

考虑多重因素的空调虚拟储能响应潜力评估与分层优先排序控制策略

黄如玉, 程若发, 吕翔龙
(南昌航空大学信息工程学院, 南昌 330000)

摘要: 随着社会发展, 空调负荷已成为需求响应中不可或缺的资源, 对空调的合理调控可缓解电力资源紧张的局面。为此提出一种考虑多重因素的空调控制策略。首先, 基于变频空调的电热参数模型, 结合用户满意度、热舒适度和负荷可控度等多个因素, 建立空调负荷集群的响应潜力评估模型。其次, 引入微元法分解电网调度的需求响应时长, 结合虚拟储能的思想提出微元虚拟储能优先排序策略(priority sorting of micro element virtual energy storage, PSME-VESS)。最后, 构建考虑多重因素的两阶段空调负荷优先排序调控模型。算例仿真结果表明, 所提出的控制策略能够切合跟踪电网调度的需求, 提高用户意愿度的同时减少用户的受控制频率, 在满足电力系统的功率需求下有效提升用户参与需求响应的满意度。

关键词: 空调负荷; 需求响应潜力; 虚拟储能; 优先排序策略; 多因素

Assessment of Virtual Energy Storage Response Potential and Hierarchical Prioritization Control Strategy for Air Conditioners Considering Multiple Factors

HUANG Ruyu, CHENG Ruofa, LÜ Xianglong

(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330000, China)

Abstract: With the development of society, air conditioning load becomes an indispensable resource in demand response, and reasonable regulation and control of air conditioning can alleviate the shortage of power resources. Therefore, an air conditioning control strategy is proposed considering multiple factors. Firstly, based on the electric heating parameter model of inverter air conditioner, combined with multiple factors such as user satisfaction, thermal comfort and load controllability, the response potential evaluation model of air conditioning load cluster is established. Secondly, the micro-element method is introduced to decompose the demand response time of grid dispatching, and the micro-element virtual energy storage prioritization strategy is proposed based on the idea of virtual energy storage. Finally, a two-stage air conditioning load prioritization control model considering multiple factors is constructed. The simulation results show that the control strategy proposed in this paper can meet the needs of tracking power grid dispatching, improve the user's willingness and reduce the user's controlled frequency. In this way, under the condition of meeting the power demand of the power system, the satisfaction of users in participating in demand response can be effectively improved.

Key words: air conditioning load; demand response potential; virtual energy storage; prioritization strategy; multi-factor

0 引言

近年来, 随着电力技术行业的蓬勃发展及国民

经济水平不断提高, 各行业用电负荷持续增长。其中伴随空调普及率的上升, 空调负荷的增加极为显著。根据数据显示, 上海、江苏、浙江等经济发达地区空调负荷峰荷占比甚至超过50%, 并呈现逐年上升趋势^[1-2]。同时新能源的大规模并网, 导致电网调峰问题持续加剧, 给电力系统的稳定运行带来了巨大挑战。为此, 国家相继发布一系列文件, 倡导积极开展电网需求响应, 挖掘柔性负荷需求侧

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52367011); 江西省自然科学基金资助项目(20232ACB204023)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52367011); the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20232ACB204023)。

资源,缓解电源侧和电网侧的运行压力^[3-4]。因此,采取高效合理的手段调控空调负荷参与需求响应,将有效提升电网的稳定性,为解决大规模新能源接入导致的电力系统波动问题提供一种新手段^[5]。

