 100071;
3. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽合肥 230061)

摘要: 随着新型电力系统建设不断深入, 电力系统面临峰谷差大、波动性强的问题, 利用用户侧资源参与负荷控制是解决该问题的重要举措之一。提出一种计及电动汽车和温控负荷集群的负荷控制用户组合优化方法。首先, 采用分级控制的方式聚合各单体电动汽车与温控负荷集群, 并根据其参与负荷控制类型的意愿分为错峰和避峰 2 类, 分别建立错峰和避峰用户负荷调节量模型。其次, 针对避峰用户参与负荷控制后出现的负荷反弹现象, 构建三阶段反弹负荷模型; 在此基础上考虑用户参与负荷控制的影响程度, 建立负荷控制影响函数。最后, 以负荷控制影响最小、电网损失最小以及负荷波动最小为多目标, 优化参与错峰和避峰的用户构成以及用户负荷调节量, 在满足负荷控制调控需求的同时, 有效抑制参与控制后负荷反弹造成的新负荷高峰, 实现分散式负荷资源与电网的良好供需互动。

关键词: 分散式负荷资源; 温控负荷集群; 负荷反弹; 负荷控制; 组合优化

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202402070

0 引言

“碳达峰、碳中和”战略将引领和加速电力行业和能源领域革命, 以清洁可再生能源和传统能源互相支撑的现代能源体系将逐步建立^[1-3]。大部分传统化石能源将从终端用能的各行各业中逐步退出, 取而代之的是以多形态电力负荷为主的能源利用方式来支撑产业转型升级和人民生活水平提升^[4-6]。随着经济的持续发展, 工业负荷和地区居民用电负荷增速明显, 如电动汽车等部分行业发展蓬勃, 带动了大量的用电负荷增长。根据中国电力企业联合会 2024 年发布的《2023—2024 年度全国电力供需形势分析预测报告》, 近 3 年迎峰度夏期间, 中国电力供需总体平衡, 用电高峰时段电力供需偏紧。由于中国工业企业、商业建筑、居民负荷蕴藏了巨大的多形态可调节负荷资源, 充分调动用户侧资源的灵活性, 与新能源及常规电源进行协同调度以促进新型电力系统的

供需平衡和稳定运行是发展新型电力系统的重要技术支撑和发展趋势^[7-8]。

国内外学者在用户侧资源参与负荷控制方面开展了大量研究, 主要的负荷控制分为 2 类, 一类是采用价格激励的方式, 如分时电价、尖峰电价等引导用户提供灵活性资源, 平抑负荷波动; 另一类是通过控制信号进行直接的负荷控制。文献 [9] 以减小峰谷差和降低用能成本为目标, 提出负荷控制集中式优化方法并采用启发式算法进行求解。文献 [10] 提出基于能效标尺竞争的缺口分配方法, 通过将能效指数作为用户参与负荷控制容量的分配依据, 优化负荷控制次序。文献 [11] 考虑用户参与负荷控制造成的损失程度, 将负荷控制缺口指标按照“区域-区域”和“区域-用户”进行分解, 将缺口指标分配到不同等级的用户。文献 [12] 提出利用灰靶理论对各潜力指标下的决策矩阵进行处理, 结合前景理论实现了用户参与检修、轮休、错时和避峰等不同类型负荷控制响应潜力的量化。

然而基于价格激励的方式需要智能电表及智能用电设备等硬件设备支撑, 对用户全时段下的用电信息要求较高^[13]。此外基于价格激励的负荷

收稿日期: 2024-02-28; 修回日期: 2024-09-30。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(面向多主体参与的负荷管理云关键技术及运行机制研究, 5400-202320223A-1-1-ZN)。

控制效果与用户参与程度密切相关^[14]，用户行为的强不确定性将极大影响负荷控制效果。为此，通过行政手段、下发调控指令或直接控制可控负荷可实现负荷控制，平抑负荷差。若用户用电设备可直接受控或与电网签订负荷控制合同，电力调度机构通过制定用户序位表、优化分配等方式实现不同用户参与负荷控制顺次以及响应容量的分配。文献[15]考虑同一产业链的用户按照轮休价值指数选择参与负荷控制，以轮休负荷峰值最小化为目标，优化轮休分组，减小轮休对正常生产生活的影响。文献[16]从电网和用户2个角度出发，考虑负荷控制总成本最小和用户用电成本最小为目标，并设立动态支援意愿序位表保证用电公平性。文献[17]将参与负荷控制的用户根据其不同属性指标下的混合占有度进行排序，通过求取用户加权贴进度对参与负荷控制的用户进行排序。

然而现有负荷控制相关研究聚焦参与调控对象的影响，对负荷控制用户响应后的负荷反弹现象考虑较少。为此，本文提出一种考虑电动汽车集群和温控负荷集群的负荷控制用户组合优化方法。同时对所提方法的可行性和有效性进行算例分析和验证。

1 用户负荷控制响应过程

本文以电动汽车和温控负荷集群为负荷控制用户。

1.1 电动汽车负荷控制响应过程

单体电动汽车参与负荷控制的响应特性如图1所示。假设单体电动汽车充放电功率恒定，并且已知电动汽车离开电网的时间和最低用电需求。阴影区域 $ABCFED$ 是电动汽车参与负荷控制过程中的响应特性可行范围。

其中， A 点表示电动汽车入网时的荷电状态（state of charge, SOC）； S_{OCs} 为电动汽车允许的放电下限，即 DE 段； \bar{S}_{OC} 为电动汽车允许的充电上限，即 BC 段； t_s 为电动汽车入网时间； t_d 为电动汽车离网时间； F 点对应的 S_{OCd} 为最低用电需求； CF 为保障离开电网前保持电动汽车SOC在 $[S_{OCd}, \bar{S}_{OC}]$ 范围的示意线段。

以电网向电动汽车供电为正方向，处于可控区

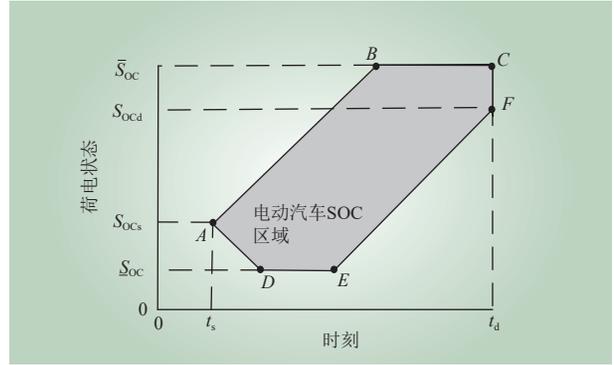


图1 电动汽车参与负荷控制的响应特性

Fig. 1 Response characteristics of electric vehicles participating in load control

域 $ABCFED$ 内的电动汽车参与负荷控制^[18]，即

$$\begin{cases} \bar{P}_t = P_t^{EV}, \underline{P}_t = -P_t^{EV}, t \in [t_s, t_d] \\ \bar{P}_t = 0, \underline{P}_t = 0, t \notin [t_s, t_d] \end{cases} \quad (1)$$

