

基于激励机制的家庭能量协同优化调度管理策略研究

周江鹏¹,丁贵立^{1,2},刘向向³,康 兵¹,张之荣¹

(1.江西水利电力大学,江西 南昌 330099;2.国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096;
3.国网江西省电力有限公司供电服务管理中心,江西 南昌 330000)

摘 要:针对新能源大规模接入导致电网调峰能力不足与居民用电负荷激增的矛盾,以及分时电价可能引发新峰谷差的问题,文中提出一种基于动态激励机制的家庭能量协同优化调度策略。通过构建户用蓄电池-电动汽车(electric vehicle,EV)协同调度模型,设计兼顾经济成本最小化与用户舒适度最大化的双目标函数,并制定EV充放电优先级自适应控制策略:在光伏出力充裕时优先利用清洁能源为EV充电,负荷高峰时段通过价格型激励机制引导EV与户用蓄电池系统协同放电参与电网调峰。仿真结果表明,相较于传统分时电价策略,所提方案使家庭用电成本降低17%,峰谷差减少9%,用户舒适度维持在0.84以上。研究成果为破解新能源消纳与电网调峰矛盾提供了经济实用的解决方案,助推智能电网背景下家庭能量管理系统的优化升级。

关键词:家庭能量管理系统;激励机制;协同调度;负荷模型;能源优化

中图分类号:TM 73 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)03-0038-05

0 引言

随着新能源大规模接入电网及居民用电设备智能化发展,家庭用电负荷在社会总用电量中的占比持续攀升。分布式光伏、电动汽车(electric vehicle,EV)及储能设备的普及,为需求侧响应提供了丰富的可调节资源,但也对电网的灵活性与稳定性提出了更高要求。家庭能量管理系统(home energy management system, HEMS)作为智能电网的重要组成部分,通过优化家庭能源配置与调度,能够有效平抑峰谷差、降低用户用电成本,并提升新能源消纳能力,已成为当前电力系统研究的热点领域^[1]。

针对HEMS的优化研究,可归纳为以下几类:其一,基于分时电价的调度策略。文献[2]提出了一种优化调度策略用于家庭能量管理系统,其依据分时电价原理并通过对蓄电池进行实时控制来实现,但没有考虑用户的舒适度;文献[3]提出以分时电价为基础,综合考虑用户满意度及用电费用的多家用电器优化调度模型,并通过改进遗传算法加以实现;文献[4]针对家庭用电负

荷实施分类建模操作,并依据分时电价构建相应的优化决策模型,给出负荷优化运行方案。上述文献以分时电价为基础,通过调整负荷运行时段实现经济性优化,但此类方法往往忽略用户舒适度约束,且分时电价可能因用户集中响应导致新的峰谷差问题。其二,多目标优化方法。文献[5]构建基于非侵入式负荷监测算法的家庭智慧用能多目标优化模型,运用粒子群算法求解,在降低用电成本的同时保障了舒适度;文献[6]提出一种基于改进多目标粒子群算法的家庭负荷优化调度策略,旨在提升电力需求侧响应能力,降低用户成本和电网峰谷差;文献[7]采用多目标优化模型与粒子群算法实现家庭负荷优化调度;文献[8]构建了多目标家庭用电优化调度模型,结合改进算法求解,经算例验证其有效性与优越性,为双碳目标下家庭用电优化提供策略;文献[9-10]考虑到电动汽车放电会影响电池的健康状态,显著缩短电动汽车电池的寿命,故将电动汽车当作一般的柔性负荷来处理。上述文献研究多聚焦于传统家电负荷,未充分挖掘电动汽车充放电特性对系统灵活性的提升潜力。其三,用户行为与心理建模。文献[11]提出多层次调控架构需求响应优化策略,通过层级协作与跨区聚

收稿日期:2025-01-14

基金项目:江西省重点研发计划项目(基于多参量全频段精准感知与多模态分析的变配电设备主动健康技术研究与应用,20243BBG71031)。

作者简介:周江鹏(1997),男,硕士研究生,主要研究方向为电力需求响应。

合提高需求侧资源灵活度,在保证用户满意度的同时最大化负荷聚合商收益;文献[12]提出考虑用户心理的居民社区负荷聚合商优化调度方法,通过建模用户心理及需求响应潜力,实现负荷聚合商收益最大化;文献[13]提出一种智能家电控制策略,考虑到用户行为的不确定性,经由建立家电负荷模型、量化用户舒适度违反比例、制订实时关断机制以及设计三步控制步骤,利用仿真验证了其有效性。上述文献通过量化用户行为不确定性及心理偏好,设计动态响应策略,但其模型复杂度较高,且缺乏对储能与EV协同调度的系统性分析。其四,单一设备调度研究。文献[14-16]针对空调、热水器等单一设备提出优化方案,虽提升了局部效率,但难以推广至家庭多能耦合场景。