目前,针对柔性负荷参与需求响应的研究主要有潜力评估、调度和控制等方面。在潜力评估方面,文献[6]提出基于数据驱动和深度置信网络的空调负荷参与光伏消纳的潜力评估模型,可实时输出温控负荷集群的可调节潜力。文献[7]从13个指标构建DR潜力评估指标体系,对用户的需求响应能力进行分级。文献[8]提出基于高斯过程回归方法的工业用户需求响应潜力评估方法。在调度方面,文献[9]为了实时利用空调负荷集群的潜力,建立数据驱动下的空调负荷潜力评估模型与源荷侧互动协同调度模型。文献[10]在考虑用户舒适度基础上,针对用户空调负荷温度进行控制的日前调度双层优化模型。在控制策略方面,文献[11]首先构建考虑多重因素的空调调控潜力评估模型,然后基于聚合响应潜力建立了双层调控框架。文章较全面的考虑了各种因素的影响,但在后续的双层调控框架并未对多重因素进行深入分析。文献[12]在文献[11]的基础上提出改进的状态队列模型来描述定频空调运行状态的变化。改进的队列状态模型能很好的将定频空调的进行控制,但不适用于变频空调占比大的用户场景。文献[13]提出考虑控制时长影响需求响应潜力的评估的基础上,构建考虑多重轮换调控的空调控制策略,对于需求响应的情况分析细致但缺少对于轮换调控中的具体策略的制定。综上所述,在大规模空调负荷调控研究领域,国内外学者展开了深入研究,但相关研究多以定频空调负荷为主,且需求响应潜力评估模型中的考虑因素较为单一。

随着变频空调的市场占有率从2014年的57.9%逐步上升至2019年的77.3%^[14],在家用空调中的占比已超过定频空调,成为主流^[15]。且变频与定频空调在运行模式上存在明显不同,现有的研究难以直接应用于变频空调占比较高的场景。针对上述问题,本文提出了针对变频空调的考虑多重因素作用下的变频空调响应潜力评估与控制模型。首先,通过结合变频空调的电热特性、用户满意度、热舒适度和负荷可控度等因素,构建空调负荷集群响应潜力评估模型。其次,基于空调负荷视为虚拟

储能的思想^[16],制定了分层优先排序控制策略。再次,基于满足电网调度需求为前提条件,引入微元法获取最小可控制时长,并以最大化用户意愿和最小化用户受控频率为目标,构建考虑多重因素的空调负荷微元虚拟储能优先排序控制策略(priority sorting of micro element virtual energy storage, PSME-VESS)。最后,根据对算例仿真结果分析,验证了本文所提策略在提升用户意愿度与减少受控频率方面的有效性。

1 空调负荷模型

1.1 空调等效热参数模型

本文采用一阶等效热参数(equivalent thermal parameter, ETP)模型来描述空调负荷的运行特性。模型中时间段 $[t, t+1]$ 里房间温度变化表达式,如式(1)所示:

$$\theta_{in,t} = \theta_{out,t+1} - \eta P_t R - [\theta_{out,t} - \eta P_t R - \theta_{in,t}] e^{\frac{-\Delta t}{RC}} \quad (1)$$

式中: R 为等效热容; C 为房间的等效热阻; $\theta_{in,t}$ 和 $\theta_{out,t}$ 分别为 t 时刻的室内温度和室外温度; P_t 为 t 时刻空调系统的运行功率; η 为时间时刻的空调能效比。

1.2 变频空调电参数模型

变频空调可通过变频器调节压缩机转速,实现对室温的精准控制。因此变频空调在温度维护阶段的有功功耗仅为定频空调的30%左右^[17]。压缩机转速和温度差值的关系表示为:

$$\theta_c = \theta_{in} - \theta_{set} \quad (2)$$

$$f(t+1) = \begin{cases} f_{min}, \theta_c < N_{min} \\ f(t) + K \cdot \theta_c, N_{min} < \theta_c < N_{max} \\ f_{max}, \theta_c > N_{max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_c 为室温与空调设定温度的差值; θ_{set} 为空调设定温度; $f(t)$ 为变频空调 t 时刻的压缩机转速; f_{min} 和 f_{max} 分别为空调压缩机的最小最大转速; N_{min} 和 N_{max} 分别为室内温度与空调设定温度的温差最小值和最大值; K 为常数。