式中： P_t^{EV} 为 t 时刻电动汽车的充放电运行功率； \bar{P}_t 、 \underline{P}_t 分别为充放电功率最大、最小值。

电动汽车集群可控功率由下述步骤得到。

1) 电动汽车接入电网的初始SOC。

为确定电动汽车接入电网时的初始SOC值 S_{OCs} ，须对电动汽车的参数进行分析，其中包括出行前的SOC、电动汽车基础参数（容量、能耗）和运行参数（日出行距离）等^[19]，则有

$$S_{OCs} = \delta - \frac{hC_e}{D} \quad (2)$$

式中： D 为电池容量； h 为电动汽车的日出行距离； C_e 为电动汽车单位里程能耗； δ 为用户出行前的SOC值。

D 、 C_e 、 h 的概率分布均采用蒙特卡洛方法抽样。

2) 电动汽车的出行时间。

电动汽车的出行时间包括开始和结束出行时间，即电动汽车离开电网和接入电网时间，本文假设电动汽车结束出行后立刻接入电网。采用蒙特卡罗法抽样确定电动汽车的开始出行时间 t_s 和电动汽车的结束出行时间 t_d ，确定入网时的 S_{OCs} 。

3) 用户的出行需求。

根据用能需求的概率分布，确定电动汽车出行对SOC的需求 S_{OCd} 。本文以电动汽车向电网供电方向为正方向，充电时 P_t^{EV} 为负值，同时 P_t^{EV} 需要满足交换功率的限制。在入网时段内，实时SOC值 $S_{OC,t}$ 受电动汽车充放电功率、电池容量以

及用户出行需求的约束，以保证出行需求，即

$$S_{OC,t} = S_{OC,t-\Delta t} - \frac{P_t^{EV} \Delta t}{D_t} \quad (3)$$

$$D_t = \begin{cases} D\eta_d, P_t^{EV} \geq 0 \\ D/\eta_c, P_t^{EV} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： Δt 为时间间隔； D_t 为广义电池容量； η_c 为电动汽车电池的充电效率； η_d 为电动汽车电池的放电效率。

4) 电动汽车负荷调节量。

电动汽车集群与电网交换的功率 w_t^{EV} 为

$$w_t^{EV} = \sum_{j=1}^{N_{EV}} P_{j,t}^{EV} \quad (5)$$

$$P_{t,up}^{EVA} = \sum_{j=1}^{N_{EV}} (\bar{P}_{j,t} - P_{j,t}^{EV}) \quad (6)$$

$$P_{t,down}^{EVA} = \sum_{j=1}^{N_{EV}} (P_{j,t} - P_{j,t}^{EV}) \quad (7)$$

式中： N_{EV} 为实时入网的电动汽车数量； $P_{t,up}^{EVA}$ 、 $P_{t,down}^{EVA}$ 分别为电动汽车集群的上调能力和下调能力， $P_{t,up}^{EVA} \leq 0$ 。

1.2 温控负荷控制响应

1.2.1 温控负荷可控区域

由于建筑围护结构和室内空气具有良好的热储能特性，使得电热泵设备逐渐成为家居型需求响应控制技术的重点。电热泵设备基本动态过程如图 2 所示。图中阴影部分为温控负荷响应的可控区域^[20]。

温控负荷输出功率的上下限 \bar{P}_t^L 、 P_t^L 分别为

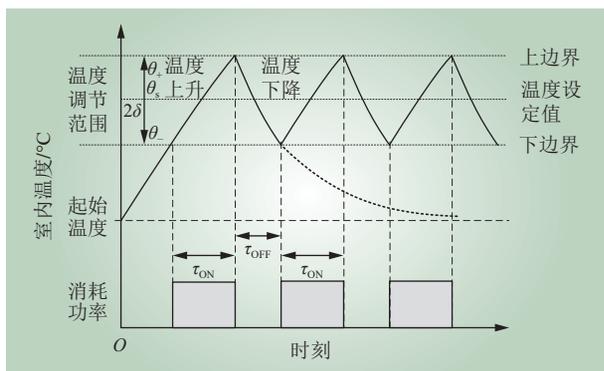


图 2 温控负荷动态特性

Fig. 2 Dynamic characteristics of temperature-controlled load

$$\begin{cases} \bar{P}_t^L = 0, \phi_t = 0 \\ P_t^L = -P^{L,c}, \phi_t = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $P^{L,c}$ 为温控负荷的额定消耗功率； ϕ_t 为 t 时刻温控负荷的开关状态， ϕ_t 为 0 时表示关断，为 1 时表示开启。

1.2.2 温控负荷集群输出功率

温控负荷集群中各温控负荷响应顺序如图 3 所示。对于温控负荷，以增加用电功率为正方向，减小用电功率为负方向。图 3 中以单体用户室内温度变化说明温控负荷的响应顺序，其中，在 t_1 时刻达到可参与调控的室内温度下限 θ_{lower}^{con} ；在 $[t_1, t_2]$ 时段，用户提供上调能力，此时室内温度超过可参与调控的室内温度上限 θ_{upper}^{con} ，因此不参与调控；在 $[t_3, t_4]$ 时段，用户关闭温控负荷，提供下调能力，室内温度下降^[21]。 t 时刻温控负荷集群的输出功率 w_t^{TCL} 、温控负荷集群的上调能力 $P_{t,up}^{TCLA}$ 和下调能力 $P_{t,down}^{TCLA}$ 分别为

$$w_t^{TCL} = \sum_{j=1}^{N_{TCL}} P_{j,t}^L \quad (9)$$

$$P_{t,up}^{TCLA} = \sum_{\substack{\theta_{j,t}^L \in (\theta_{upper}^{con}, \theta_{upper}) \\ \phi_{j,t}=1}} \bar{P}_{j,t}^L \quad (10)$$

$$P_{t,down}^{TCLA} = \sum_{\substack{\theta_{j,t}^L \in (\theta_{lower}, \theta_{lower}^{con}) \\ \phi_{j,t}=0}} P_{j,t}^L \quad (11)$$

式中： $P_{j,t}^L$ 为 t 时刻集群 j 温控负荷的电功率； $\theta_{j,t}^L$ 为 t 时刻集群 j 参与温度控制时的温度； N_{TCL} 为温控负荷用户数量； θ_{upper} 、 θ_{lower} 分别为室内最大可接受温度上、下边界。

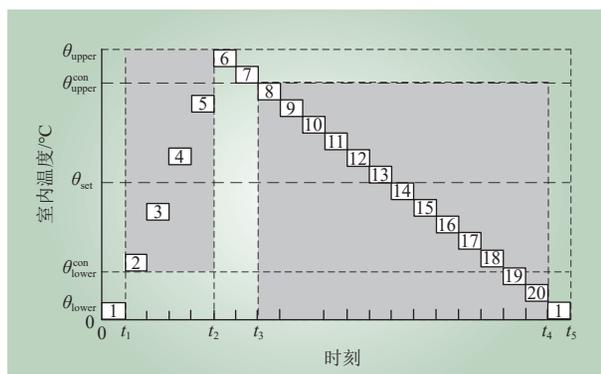


图 3 单个温控负荷响应特性

Fig. 3 Individual temperature-controlled load response characteristics

2 负荷控制用户负荷调节量建模

负荷控制包括错峰、避峰和限电3种形式，考虑到限电对用户的影响过大，因此本文采用错峰和避峰2类负荷控制类型，如图4所示。

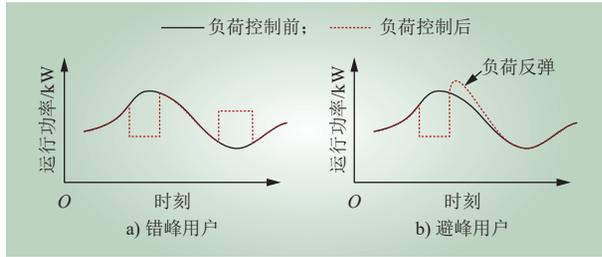


图4 错峰和避峰用户参与负荷控制示意

Fig. 4 Load control of users participating in peak load shifting and shedding

2.1 错峰用户负荷调节量

错峰用户在一个调度日内的用电负荷可根据其自身需求进行平移。在每个调度时段内，错峰用户负荷调节量在可调节区间根据负荷控制指令进行调控，但在一个调度周期内总用电量保持不变，即