尽管上述研究取得了一定进展,仍存在以下不足:1) 现有策略多依赖分时电价机制,易引发用户行为趋同,加剧电网峰谷波动;2) 电动汽车作为可移动储能资源,其充放电特性与户用蓄电池的协同潜力未被充分挖掘,且频繁充放电可能缩短电池寿命;3) 现有优化模型在平衡经济性、用户舒适度与电网稳定性时,缺乏有效的激励机制设计,难以实现多方利益协同。

因此,本研究旨在结合激励机制与电动汽车及户用蓄电池的协同调度,提出一种新型家庭能源管理优化策略。通过引入激励机制引导用户合理用电,降低电网峰谷差,增强电网稳定性;利用电动汽车充放电特性与户用蓄电池协同调度,优化家庭能源配置,提高能源利用效率;有助于推动家庭能源管理系统的智能化和精细化发展,为智能电网建设运营提供理论与实践指导。

1 HEMS 组件模型

家庭能源管理系统主要由大电网、光伏发电系统、智能电表、智能控制中心、储能系统、家庭用电负荷等组成。

1.1 光伏出力模型

光伏系统的发电功率因受光伏板温度、日照强度等的影响,导致发电功率不稳定,其发电功率的数学模型表达式如下:

$$P_{pv}(t) = P_{pv}^{hist}(t) [1 + E_p R_p] \quad (1)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 是光伏发电功率; $P_{pv}^{hist}(t)$ 是日前的历史发电数据; E_p 光伏出力预测的不确定界限值,选定

8%; R_p 是正态分布的随机值。

1.2 负荷模型

依据家庭用电负荷特性的不同,将负荷分为三类:刚性负荷、柔性负荷、温控负荷。

1.2.1 刚性负荷

刚性负荷指照明灯、电视机等基本生活负荷,这类负荷的功率和运行时间不受外部因素的影响。因此,不参与家庭能源管理系统的调度,直接计入总体能耗。

1.2.2 柔性负荷

基于家庭中各类家用电器的运行特性,文中把柔性负荷归纳为两种主要类型,即可中断负荷以及不可中断负荷。可中断负荷所指的是在设定的运行时段内,能够依据需求自由地进行启动和停止操作,并且要确保达成既定的用电时长规定的负荷;而不可中断负荷,是在其准许的工作时段内,一旦开始运行就一定要持续不断地工作,不准许随意中断的负荷。

不可中断负荷:指那些在启动后需要持续运行直至完成其任务的电力负荷,其工作模型为:

$$\begin{cases} \alpha_a \leq t_a^{start} \leq t \leq t_a^{end} \leq \beta_a; t_a^{end} - t_a^{start} + 1 = d_a \\ P_a = P_a^N \times S_a(t) \\ \beta_a - \alpha_a \geq d_a \\ S_a(t) = 1, t \in [t_a^{start}, t_a^{end}]; S_a(t) = 0, t \notin [t_a^{start}, t_a^{end}] \end{cases} \quad (2)$$

式中: α_a, β_a 为不可中断负荷允许运行的开始结束时间; t_a^{start}, t_a^{end} 为不可中断负荷实际运行的开始结束时间; $S_a(t)$ 为0/1变量,1是运行,0是不运行; d_a 为工作时长; P_a 为负荷的额定功率。

可中断负荷:在允许的工作时间段内可以灵活控制其开启和暂停的电力负荷,其工作模型为:

$$\begin{cases} \alpha_b \leq t \leq \beta_b; \alpha_b - \beta_b \geq d_b \\ P_b = P_b^N \times S_b(t) \\ \sum_{t=\alpha_b}^{\beta_b} S_b(t) = d_b \\ S_b(t) = \{0, 1\}, t \in [\alpha_b, \beta_b]; S_b(t) = 0, t \notin [\alpha_b, \beta_b] \end{cases} \quad (3)$$