压缩机运行电功率、制冷量以及能效比与频率变化之间的拟合函数表达式如下。

$$P_t = a \cdot f(t) + b \quad (4)$$

$$Q(t) = c \cdot f(t)^2 + d \cdot f(t) + e \quad (5)$$

式中: $Q(t)$ 为空调压缩机 t 时刻的制冷量; a 、 b 、 c 、 d 、 e 均为函数常系数。

1.3 变频空调集群功率聚合模型

大规模空调负荷的聚合功率对于最大化利用空调负荷资源有重要意义。因此,本文采取目前广泛应用的蒙特卡洛聚合法对数量庞大且分散的空调负荷进行聚合^[9]。假设当前空调集群共有 N 台变频空调,每台空调的运行功率为 $P_{t,i}$,得到的空调集群聚合功率 $P_{t,\text{total}}$ 为:

$$P_{t,\text{total}} = \sum_{i=1}^N P_{t,i} \quad (6)$$

2 考虑多重因素的空调负荷需求响应潜力评估模型

用户意愿度表示用户参与需求响应的主动程度,主要受教育水平和家庭收入、用户年龄等因素影响^[12, 15, 18-20]。针对以上用户特征考虑用户对于电价的敏感度从而得到用户意愿度,再结合用户负荷可控度建立需求响应潜力评估模型。定量分析变频空调所能达到的最大需求响应潜力。分析流程如图 1 所示。

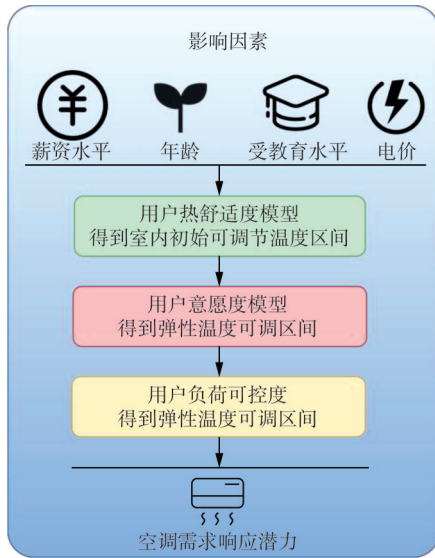


图 1 变频空调响应潜力分析流程

Fig. 1 Analysis process of inverter air conditioner response potential

2.1 用户热舒适度

本文采用 Fanger 热舒适度方程对用户热舒适度进行量化,模型使用 PMV 指标评估用户热舒适度,PMV 值越小代表用户舒适度越高。在外部条件为最佳水平时得到 PMV 值(记为 I_{PMV})与温度 θ 的关系^[21]为:

$$I_{\text{PMV}} = \begin{cases} 0.390(\theta - 26), & \theta \geq 26 \\ 0.407(-\theta + 26), & \theta < 26 \end{cases} \quad (7)$$

ISO7730 给定 PMV 的取值在 -0.5 和 0.5 之间^[22]时用户处于最佳舒适度状态,相应室内温度为 24.8~27.3 °C,即为初始温度可调节裕度。

2.2 用户意愿度

用户意愿度表示用户参与需求响应的意愿,其主要与用户期望电价有关。当实际电价低于预期电价时,用户对电价的敏感度较低,从而倾向缩小温度可调区间,保证用户舒适度。反之,用户则倾向于减少舒适度需求,以参与需求响应降低用电成本。

同时,用户的受教育水平、薪资水平和平均年龄等因素也存在一定的影响。资料显示,大专及以上学历和高收入水平用户拥有高的需求响应积极性^[19]。而高学历用户和年轻用户更愿意接受新事物,参与需求响应的积极性越高;用户的薪资水平则会直接影响用户对电价的敏感度。从而影响用户参与需求响应的意愿。