$$\sum_{t=1}^T p_{i,t} = 0, \quad i \in N_a \quad (12)$$

式中： T 为周期； $p_{i,t}$ 为 t 时刻错峰用户负荷 i 调节量； N_a 为错峰用户集合， $N_a \subseteq N$ ， N 为参与负荷控制的用户集合。

$p_{i,t}$ 应满足的约束范围为

$$\begin{cases} p_{i,t,\min} \leq p_{i,t} \leq p_{i,t,\max} \\ w_{i,t,\min} \leq w_{i,t} - p_{i,t} \leq w_{i,t,\max} \end{cases}, \quad i \in N_a \quad (13)$$

式中： $p_{i,t,\max}$ 、 $p_{i,t,\min}$ 分别为 t 时刻用户 i 负荷调节量上下限； $w_{i,t}$ 为 t 时刻用户 i 响应前的负荷功率； $w_{i,t,\max}$ 、 $w_{i,t,\min}$ 分别为 t 时刻用户 i 负荷的上下限。

2.2 避峰用户负荷调节量

避峰用户参与负荷控制的方式为在尽可能不影响自身用电需求下削减负荷，因此 t 时刻避峰用户 i 的负荷调节量 $p_{i,t}$ 总为非负的。避峰用户负荷调节量的约束范围为

$$\begin{cases} 0 \leq p_{i,t} \leq p_{i,t,\max} \\ w_{i,t,\min} \leq w_{i,t} - p_{i,t} \leq w_{i,t,\max} \end{cases}, \quad i \in N_b \quad (14)$$

式中： N_b 为避峰用户集合， $N_b \subseteq N$ 。

2.3 负荷反弹模型

负荷反弹是错峰用户参与负荷控制后为尽快恢复到原有运行状态，在其恢复过程中负荷曲线偏离原有负荷曲线的现象。为避免负荷恢复过程中出现负荷反弹现象而导致负荷超限，本节采用三阶段负荷反弹模型描述负荷反弹过程中的负荷值^[17]，并将其作为约束条件在后续使用。

假设 t 时刻负荷控制结束转为正常运行，用户 i 在 t 时刻的负荷反弹量 $l_{i,t}$ 由前3个时段的负荷调节量 $p_{i,t-1}$ 、 $p_{i,t-2}$ 、 $p_{i,t-3}$ 决定，即

$$l_{i,t} = \alpha p_{i,t-1} + \beta p_{i,t-2} + \chi p_{i,t-3} \quad (15)$$

式中： α 、 β 、 χ 分别为对应时刻的反弹系数。

2.4 负荷控制影响函数

本文定义用户负荷削减时的负荷调节量为正。对于错峰用户，在峰荷时段负荷减小，负荷调节量为正；在非峰荷时段负荷增加，负荷调节量为负。对于削峰用户，仅存在负荷减小的需求，其负荷调节量始终为非负值。用户在收到调控指令参与负荷控制时，对原有用电计划的影响将随着负荷调节量的深度逐渐增加，负荷控制影响函数示意如图5所示。

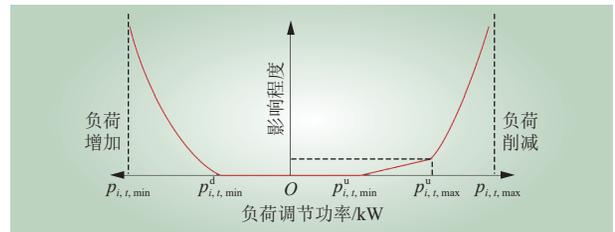


图5 负荷控制影响函数

Fig. 5 Load control influence function

当负荷调节量处于较小影响调节区间 $[p_{i,t,\min}^d, p_{i,t,\min}^u]$ 时，功率的调整对于用户用电影响非常小，定义在此阶段内功率调整造成的损失为0。当负荷调节量处于一般影响调节区间 $[p_{i,t,\min}^u, p_{i,t,\max}^u]$ 时，用户的影响程度和调节功率之间呈现线性关系。当负荷调节量处于较大调节区间 $[p_{i,t,\max}^u, p_{i,t,\max}^d]$ 或 $[p_{i,t,\max}^u, p_{i,t,\max}^d]$ 时，功率调整对于用户的用电影响开始增大，功率调整越大，影响程度随之加大，本文用指数函数描述该区间内用户受到的影响和功率调整量之间的关系。综上，用户的负荷控制影响函数表示为

$$f(p_{i,t}) = \begin{cases} a_1 \left(e^{(p_{i,t,\min}^d - p_{i,t})} - 1 \right), & p_{i,t,\min} \leq p_{i,t} < p_{i,t,\min}^d \\ 0, & p_{i,t,\min}^d \leq p_{i,t} < p_{i,t,\min}^u \\ a_2 (p_{i,t} - p_{i,t,\min}^u), & p_{i,t,\min}^u \leq p_{i,t} < p_{i,t,\max}^u \\ a_2 (p_{i,t,\max}^u - p_{i,t,\min}^u) + a_3 \left(e^{(p_{i,t} - p_{i,t,\max}^u)} - 1 \right), & p_{i,t,\max}^u \leq p_{i,t} \leq p_{i,t,\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $f(p_{i,t})$ 为用户因参与负荷控制受到的影响函数； a_1 、 a_2 、 a_3 分别为负荷控制影响函数中的用户影响程度系数。

2.5 用户状态矩阵

对于参与负荷控制的用户 i ，建立其在调度时刻 t 的状态矩阵 C_i ，对于状态矩阵中的第 t 个向量 $C_{i,t}(t \in [1, T])$ ，包含用户 i 在 t 时刻参与负荷控制的响应状态 $x_{i,t}$ 、可调节功率 $p_{i,t}$ 、不参加负荷控制时的基准负荷 $w_{i,t}$ 以及负荷反弹量 $l_{i,t}$ ，即

$$C_i = \begin{bmatrix} C_{i,1} \\ \vdots \\ C_{i,t} \\ \vdots \\ C_{i,T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i,1} & p_{i,1} & w_{i,1} & l_{i,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i,t} & p_{i,t} & w_{i,t} & l_{i,t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i,T} & p_{i,T} & w_{i,T} & l_{i,T} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中： $x_{i,t}$ 为用户 i 在 t 时刻的状态量，当 $x_{i,t}=1$ 时表示用户在 t 时刻参与负荷控制，反之表示用户不参与。