式中: α_b, β_b 为可中断负荷允许运行的开始结束时间; $S_b(t)$ 为0/1变量,1是运行,0是不运行; d_b 为工作时长; P_b 为负荷的额定功率。

1.2.3 温控负荷

温控负荷是那些通过调节温度和能源消耗来满足不同时间和需求下的热量或冷量需求的设备,以空调为典型代表。在本研究中,居民的舒适度是通过室

内温度来衡量的,因此必须满足以下约束条件:

$$T_{\min} \leq T_m \leq T_{\max} \quad (4)$$

式中: $T_{\min}$ 为允许的室内最低温; $T_{\max}$ 为室内允许的最高温; T_m 为室温。

受户外温度变化的影响,一般不能像洗衣机等负荷那样直接设定工作区间。因此空调的模型如下:

$$\begin{cases} T_{\text{in}}(t+1) = (1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC}}) [T_{\text{out}}(t) - R \cdot P_c \cdot S_c(T) \cdot \Delta t] + e^{-\frac{\Delta t}{RC}} \cdot T_{\text{in}}(t) \\ t_c = \sum_{t=\theta_c}^{\beta_c} S_c(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_{out} 为室外温度; R 为等值热电阻; C 为等值热电容; P_c 为空调额定功率; S_c 为空调运行状态; t_c 为工作时长。

1.3 户用蓄电池模型

户用蓄电池(battery energy storage system, BESS)利用充放电参与家庭能量管理。文中采用荷电状态(state of charge, SOC)来描述户用蓄电池的剩余电量,其表达式如下:

$$A_{\text{SOC}_B}(t+1) = \begin{cases} A_{\text{SOC}_B}(t) + \frac{P_{\text{ch}}(t) \cdot \Delta t \cdot \eta_{\text{ch}}}{C_{\text{bat}}} \\ A_{\text{SOC}_B}(t) - \frac{P_{\text{dish}}(t) \cdot \Delta t}{C_{\text{bat}} \cdot \eta_{\text{dish}}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $A_{\text{SOC}_B}(t)$ 为户用蓄电池的 t 时刻荷电状态; $P_{\text{ch}}(t)$ 为充电功率; $P_{\text{dish}}(t)$ 为放电功率; η_{ch} 充电效率; η_{dish} 为放电效率; C_{bat} 为额定容量。

为了降低户用蓄电池的充放电损耗,增加电池寿命,应合理限制户用蓄电池的 SOC、充放电功率。限制条件如下:

$$\begin{cases} A_{\text{SOC}_{B,\min}} \leq A_{\text{SOC}_B} \leq A_{\text{SOC}_{B,\max}} \\ 0 \leq P_{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{ch},\max} \\ 0 \leq P_{\text{dish}}(t) \leq P_{\text{dish},\max} \\ P_{\text{ch}}(t) \cdot P_{\text{dish}}(t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $A_{\text{SOC}_{B,\max}}$, $A_{\text{SOC}_{B,\min}}$ 分别为户用蓄电池 SOC 的上限值与下限值; $P_{\text{ch},\max}$, $P_{\text{dish},\max}$ 分别为充放电最大功率。

1.4 EV 动力电池模型

EV 动力电池可被视为行走的储能设备,但与户用蓄电池有差异。其一, EV 并网时需充分考虑其接入与离网的时间约束;其二, 鉴于电池寿命因素,应着力削减 EV 的充放电循环频次,以延长其使用寿命;其三, EV 离网运行时,必须确保其 SOC 满足用户设定的最低值,以保障车辆的续航里程需求。基于此,在户用蓄电池模型的基础上,进一步引入如下约束条件:

$$\begin{cases} P_{\text{EV}} = 0, t \notin [\alpha_{\text{EV}}, \beta_{\text{EV}}] \\ \min \sum_{t=1}^H |P_{\text{EV}}(t)| \\ A_{\text{SOC}_{\text{EV}}}(t) \geq A_{\text{SOC}_{\text{EV},\text{end}}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: α_{EV} , β_{EV} 分别为 EV 运行区间的起止时刻; $A_{\text{SOC}_{\text{EV}}}(t)$ 为 EV 在 t 时刻的荷电状态; $P_{\text{EV}}(t)$ 为 t 时刻的功率; $A_{\text{SOC}_{\text{EV},\text{end}}}$ 表示用户期望的最优荷电状态值。