上述因素的影响系数与响应系数 $\mu^{i,t}$ ^[12] 的关系如下。

$$\mu^{i,t} = \phi(e^{\frac{p_{\text{real}}}{p_{\text{base}}} - 1} - e^{\frac{p_{\text{base}}}{p_{\text{max}}} - 1}) \quad (8)$$

$$\phi = \frac{\phi_e \phi_i \phi_a}{\max(\phi_e, \phi_i, \phi_a)} \quad (9)$$

$$\phi_e = \begin{cases} a_1, & 0 < E < \lambda_1 \\ a_2, & \lambda_1 < E < \lambda_2 \\ a_3, & \lambda_2 < E < \lambda_3 \end{cases} \quad (10)$$

$$\phi_i = \begin{cases} e^{-I}, & 0 < I < \lambda_4 \\ e^{-\lambda_4}, & I \geq \lambda_4 \end{cases} \quad (11)$$

$$\phi_a = K \cdot e^{-\frac{(A - \lambda_6)^2}{2}} \quad (12)$$

式中:用户意愿度影响因子 $\mu^{i,t}$ 为 t 时刻第 i 个空调终端用户参与需求响应的综合意愿程度; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为用户受教育水平的 3 种阶段; λ_4 为用户意愿受薪资水平的影响的阈值; λ_6 为年龄影响因子中的峰值年龄参数,表示用户参与需求响应意愿最高的年龄基准点; E 为用户受教育水平; I 为薪资水平; A 为家庭平均年龄; ϕ_e 、 ϕ_i 、 ϕ_a 分别为上述因素的影响系数; p_{base} 为预期用电价格; p_{real} 为当前用电价格; p_{max} 为最高电价。

用户意愿度会影响空调的设定温度区间,使其在初始温度可调节裕度基础上进行变化。定义调控参数及其关系式如下。

$$\Delta\theta_{t,i} = \mu_{i,t}(\theta_{t,i}^{\max,0} - \theta_{t,i}^{\min,0}) \quad (13)$$

$$\theta_{t,i}^{\max} = \theta_{t,i}^{\max,0} + \Delta\theta_{t,i} \quad (14)$$

$$\theta_{t,i}^{\min} = \theta_{t,i}^{\min,0} - \Delta\theta_{t,i} \quad (15)$$

式中: $\theta_{t,i}^{\min,0}$ 和 $\theta_{t,i}^{\max,0}$ 分别为 t 时刻第 i 个空调用户的热舒适度初始温度可调节裕度; $\theta_{t,i}^{\min}$ 和 $\theta_{t,i}^{\max}$ 分别为空调可设定温度区间下限和上限; $\Delta\theta_{t,i}$ 为 t 时刻第 i 个空调考虑用户意愿度的温度改变量。

2.3 用户负荷可控度

实际中,用户是否安装负荷控制设备决定用户是否参与直接负荷控制模式下的需求响应。因此用户负荷可控度的高低,依赖于用户安装直接控制设备的比例。基于国内外的DR项目经验,结合我国近十年来智能设备及技术的迅猛发展,配备控制终端的变频空调的比例显著提升。可合理假设变频用户可控度 ξ 为 60%^[23]。

2.4 变频空调需求响应潜力模型

当空调的初始温度设定值为 $\theta_{\text{set},t,i}$ 时,结合用户意愿度和用户负荷可控度可得空调集群的聚合功率可调节区间为:

$$L_t^{\min} \leq L_t \leq L_t^{\max} \quad (16)$$

$$L_t^{\min} = L_{t,0} - \xi \left\{ L_{t,0} - NE \left(\frac{1}{\eta R} \right) [\theta_a - E(\theta_{t,i}^{\max})] \right\} \quad (17)$$

$$L_t^{\max} = L_t - \xi \left\{ L_{t,0} - NE \left(\frac{1}{\eta R} \right) [\theta_a - E(\theta_{t,i}^{\min})] \right\} \quad (18)$$

$$L_t = NE \left(\frac{1}{\eta R} \right) (\theta_a - E(\theta_{\text{set},t,i})) \quad (19)$$

式中: N 为空调数量; $E(\cdot)$ 代表数学期望; $L_t^{\max}$ 和 $L_t^{\min}$ 分别为空调集群聚合功率上下限; $L_{t,0}$ 为设定温度为 θ_a 时的空调集群初始聚合功率。