3 考虑负荷反弹的负荷控制用户优化组合模型

3.1 目标函数

用户参与负荷控制尤其是参与错峰控制时会造成负荷削减，一方面影响用户正常用能，另一方面减少了电网公司的收益^[22]。本文以用户参与负荷控制造成的损失最小、电网公司收益损失最小为目标函数。此外，在参与负荷控制时，除了须满足负荷调控需求，对于错峰用户，须将削减部分的负荷平移至其他时段，对于错峰用户，须尽可能减小负荷反弹造成的影响，为此增加负荷波动最小的优化目标。不同优化目标的权重分别设定为 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 ，目标函数^[23-24]为

$$\begin{aligned} \arg \min & \varphi_1 \sum_{t=1}^T \sum_{i \in N} f(p_{i,t}) x_{i,t} \Delta t + \varphi_2 \sum_{t=1}^T \sum_{i \in N} g(p_{i,t}) x_{i,t} \Delta t + \\ & \varphi_3 \sum_{t=1}^T \sum_{i \in N_b} h(p_{i,t}) x_{i,t} \Delta t \end{aligned} \quad (18)$$

式中： $g(p_{i,t})$ 为电网公司收益损失函数，与负荷正向调节量成正比例； $h(p_{i,t})$ 为响应前后负荷偏差函数。

$$g(p_{i,t}) = a_4 p_{i,t} \quad (19)$$

$$h(p_{i,t}) = a_5 \|p_{i,t}\|_2 \quad (20)$$

式中： a_4 、 a_5 分别为负荷反弹函数的参数。

3.2 约束条件

3.2.1 功率平衡约束

各调度时刻下用户负荷调节量汇总应大于等于负荷控制需求总额，即

$$\sum_{i \in N} x_{i,t} p_{i,t} \geq L_{C,t} \quad (21)$$

式中： $L_{C,t}$ 为 t 时刻的负荷控制需求。

3.2.2 用户参与控制次数约束

对于参与负荷控制的用户，为尽可能减小对参与负荷控制的用户正常用能的影响，在一个调度日内对用户参与控制次数进行约束，即

$$\sum_{t=1}^T x_{i,t} \leq X_i, \quad i \in N \quad (22)$$

式中： X_i 为用户 i 的最大响应次数。

3.2.3 用户负荷上下限约束

错峰用户在参与负荷控制后，由于负荷反弹出现负荷增加现象，在出现负荷反弹时须保持用户负荷处于安全运行区间，避免新的负荷峰值出现，即

$$w_{i,t,\min} \leq l_{i,t} + w_{i,t} + x_{i,t} p_{i,t} \leq w_{i,t,\max}, \quad i \in N_b \quad (23)$$

3.2.4 用户用能连续性约束

用户相邻时段用能应保持一定连续性，即

$$d_i \leq (l_{i,t+1} + w_{i,t+1} + x_{i,t+1} p_{i,t+1}) - (l_{i,t} + w_{i,t} + x_{i,t} p_{i,t}) \leq u_i, \quad i \in N \quad (24)$$

式中： u_i 、 d_i 分别为用户 i 的负荷增减速率的最大、最小值。

3.2.5 最大传输功率约束

为保障线路安全，同一线路下各用户负荷之和须保证不越限，即

$$\sum_{i=1}^N (l_{i,t} + w_{i,t} + x_{i,t} p_{i,t}) \leq Q_t \quad (25)$$

式中： Q_t 为线路最大承载功率。

此外，约束条件还应包含错峰用户负荷调节

量约束（式（12）（13））以及错峰用户负荷调节量约束（式（14））。

3.3 求解方法

由于目标函数中包含分段函数，本节介绍分段函数线性化的方法，将目标函数转化为凸函数，从而采用商用求解器进行求解。

3.3.1 线性化处理方法

假设一个 n 段线性函数 $f(x)$ 的分点为 $b_1 \leq b_2 \leq \dots \leq b_k \leq \dots \leq b_{n+1}$ ，引入连续变量 w_k 实现函数线性化，将 x 和 $f(x)$ 表示为

$$x = \sum_{k=1}^{n+1} w_k b_k \quad (26)$$

$$f(x) = \sum_{k=1}^{n+1} w_k f(b_k) \quad (27)$$

连续变量 w_k 和 0-1 变量 z_k 满足

$$\begin{cases} w_1 \leq z_1, w_2 \leq z_1 + z_2, \dots, w_n \leq z_{n-1} + z_n, w_{n+1} \leq z_n \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n + w_{n+1} = 1 \\ z_1 + z_2 + \dots + z_{n-1} + z_n = 1 \end{cases} \quad (28)$$

3.3.2 本文约束的线性化处理

对于前文提出的负荷控制用户影响函数，在优化求解时增加其线性化表示的约束，其分点为 $p_{i,t,\min} \leq p_{i,t,\min}^d \leq p_{i,t,\min}^u \leq p_{i,t,\max}^u \leq p_{i,t,\max}$ 。对负荷控制用户影响函数线性化处理方式为

$$p_{i,t} = \sum_{k=1}^5 h_{k,i,t} b_{k,i,t} \quad (29)$$

$$f(p_{i,t}) = \sum_{k=1}^5 h_{k,i,t} f(b_{k,i,t}) \quad (30)$$

连续变量 $h_{k,i,t}$ 和 0-1 变量 $z_{k,i,t}$ 满足关系为

$$\begin{cases} h_{1,i,t} \leq z_{1,i,t}, h_{2,i,t} \leq z_{1,i,t} + z_{2,i,t}, h_{3,i,t} \leq z_{2,i,t} + z_{3,i,t}, h_{4,i,t} \leq z_{3,i,t} + z_{4,i,t}, h_{5,i,t} \leq z_{4,i,t} \\ h_{1,i,t} + h_{2,i,t} + h_{3,i,t} + h_{4,i,t} + h_{5,i,t} = 1 \\ z_{1,i,t} + z_{2,i,t} + z_{3,i,t} + z_{4,i,t} = 1 \end{cases} \quad (31)$$

3.4 负荷反弹率计算

为验证本文方法有效性，提出负荷反弹率指标 λ_p ，该指标反映负荷反弹量占不参与控制时的负荷比例，即

$$\lambda_p = \sum_{i \in N} \frac{l_{i,t}}{w_{i,t}} \times 100\% \quad (32)$$

4 算例分析

4.1 参数设置

本文算例设置 5 个电动汽车集群和 5 个温控负荷集群，每个集群中含有 100 个用户，共计参与负荷控制的用户数量为 1000 个，并且各用户行为具有独立性。

4.1.1 电动汽车参数信息

假设单体电动汽车的额定充电功率为 6.6 kW，电动汽车类型如表 1 所示，出行时段如图 6 所示。

表 1 车辆交通用途分类
Table 1 Classification of vehicle traffic uses

车辆类型	交通用途
HBW(Home-Based-Work)	私家车，主要用于往返交通
HBO(Home-Based-Other)	私家车，主要为退休和待业人员使用
NHB(Non-Home-Based)	非家用车辆，如公司车辆、公共交通等