2 家庭能量管理系统用电优化策略

2.1 调峰激励机制

以负荷侧参与电网调峰的影响为依据,本研究力求实现削峰填谷,特此提出具有针对性的激励机制,该机制着重于对电网峰谷差施加积极影响,其模型如下:

$$F_t = \lambda (P_{\text{net},t} - \bar{P}_{\text{net}})^2 \quad (9)$$

式中: F_t 表示用户在第 t 个时刻获得的激励费用; $P_{\text{net},t}$ 是用户在第 t 个时刻的净负荷; λ 是电网公司的激励费用单价; $\bar{P}_{\text{net}}$ 表示平均净负荷。用户越积极参与电网的负荷调峰响应,越能获得更高的收益,相应的电网负荷波动就越小。

2.2 目标函数

优化目标一:增加激励收益后的经济成本最小。目标函数为:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{buy}} - C_{\text{sell}} + C_{\text{incentive}} \quad (10)$$

$$C_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{grid},t} \cdot g_{\text{buy},t} \quad (11)$$

$$C_{\text{sell}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{sell},t} \cdot g_{\text{sell},t} \quad (12)$$

$$C_{\text{incentive}} = \sum_{t=1}^T F_t \quad (13)$$

式中: C_{total} 为实际总费用; C_{buy} 为购电总费用; $P_{\text{grid},t}$ 为 t 时刻的购电功率; $g_{\text{buy},t}$ 为 t 时刻购电单价; $P_{\text{sell},t}$ 为 t 时刻卖给电网的功率; $g_{\text{sell},t}$ 为 t 时刻卖电单价; $C_{\text{incentive}}$ 为总的激励收益。

优化目标二:用户舒适度最大化。文中以居民用电设备使用习惯和室内人体温度感知度为舒适度衡量标准。

$$H_{\text{comfort}} = \sum_{i=1}^x \frac{|t_{i,\text{actual}} - t_{i,\text{desired}}|}{T_{i,\text{allowed}}} \quad (14)$$

式中: H_{comfort} 为舒适度指标; $t_{i,\text{actual}}$ 为设备现实启动时刻; $t_{i,\text{desired}}$ 为用户期望使用时刻; $T_{i,\text{allowed}}$ 设备运行时长;

X指总的设备数量。

2.3 控制策略

为增强 HEMS 优化调度策略的灵活性,保障户用蓄电池和 EV 电池安全运行,本研究设计了两种模式的控制策略。

策略一:当EV连接到家庭能量管理系统时,无论光伏发电量和负载功率的大小如何,EV都被视为一个仅消耗电能的柔性负载,如图1所示,具体操作如下:

当光伏系统的发电量充足时,多余的电能将用于为用户用蓄电池充电;如果户用蓄电池已充满电,则剩余的电能将被出售给电网。

如果光伏发电量不足以满足家庭负载需求,并且当时正值电价高峰期,那么户用蓄电池将优先为家庭负载供电,以提高能源使用的经济效益。

在非高峰电价时段或户用蓄电池电量不足的情况下,家庭的电力需求将由电网来满足。

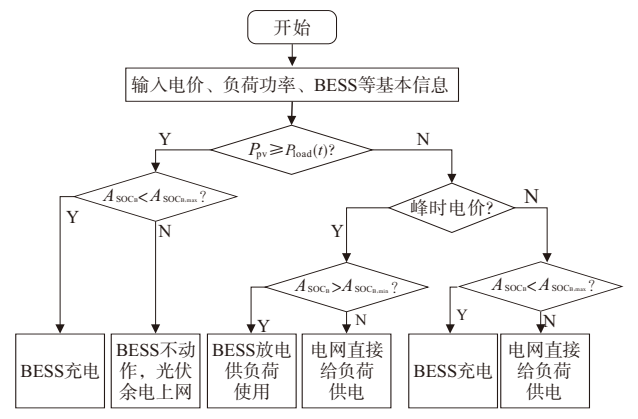


图1 家庭负荷优化调度策略一

策略二:当电动汽车(EV)连接到家庭能量管理系统时,其操作模式会根据光伏发电量与负载总功率的对比结果进行调整,如图2所示。

如果光伏发电总量等于或超过负载的总功率需求,EV将仅作为充电负载,不进行放电,此时采用与策略一相同的操作方式。

若光伏发电总量不足以满足负载需求,则利用EV的充放电能力,使其与家中的户用蓄电池协同工作,以优化能源使用并提高经济效益。在这种情况下,相较于策略一,EV在光伏有多余发电时会获得充电优先权;当光伏发电不足时,EV动力电池在户用蓄电池之后放电,并且当EV动力电池的SOC到达用户的设定值后将停止放电,以保障用户的行驶里程,并减少电池的充放电循环次数。