3 基于微元法的虚拟储能分层优先排序控制策略

本文提出的策略将空调虚拟储能的思想^[16]和物理中的微元法结合,把电网需求时段分解为 n 个元过程,并根据空调系统特性进行聚类后对虚拟储能进行分层优先排序,得到每个元过程的控制策略,从而得到整个需求响应时段的控制策略,响应电网的调度计划。

3.1 基于微元法的最小控制时长计算

本文假定需求响应前,空调系统已达到稳定状态,且平均室温为空调初始设定温度 $\theta_{\text{set},0}$ 。需求响应开始后,将空调设定温度上调到舒适温度区间的

最大可接受温度。而设定温度变化,房间温度由当前室温到设定温度需要一定的时间,时间长度 T_{sus} 为:

$$T_{\text{sus}} = RC \ln \left(\frac{\theta_{\text{out},t} - \theta_{\text{set},0} - R\eta P_{\text{min}}}{\theta_{\text{out},t} - \theta_{\text{set}}^{\max} - R\eta P_{\text{min}}} \right) \quad (20)$$

首先找出 t 时刻集群的可持续时长最小值 $T_{\text{sus},t}^{\min}$, 可表示为:

$$T_{\text{sus},t}^{\min} = \min \{ T_{\text{sus},t}^1, T_{\text{sus},t}^2, \dots, T_{\text{sus},t}^i \} \quad (21)$$

式中 $T_{\text{sus},t}^i$ 为 t 时刻第 i 个集群的可持续时长。

对于空调最小功率可持续时长 $T_{\text{sus},t}^{\min}$ 与电网的响应时长 T_{need} 的关系,分为以下两种情况。

1) 情况1: $T_{\text{sus},t}^{\min} \geq T_{\text{need}}$

空调集群的需求响应潜力为:

$$\Delta P_t = \sum_{i=1}^N (P_{t,i}^0 - P_i^{\min}) \quad (22)$$

式中: $\Delta P(t)$ 为 t 时刻空调需求响应潜力; $P_{t,i}^0$ 为需求响应前 t 时刻第 i 个空调系统的功率; $P_i^{\min}$ 为第 i 个空调系统的最小运行功率。

2) 情况2: $T_{\text{sus},t}^{\min} < T_{\text{need}}$

在该情况下,空调集群无法在 $T_{\text{sus},t}^{\min}$ 内完成电网的响应需求。因此,本文引入物理学中微元法的思想,将电网的响应时长 T_{need} 分解成时长为 $T_{\text{sus},t}^{\min}$ 的元过程。当 $nT_{\text{sus},t}^{\min} \geq T_{\text{need}}$ 时,将所有元过程的控制策略合并得到满足电网调度需求的空调控制策略,如图2所示。

3.2 空调负荷虚拟储能模型

将空调负荷作为可充放电的虚拟储能(virtual energy storage, VES),能够快速计算空调系统的需求响应功率^[16]。空调系统的荷电状态(virtual state-of-charge, VSOC, 其值用 V_{soc} 表示)和当前室温以及温度可调节裕度的关系如下。

$$V_{\text{soc},t} = \frac{Q_{\text{in},t}}{Q_{\text{cap},t}} = \frac{\theta_{t,i}^{\max} - \theta_{\text{in},t}}{\theta_{t,i}^{\max} - \theta_{t,i}^{\min}} \quad (23)$$

式中: $Q_{\text{cap},t}$ 和 $Q_{\text{in},t}$ 分别为 t 时刻第 i 个空调系统的储能总量和当前电量; $\theta_{\text{in},t,i}$ 为 t 时刻第 i 个空调系统的室内温度。

以放电为例,根据式(1)和式(23)可知空调系统的VSOC变化为:

$$V_{\text{soc},t+1} - V_{\text{soc},t} = (e^{-\frac{\Delta t}{RC}} - 1) \frac{\theta_{\text{out},t} - \eta P_t R - \theta_{\text{in},t}}{\theta_{t+1}^{\max} - \theta_{t+1}^{\min}} \quad (24)$$