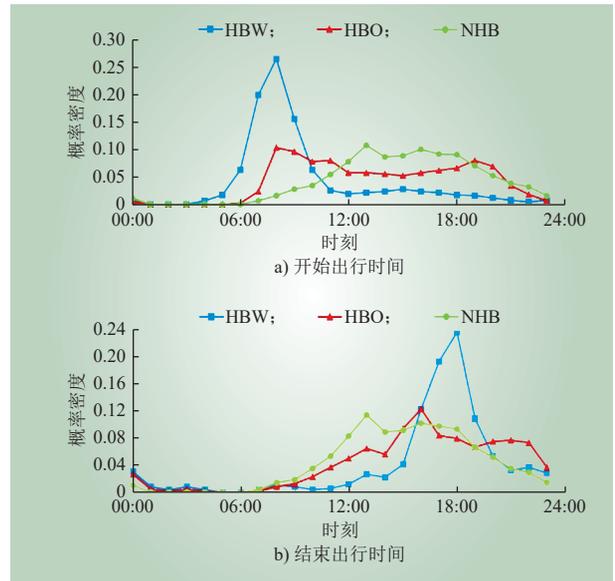


图 6 车辆出行时间概率分布规律
Fig. 6 Probability distribution of vehicle travel time

4.1.2 温控负荷参数信息

以冬季运行场景为例，温控负荷设定为居民采暖设备，额定功率服从 $U(6, 10)$ 的均匀分布。室内舒适温度设定值 θ_{set} 为 21 °C，室内温度舒适度上下边界 δ 为 ± 2 °C。房屋建模方法及参数，如房屋热阻 R 、房屋热容 C 等值参考文献 [25]，并采用蒙特卡罗方法进行随机抽样。温控负荷模型受室外温度和光照强度变化的影响，典型日室外温度和光照强度如图 7 所示。

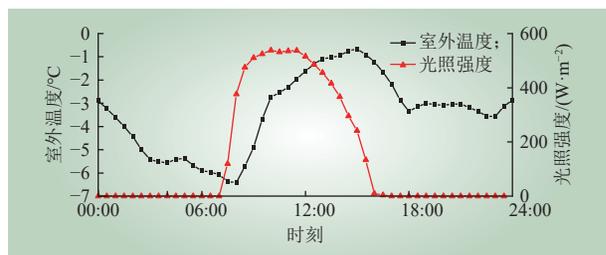


图 7 室外温度和光照强度变化
Fig. 7 Outdoor temperature and irradiation density variation

4.1.3 负荷控制参数

假设在 19:00 和 20:00 发出负荷控制命令，用户集群需要在 19:00 减少总功率 0.24 MW，在 20:00 需要减少总功率 0.224 MW。在 19:00 和 20:00，负荷控制影响函数与负荷反弹函数的参数如表 2 所示。

表 2 负荷控制影响函数与负荷反弹函数参数
Table 2 Parameters of load control influence function and load rebound function

参数	取值
$a_1/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	200
$a_2/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	10
$a_3/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	500
$a_4/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	100
$a_5/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	1000
α	0.6
β	0.3
χ	0.1
φ_1	0.2
φ_2	0.3
φ_3	0.5

4.2 算例结果分析

4.2.1 电动汽车与温控负荷集群协同响应结果分析

负荷控制前后负荷曲线对比如图 8 所示。根据收到的负荷控制命令，19:00 时电动汽车集群与温控负荷集群能够减少的最大功率值分别为 358 kW 和 250 kW，二者可减少的最大功率总和为 608 kW，满足功率下限的约束要求。在全部 10 个负荷集群中，优化求解得到有 5 个电动汽车集群和 3 个温控负荷集群参与负荷控制。20:00 时电动汽车与温控负荷集群能够提供的最大功率值分别为 346 kW 和 279 kW，二者可提供的最大功率总和为 623 kW。由于电动汽车用户在一个调度

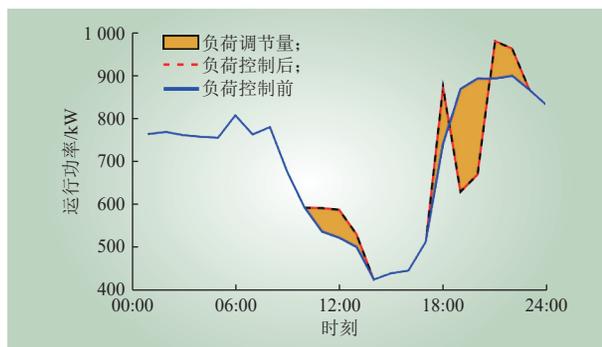


图 8 负荷控制前后负荷曲线对比
Fig. 8 Comparison of load curves before and after load control

日内参与错峰，因此在其他时段负荷出现增长。由于温控负荷参与负荷控制存在负荷反弹现象，因此在 21:00、22:00 和 23:00 出现负荷反弹，负荷反弹率为 38.14%。若不考虑负荷反弹现象，则负荷反弹率达 76.25%，且出现负荷越限的情况，将造成新的负荷缺口并危害系统正常运行。此外相较于采用遗传算法直接求解，采用线性化处理方法后使用商业求解器可有效提升求解速度，计算时间由 65.33 s 下降至 17.25 s。

4.2.2 不同集群参与负荷控制比较

负荷集群按照先错峰后避峰的顺序参与负荷控制，同时满足最少的用户集群参与响应，减小对用户正常用电的影响。负荷集群中全体用户均可参与调节，调节区间大小根据前文计算得到，且集群总体调节容量为各用户调节容量之和。用户在 19:00 的响应容量和实际响应功率比较如图 9 a) 所示。可以看出，电动汽车集群 2、4 实际响应功率达到响应容量上限，集群 3 由于在此时刻虽可提供 53 kW 响应容量，但实际响应量为 1.85 kW。集群 7、8 在该时刻虽然有响应容量，但相较其他集群，其响应容量较小，因此未调用集群 7、8 参与响应。

用户在 20:00 的响应容量和实际响应功率比较如图 9 b) 所示。可以看出，电动汽车集群 1、3 和 5 实际响应功率达到响应容量上限，集群 2、4 由于在 19:00 提供全部响应容量，因此在此时刻实际响应量为 0。与 19:00 类似，集群 7、8 在 20:00 既有响应容量也有响应意愿，但由于 7、8 的响应容量较小，因此未调用集群 7、8 参与响应，在此时刻调用集群 9 和 10 参与负荷控制。

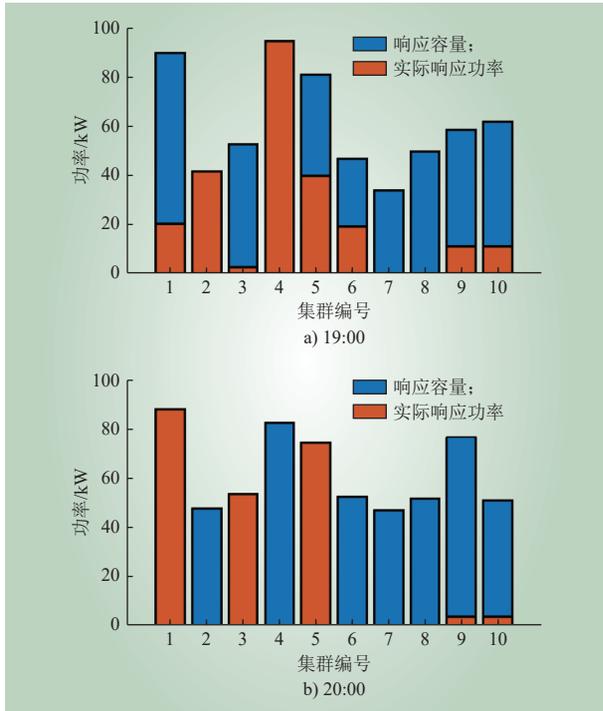


图9 19:00及20:00的响应容量和实际响应功率比较
Fig. 9 Comparison of response capacity and actual response power at 19:00 and 20:00