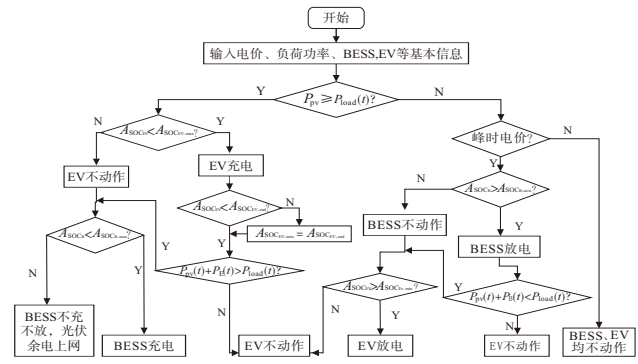


图2 家庭负荷优化调度策略二

3 仿真及结果分析

3.1 参数设置

以某家庭一天的夏季实际使用数据为例,将其划分为48个时段,即 $\Delta t=0.5\text{ h}$ 。户用蓄电池 W_B 和汽车 W_{EV} 的额定容量都是60 kWh,充放电效率相同均为0.9, $P_{ch}(t)=2\text{ kW}$, $P_{dis}=1.8\text{ kW}$,蓄电池最小和最大SOC分别为0.1和0.95,电动汽车最小和最大SOC为0.3和0.9,蓄电池开始SOC为0.5, $\alpha=0.05$ 。室内温度允许的范围是 $23^{\circ}\text{C}\sim 26^{\circ}\text{C}$ 。向电网卖电价格为0.42元/kWh,从电网购电采用分时电价,谷时电价为0.3元/kWh(00:00-06:00,22:00-24:00),平时电价为0.45元/kWh(13:00-17:00),峰时电价为0.9元/kWh(06:00-13:00,17:00-22:00)。可调负荷参数如表1所示,光伏出力与刚性负荷如图3所示。

表1 可调度负荷参数

设备名	功率/kW	运行区间	最优运行时间	运行时长/h	最低运行时长/h
电饭煲	0.80	10:00-12:00	11:00	1	1
洗衣机	0.40	17:30-20:00	18:00	1	1
洗碗机	0.73	19:00-23:00	20:00	1	1
饮水机	0.30	07:00-08:30	7:30	0.5	0.5
扫地机	0.35	11:00-12:30	12:00	0.5	0.5
消毒柜	0.50	19:00-20:30	20:00	0.5	0.5
空调	2.10	06:00-09:00	7:00	1	0.5
热水器	2.20	18:00-24:00	20:00	2	0.5

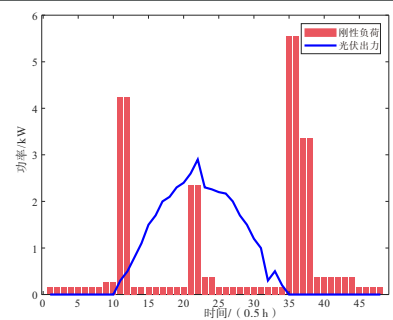


图3 光伏出力与刚性负荷

3.2 结果分析

为了验证所提策略的有效性,设置三种不同的场景进行仿真:场景一为策略一模式,且未加入激励;场景二为策略二模式,且未加入激励机制;场景三为策略一和策略二共同作用,且加入激励机制,如表2所示。

表2 3种场景特性对比

场景	用电费用/元	激励费用/元	舒适度	峰谷差/kW
一	12.39	0	0.95	9.425
二	11.40	0	0.89	8.976
三	10.28	1.54	0.84	8.578

通过对比发现,在场景一下,家庭用电成本和峰谷差相对较大,但用户舒适度最高。场景二与场景一对比,在协调电动汽车与户用蓄电池相互配合的情况下,用电成本显著降低,峰谷差也得到有效改善。具体而言,家庭用电成本降低了7.9%,峰谷差降低4.8%。场景三与场景一对比,在加入激励机制并协调电动汽车与户用蓄电池配合的情况下,家庭用电成本降低了17%,峰谷差降低了9%。尽管用户舒适度略有下降,但所提策略在降低家庭用电成本和峰谷差方面效果显著。