由式(24)可知,虚拟储能的充放电速度与热参数 RC 以及特征温差 QR 有关。热参数 RC 越小的空

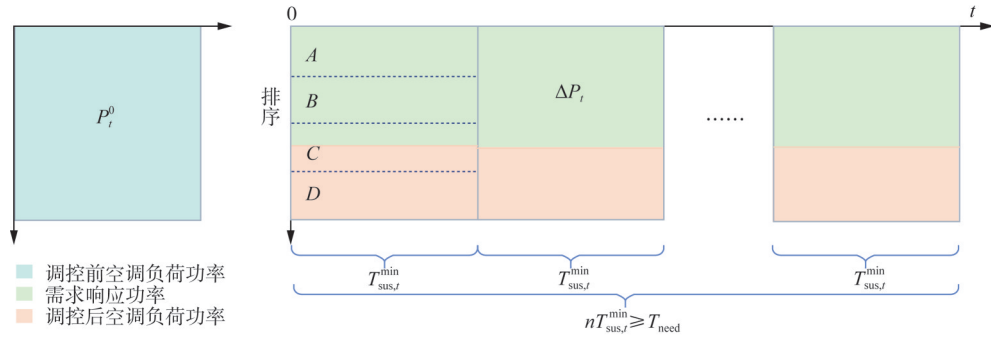


Fig. 2 Schematic diagram of the minimum control time based on the micro-element method

调系统能越快速响应电网的调控需求, 适合优先调度。特征温差 QR 大的空调系统能提供较大的负荷调节量, 适合优先调度。

3.3 考虑用户意愿度和空调系统特性分组聚类

市场上的空调型号繁多, 对每一个空调系统建模不仅工作量大且不现实。因此本文基于用户意愿度和特定参数对空调系统进行分组聚类。

1) 分组: 将用户意愿度等级 $X = \{A, B, C, D\}$ 从高到底分为 4 组, 在意愿度区间划分 4 个阶梯, A 组为用户意愿度最高的组。 B 、 C 、 D 组的平均意愿度依次递减。

2) 聚类: 基于参数 RC 、 QR 值对各个组进行聚类。采用 K -means++ 聚类方法将空调聚类成不同聚合类。当 $T_{sus,t}^{min} \geq T_{need}$ 时, 优先对 QR 较大的一类进行控制。当 $T_{sus,t}^{min} < T_{need}$ 时, 优先对 RC 较小且 QR 较大的类进行控制。

3.4 虚拟储能分层优先排序

根据本文的 PSME-VES 策略, 对空调系统分组聚类后, 共有 $4 \times n$ 个类。每组内的聚类中心代表了该聚类群组中个体的特征指标。后续按照类的特征指标进行排序。具体步骤如下。