4.2.3 不考虑负荷反弹现象的负荷控制结果对比

考虑负荷反弹前后的功率曲线对比结果如图10所示。由于考虑负荷反弹，在参与负荷控制后最大功率由1077.15 kW降低到972.05 kW，降低了10.81%，有效减小了因负荷反弹造成的新负荷高峰。虽然在19:00相较于不考虑负荷反弹，负荷增加了6.55%，但并未出现峰上加峰的现象。图11对参与负荷控制时的用户集群进行了对比。相较于图10，不考虑负荷反弹将更大程度调用温控负荷集群，相较于电动汽车集群参与负荷控制后须在其他时段增加用能，温控负荷集群参与负荷控制的方式为削减自身用能，减少了在其他时段对负荷曲线的影响，但由于参与负荷控制后需要恢复正常用能，因此出现了负荷反弹。

4.2.4 电动汽车用户参与错峰负荷控制分析

由于电动汽车集群参与错峰负荷控制，因此在负荷控制时段，为满足负荷缺口，削减的负荷在其余时段需要补足，因此在用户参与响应意愿的基础上对电动汽车充电功率进行规划，电动汽车集群1~5功率如图12所示。对比不同电动汽车集群可以看出，集群1、3和4在参与负荷控制后未出现负荷反弹现象，其在负荷控制阶段所需的

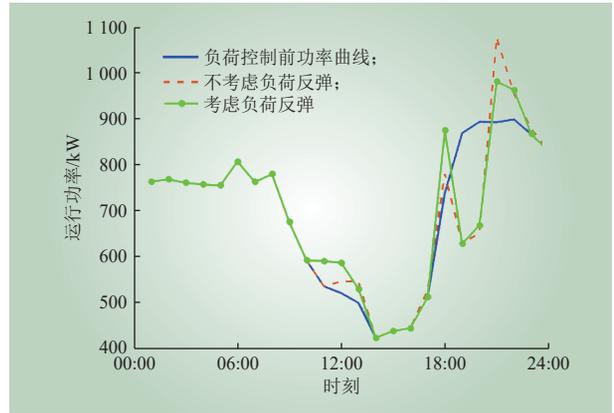


图10 考虑负荷反弹现象前后的负荷曲线对比
Fig. 10 Comparison of load curves before and after considering load rebound phenomenon

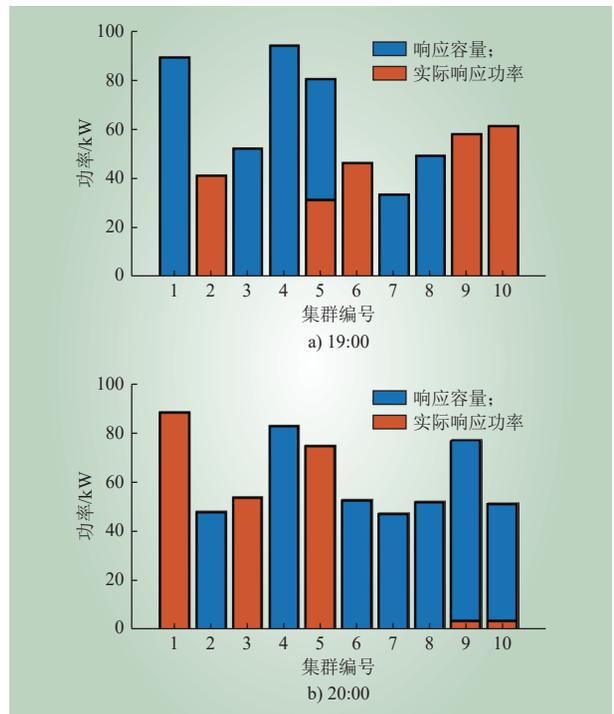


图11 不考虑负荷反弹时19:00及20:00的响应容量和实际响应功率比较
Fig. 11 Comparison of response capacity and actual response power at 19:00 and 20:00 without considering load rebound

充电需求已平移至其余时段。并且平移时段集中在11:00—12:00，其原因在于该时段内原有负荷较低，因此在优化时将增加该时段负荷以降低峰谷差。仅有集群2和5在负荷反弹阶段出现了负荷增加，最大负荷增加比例分别为14.33%和25.76%，其原因在于这2个集群的错峰时段意愿较低，并且为了不出现新的负荷高峰或功率越

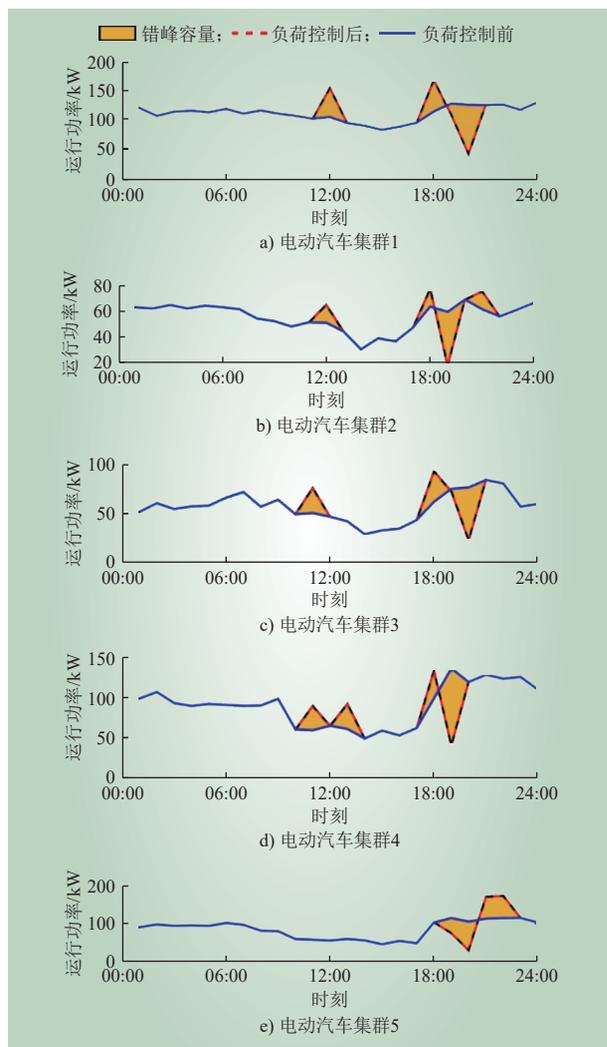


图 12 电动汽车集群参与负荷控制前后功率对比
Fig. 12 Power comparison of electric vehicle clusters before and after participating in load control

限，在其余错峰时段功率较低。

4.2.5 温控负荷用户参与错峰负荷控制分析

一方面温控负荷参与响应将影响用户用能舒适度，另一方面参与负荷控制将导致负荷反弹现象发生。因此在电动汽车集群和温控负荷集群同时参与响应时，5个电动汽车集群全部参与响应，5个温控负荷集群中有3个温控负荷集群参与响应，其中集群6参与负荷控制前后的功率曲线如图13所示。