负荷功率仿真数据曲线如图4所示,在电力需求较低且电价处于非峰时电价时,增加激励措施并不能很好的缩小峰谷差。然而,在电价处于峰时电价并且电力需求较大时,增加激励措施能够有效的降低峰谷差,实现削峰填谷。例如,每天的05:00-07:00和17:30-23:00这些电力负荷高峰时段,通过应用该激励策略,成功减小了峰谷差距,峰谷差率降低9%。这一举措有效缓解了电网的供电紧张状况,对增强电力系统的稳定性和可靠性具有积极意义。

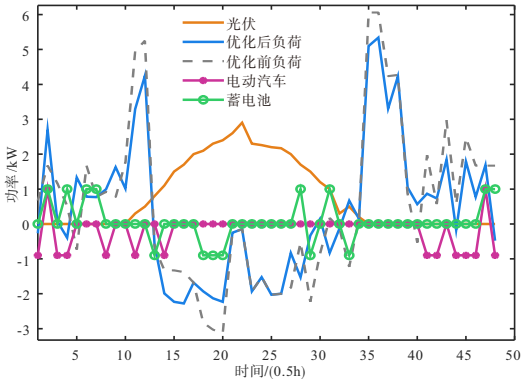


图4 负荷功率仿真数据曲线

4 结语

文中提出了一种优化家庭能源使用的策略,该策

略结合了激励措施和电动汽车及户用蓄电池的协同调控,通过建立合适的模型、设定具体优化目标、设计控制方法和求解算法,在降低家庭电费、提高用电舒适度以及电网需求响应与新能源消纳等方面取得了一定效果,为改进家庭能源管理提供了有益参考。

参考文献:

[1] 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.

[2] 伍惠敏,王淳,左远龙,等.基于分时电价和蓄电池实时控制策略的家庭能量系统优化[J].电力系统保护与控制,2019,47(19):23-30.

[3] 黄飞,李永福,高杨,等.基于改进遗传算法的家庭用电调度优化方法[J].计算机科学,2024,51(增刊1):1169-1174.

[4] 王珑,王进,龚晓琴,等.基于用户满意度的家庭能量管理系统协调优化调度[J].电力学报,2019,34(2):101-108,174.

[5] 丁迅,张忠,夏兆俊,等.基于非侵入式负荷监测的家庭智慧用能管理研究[J].现代电力,2022,39(4):496-505.

[6] 张丽,刘青雷,艾恒涛,等.基于需求响应的家庭负荷优化调度算法研究[J].太阳能学报,2024,45(9):131-139.

[7] 李菁,王志新,严胜,等.计及舒适度的家庭能量管理系统优化控制策略[J].太阳能学报,2020,41(10):51-58.

[8] 王锋,宋惠宇,张欣欣.基于双碳目标的家庭错峰用电调度策略研究[J].电测与仪表,2024,61(12):212-218.

[9] 张甜,赵奇,陈中,等.基于深度强化学习的家庭能量管理分层优化策略[J].电力系统自动化,2021,45(21):149-158.

[10] 王一清,苏岭东,顾捷,等.计及电动汽车充电需求的城市配电网多场景低碳化调度研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(7):32-44.

[11] 祁兵,陈淑娇,李彬,等.计及用户满意度的可调节负荷资源需求响应优化策略研究[J].内蒙古电力技术,2023,41(3):43-50.

[12] 谢郑溶利,林顺富,沈运帷,等.考虑用户心理的居民社区负荷聚合商优化调度[J].上海电力大学学报,2024,40(2):161-168.

[13] 孙毅,裴俊亦,景栋盛.考虑用户行为不确定性的智能家电控制策略[J].电力系统保护与控制,2018,46(17):109-117.

[14] 曾博,蒋雯倩,杨舟,等.基于机会约束规划的家庭用电设备负荷优化调度方法[J].电力自动化设备,2018,38(9):27-33.

[15] 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.

[16] 杨德玲,林泽宏,赖伟坚,等.虚拟电厂背景下的空调负荷控制策略[J].电力需求侧管理,2020,22(1):48-51,85.