1) 类间排序: 对组内的类进行排序, 优先选择响应快速且响应量大的空调系统类进行控制。

2) 类内排序: 对类内的空调系统进行进一步排序。按照 $VSOC$ 从高到低进行排序。

3) 完成排序队列: 在需求响应中根据排序队列进行控制, 直到该时段内的需求响应量达到电网需求。

4 两阶段调控框架

用户变频空调负荷功率小且分散, 自行参与微

电网的需求响应调度会导致电网调度中心的计算量增加, 传输数据增多。因此在需求响应市场中, 个体用户委托负荷聚合商作为代理参与市场投标^[24]。

为了将 PSME-VES 策略与电网相结合, 本文提出一个两阶段调控框架。两阶段调控框架如图 3 所示。

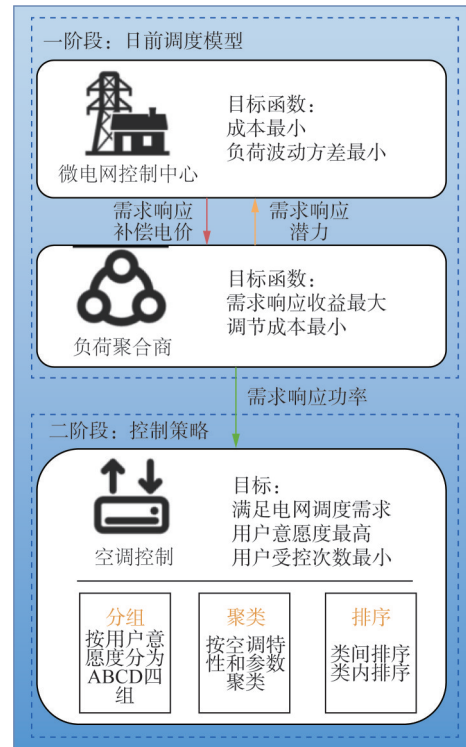


Fig. 3 Two-stage regulatory framework

第一个阶段是基于双层优化方法的需求响应功率调度框架, 框架采用双层优化策略, 旨在通过上下层的协同优化, 协调微电网和负荷聚合商之间的运行决策。上层微电网控制中心以成本最小化和净

负荷方差最小化为目标;负荷聚合商在需求响应过程中执行负荷调节,这一过程不仅包括设备磨损、额外能源消耗还可能对用户空调造成磨损或缩短使用寿命。因此下层负荷聚合商通过量子粒子群进行优化,使得收益最大化且最小化调节成本。上层优化的目标函数为:

$$\min F = \sum_{t=1}^T ((C_t \cdot P_{DR,t}) + F^{CAR} + F^{GEN} + F^{WT}) + a \cdot \delta_{net} + b \cdot \varepsilon \quad (25)$$

式中: T 为调度周期总时段数; $P_{DR,t}$ 为 t 时刻的需求响应功率; C_t 为 t 时刻需求响应的补偿价格; F^{GEN} 为微电网中火电机组的运行成本; F^{WT} 为风力发电设备的维护成本; F^{CAR} 为气电机组的运行成本; δ_{net} 为净负荷方差; ε 为罚函数; a 、 b 为目标函数权重因子。

下层优化的目标是通过量子粒子群优化方法,最大化负荷聚合商的收益并最小化调节成本。目标函数如下:

$$\min F = \sum_{t=1}^T C_t \cdot P_{DR,t} + C_{adj} N_{adj} \quad (26)$$

式中: C_{adj} 为调节次数的单位成本; N_{adj} 为调节次数。

根据一阶段的调度模型得到的实际需求响应功率,负荷聚合商通过 PSME-VESS 策略得到空调控制策略,使得空调集群聚合功率变化量与微电网实际需求差值最小。

5 算例分析

选取浙江省某区域内的空调群作为研究对象,对该区域内 3 000 台变频空调的参数进行了正态分布仿真。表 1 为变频空调参数的具体设定情况。

表 1 变频空调集群参数设置表

Tab. 1 Setting table of inverter air-conditioners cluster

参数	数值	参数	数值
$T_{out}/^{\circ}\text{C}$	36	a	$N(18, 3)$
$R/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{kW}^{-1})$	$N(10, 1)$	b	$N(50, 10)$
$C/(\text{kJ} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	$N(200, 0.5)$	c	$N(-0.23, 0.025)$
$f_{\max}$	110	d	$N(50, 3)$
$f_{\min}$	5	e	$N(200, 50)$