从图13可以看出，温控负荷集群6仅在19:00参与响应，削减负荷31.22%，在20:00出现负荷反弹现象，最大负荷反弹12.59%，因此相较于电动汽车集群，温控负荷集群参与优先级较低，且分配容量较小。虽然电动汽车集群在不具备错峰

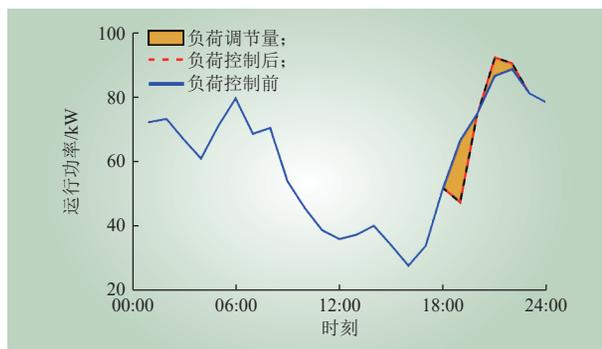


图 13 集群6参与负荷控制前后功率对比

Fig. 13 Power comparison of load clusters 6 before and after participating in load control

需求时同样会出现负荷反弹现象，在本文算例中负荷反弹容量和比例亦高于温控负荷，但由于用户舒适度的影响，过多的调节温控负荷将极大影响用户的用能满意度，因此在相同调节需求下将优先采用电动汽车参与负荷控制。

4.2.6 消融实验验证

为了验证采用电动汽车和温控负荷共同参与负荷控制的效果，对比10个电动汽车集群、10个温控负荷集群以及本文算例中的5个电动汽车集群和5个温控负荷集群，结果如表3所示。

表 3 不同负荷集群负荷控制结果对比

Table 3 Comparison of load control results for different load clusters

单位：元

类型	用户损失	电网损失	负荷反弹损失	成本总计
10个电动汽车集群	42753	3175	51019	35012
10个温控负荷集群	74334	7590	86550	60418
5个温控负荷集群+				
5个电动汽车集群	56276	5487	43106	34454

可以看出，相较于单一用户组成的负荷集群，虽然完全采用电动汽车调控时用户损失和电网损失较低，但由于负荷控制后负荷反弹功率较高，因此采用电动汽车与温控负荷协同调控的总成本较低。

5 结论

本文面向分散式负荷资源调节，考虑以电动汽车和温控负荷集群为代表的分布式资源，对其进行负荷控制，提出了一种考虑电动汽车和温控负荷集群的负荷控制用户组合优化方法。结论如下。

1) 本文提出的考虑负荷反弹的负荷控制用户组合方法可有效减少因参与负荷控制而出现的负荷反弹现象, 负荷反弹率由 76.25% 降低至 38.14%。

2) 考虑到建立的负荷控制影响函数为分段线性函数, 同时负荷组合方法为混合整数规划, 采用线性化处理方法将该优化转化为凸优化函数, 并使用商业求解器有效提升求解速度, 计算时间由 65.33 s 下降至 17.25 s。

3) 算例对不同类型用户参与负荷控制进行了分析。可以看出相较于温控负荷电动汽车电池储能的灵活性, 电动汽车用户在参与负荷控制时的优先选择权更高, 对用户正常用能的影响程度更小。

参考文献:

- [1] 徐韵, 徐耀杰, 杨嘉禹, 等. 基于阶梯碳交易的电转气虚拟电厂低碳经济调度 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(7): 118–128.
XU Yun, XU Yaojie, YANG Jiayu, *et al.* Low carbon economic dispatching for power-to-gas virtual power plant based on stepped carbon trading[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2023, 35(7): 118–128.
- [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, 2023, 43(5): 1663–1672.
- [3] 原希尧, 王关涛, 朱若源, 等. 碳-绿色证书交易机制下考虑回收 P2G 余热和需求响应的 PIES 优化调度 [J]. 电力建设, 2023, 44(3): 25–35.
YUAN Xiyao, WANG Guantao, ZHU Ruoyuan, *et al.* Optimal scheduling of park integrated energy system with P2G waste heat recovery and demand response under carbon-green certificate trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 25–35.
- [4] 章雷其, 谭彩霞, 赵波, 等. 考虑子系统特性的分布式电氢耦合系统多时间尺度优化 [J]. 电力建设, 2023, 44(9): 118–128.
ZHANG Leiqi, TAN Caixia, ZHAO Bo, *et al.* Multi-time-scale operational optimization of a distributed electro-hydrogen coupling system considering subsystem characteristics[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 118–128.
- [5] 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 for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806–2819.
- [6] 胡长斌, 蔡晓钦, 赵鑫宇, 等. 含光热电站及碳交易机制下的电气热多能流耦合系统分层优化运行 [J]. 电力建设, 2024, 45(3): 27–38.
HU Changbin, CAI Xiaoqin, ZHAO Xinyu, *et al.* Optimized operation of electric thermal multi-energy flow coupling system under concentrating solar power plant and carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3): 27–38.
- [7] 赵杰, 王聪, 李冠冠, 等. 考虑需求响应的多微网 P2P 能源交易低碳运行策略 [J]. 电力建设, 2023, 44(12): 54–65.
ZHAO Jie, WANG Cong, LI Guanguan, *et al.* Low-carbon operation strategy for P2P energy trading among multiple microgrids considering demand response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 54–65.
- [8] 宋大为, 尹硕, 何洋, 等. 基于虚拟电厂的多元小微主体参与现货市场的竞价策略 [J]. 南方电网技术, 2021, 15(9): 75–84.
SONG Dawei, YIN Shuo, HE Yang, *et al.* Bidding strategy of multiple small and micro entities participating in the spot market based on virtual power plant[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(9): 75–84.
- [9] 陆婷婷, 高赐威, 苏卫华, 等. 有序用电避峰预案优化编制方法研究 [J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2315–2321.
LU Tingting, GAO Ciwei, SU Weihua, *et al.* Research on drafting of optimal peak averting planning for ordered power utilization[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2315–2321.
- [10] 张粒子, 杨阳. 基于能效标尺竞争与 OaR 的工业负荷管理策略 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 9–14.
ZHANG Lizi, YANG Yang. Industrial load management based on energy efficiency yardstick competition and OaR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 9–14.
- [11] 颜庆国, 童星, 张宁, 等. 考虑用户节电损失的有序用电动态多级时空协调方法 [J]. 电网技术, 2016, 40(2): 425–432.
YAN Qingguo, TONG Xing, ZHANG Ning, *et al.* A dynamic multi-level temporal and spatial coordination method for orderly power utilization based on customer load curtailment cost characteristics[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 425–432.
- [12] 徐青山, 丁一帆, 颜庆国, 等. 大用户负荷调控潜力及价值评估研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6791–6800, 7070.
XU Qingshan, DING Yifan, YAN Qingguo, *et al.* Research on evaluation of scheduling potentials and values on large consumers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6791–6800, 7070.
- [13] 高岩. 基于需求侧管理实时电价优化方法综述 [J]. 上海理工大学

- 学报, 2022, 44(2): 103–111, 121.
- GAO Yan. A review on real-time electricity price optimization methods based on demand side management[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2022, 44(2): 103–111, 121.
- [14] 郑若楠, 李志浩, 唐雅洁, 等. 考虑居民用户参与度不确定性的激励型需求响应模型与评估 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 154–162.
- ZHENG Ruonan, LI Zhihao, TANG Yajie, *et al.* Incentive demand response model and evaluation considering uncertainty of residential customer participation degree[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(8): 154–162.
- [15] 甘海庆, 朱竟, 马璐劫, 等. 考虑产业链的有序用电轮休方案制定策略 [J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(4): 93–98.
- GAN Haiqing, ZHU Jing, MA Jinjie, *et al.* Formulating strategy for orderly electricity rotation scheme considering industrial chain[J]. *Power Demand Side Management*, 2023, 25(4): 93–98.
- [16] 王伊宁, 丁坚勇, 田世明, 等. 基于智能多代理属地管理系统的有序用电模式 [J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1802–1814.
- WANG Yining, DING Jianyong, TIAN Shiming, *et al.* An orderly power utilization mode based on intelligent multi-agent apanage management system[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1802–1814.
- [17] HSU Y Y, SU C C. Dispatch of direct load control using dynamic programming[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1991, 6(3): 1056–1061.
- [18] 陈艺灵, 吕志鹏, 周珊. 基于云边端协同的电动汽车多目标优化调度 [J]. 供用电, 2022, 39(4): 17–24.
- CHEN Yiling, LV Zhipeng, ZHOU Shan. Multi-objective optimal scheduling of electric vehicles based on cloud edge end cooperation[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(4): 17–24.
- [19] 陈文哲, 孙海顺, 徐瑞林, 等. 电动汽车参与调频服务的云边融合分层调控技术研究 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 914–927.
- CHEN Wenzhe, SUN Haishun, XU Ruilin, *et al.* Cloud-edge collaboration based hierarchical dispatch technology for EV participating in frequency regulation service[J]. *proceedings of the CSEE*, 2023, 43(3): 914–927.
- [20] 姜婷玉, 李亚平, 江叶峰, 等. 温控负荷提供电力系统辅助服务的关键技术综述 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 191–207.
- JIANG Tingyu, LI Yaping, JIANG Yefeng, *et al.* Review on key technologies for providing auxiliary services to power system by thermostatically controlled loads[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(11): 191–207.
- [21] 李力, 董蜜, 宋冬然, 等. 分布式的温控负荷集群负荷跟随控制 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8270–8282.
- LI Li, DONG Mi, SONG Dongran, *et al.* Distributed load-following control for thermostatically controlled loads clusters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(21): 8270–8282.
- [22] 石文超, 吕林, 高红均, 等. 考虑需求响应和电动汽车参与的主动配电网经济调度 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 41–51.
- SHI Wenchao, LV Lin, GAO Hongjun, *et al.* Economic dispatch of active distribution network with participation of demand response and electric vehicle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(11): 41–51.
- [23] 徐俊俊, 程奕凌, 张腾飞, 等. 计及充电行为特征与可调性的电动汽车集群优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 23–32.
- XU Junjun, CHENG Yiling, ZHANG Tengfei, *et al.* Optimal scheduling of electric vehicle clusters considering characteristics and adjustability of charging behavior[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(23): 23–32.
- [24] Chen L, Zhu X, Cai J, *et al.* Multi-time scale coordinated optimal dispatch of microgrid cluster based on MAS[J]. *Electric Power Systems Research*, 2019, 177: 105976.
- [25] ZHANG J R, MU Y F, WU Z Q, *et al.* Optimal scheduling method of regenerative electric heating for emergency residential building heating: an affine arithmetic-based model predictive control approach[J]. *IET Energy Systems Integration*, 2023, 5(1): 40–53.



李思维

作者简介:

李思维 (1988), 男, 高级工程师, 从事电力系统需求响应和优化运行与控制研究, E-mail: lisiwei@sgitg.sgcc.com.cn;

许中平 (1973), 男, 高级工程师, 从事电力系统信息通信技术研究, E-mail: xuzhongping@sgitg.sgcc.com.cn;

张喜润 (1981), 男, 通信作者, 中级工程师, 从事电力信息通信和电力负荷管理及优化调控研究, E-mail: xirunzhang@163.com。

(责任编辑 王文诗)

A Load Control User Combinatorial Optimization Method Considering Electric Vehicle and Temperature-Controlled Load Clusters

LI Siwei^{1,2}, XU Zhongping², YU Long², DU Lishi², YUE Liang², ZHANG Xirun², WANG Xiaoming³

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 2. Beijing Fibrlink Communications Co., Ltd., Beijing 100071, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230061, China)

Abstract: As the construction of the new power system continues to deepen, the power system faces such problems as large peak-to-valley difference and high volatility, and the use of user-side resources to participate in load control is one of the important initiatives to solve the above-said problems. In this paper, a load control user combinatorial optimization method considering electric vehicle (EV) and temperature-controlled load clusters is proposed. Firstly, a hierarchical control method is used to aggregate individual EVs and temperature-controlled load clusters, and the aggregated clusters are divided into peak load shifting type and peak load shedding type according to their willingness to participate in load control types, and their respective user load control models are established. Secondly, a three-stage rebound load model is constructed to solve the load rebound problem after peak load shifting users participate in load control. And then, a load control influence function is established with consideration of the influence degree of users participating in load control. Finally, the composition of user groups participating in peak load shifting and shedding and the adjustment amount of user load are optimized with the minimum load control influence, minimum network loss and minimum load fluctuation as multi-objectives. While meeting the demand of load control, the proposed method can effectively inhibit the new peak load caused by the rebound of load after users participating in load control, as a result, realizing the good interaction of supply and demand between distributed load resources and the power system.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (Research on Key Technology and Operation Mechanism of Load Management Cloud for Multi-agent Participation, No.5400-202320223A-1-1-ZN).

Keywords: distributed load resources; temperature control load cluster; load rebound; load control; combinatorial optimization

(上接第 7 页)

Overall Framework and Function Design of Quantified Gaming Method for New Power System Forms

LI Jian, ZHANG Jun, HAN Xinyang, JIN Xiaoling

(State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: The research on the form gaming of new power system is essential for advanced judgment of China's energy and power development, and significant for overall layout of all elements of source-network-load-storage. This paper studies the quantitative gaming method of the new power system forms, proposes an overall framework, and designs its main functions. Firstly, the development logic of new power system is introduced, and the main boosting forces of the new power system form are identified, which include model innovation, technological innovation and mechanism innovation. And the boosting effects of the aforementioned three innovations are analyzed respectively. On this basis, the whole calculation process of the new power system form gaming is put forward, which mainly consists of three parts including boosting force analysis, form analysis and synthetic evaluation. By this calculation, the new power system form gaming and policy mechanism suggestion analysis are achieved. Secondly, the new power system form gaming analysis is detailed according to five elements: power source, transmission network, distribution network, load and energy storage, and the functions of each element form gaming analysis is designed. Finally, the synthetic evaluation function of the new power system form is designed from four dimensions of green, security, economy and people's livelihood. The research results can guide the design and development of modeling tools related to the new power system form analysis, and provide solid support for the quantitative gaming research on the new power systems.

This work is supported by 2023 Experimental Conditions Construction Project of State Grid Energy Research Institute Co., Ltd. (Development of Strategic Simulation and Security Analysis Module for New-Type Power System Laboratory, No.51670023000B).

Keywords: new power system; form gaming; boosting force analysis; source-network-load-storage; synthetic evaluation