5.1 空调设定温度影响分析

基于浙江地区家庭用户受教育水平、薪资水平及平均年龄等实际数据^[25-27],在基础电价为 0.2

元/kWh,实时电价为 0.3 元/kWh 时,其与电网商定的需求响应量为 2 000 kW 的情况下。对比不同的空调设定温度对响应潜力的影响,如图 4 所示。

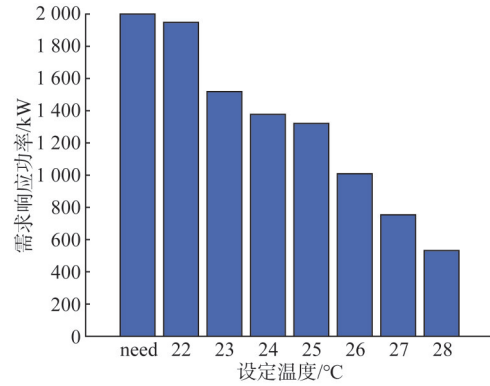


图 4 空调设定温度的影响

Fig. 4 Impact of initial setting temperature on air conditioning

由图 4 可知,随着空调初始设定温度的升高,需求响应潜力呈现逐渐降低的趋势。当设定温度从 22 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 28 $^{\circ}\text{C}$ 时,需求响应潜力从 2 000 kW 左右下降至 600 kW 以下,下降幅度超过 70 %。这表明,低设定温度下的空调系统对需求响应的贡献更为显著。这一现象的原因在于,较低的设定温度使得空调系统长时间运行于高功率模式,其 VSOC 水平较高,储备了更多可供释放的功率。在需求响应中,这部分储能能够更快速地响应电网需求,从而释放出更多的削减潜力^[28-30]。

因此,在需求响应策略中,应优先调控设定温度较低的空调系统,以最大化需求响应潜力。

5.2 补偿电价影响分析

假设设定温度为 22 $^{\circ}\text{C}$,基础电价为 0.2 元/kWh 时。对比不同补偿电价对用户意愿度和用户需求响应功率的影响,如图 5 所示。

由图 5 可知,补偿电价对需求响应潜力和用户意愿度具有显著影响。在补偿电价较低时,需求响应潜力较小,约 1 300 kW,用户满意度为负值。这表明,此时用户的响应收益不足以弥补舒适度的损失,因此更多用户选择优先保障热舒适度。随着补偿电价的提升,需求响应潜力快速从 1 300 kW 提升至接近 1 900 kW,用户意愿度也由负转正,并呈现显著上升趋势。这说明,当补偿电价达到一定水平时,用户更愿意以热舒适度的部分牺牲换取经济收益。这一阶段是提升需求响应潜力和用户意愿度的关键区间。当补偿电价超过 0.4 元/kWh 后,需求

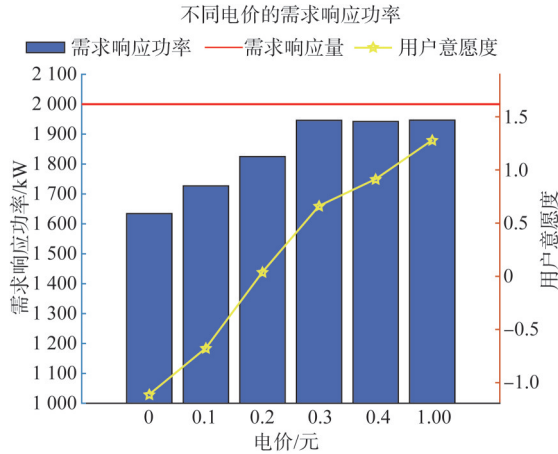


图5 补偿电价影响分析

Fig. 5 Analysis of the impact of compensation electricity prices

响应潜力趋于平稳, 用户意愿度的增长幅度也显著降低, 反映出边际效应的限制作用。

综上所述, 通过提高补偿电价, 可以在一定范围内有效提升需求响应潜力和用户意愿度。然而, 补偿电价超过 0.4 元/kWh 后, 其边际收益递减, 难以显著增加需求响应效果。建议在制定补偿电价时重点关注中等补偿区间, 如 0.2~0.4 元/kWh, 以实现需求响应潜力与经济激励成本的平衡。

5.3 空调控制策略调控效果分析

5.3.1 需求响应跟踪负荷效果

将电网减载目标设定为最大 1 500 kW、最小 500 kW 的正弦曲线, 控制时间设定为 90 min 来体现控制策略跟踪负荷的效果。图为在不同最小控制时长的跟踪性能。由图 6 可知, 本文提出的 PSME-VESSE 控制策略基本实现了实时跟踪。

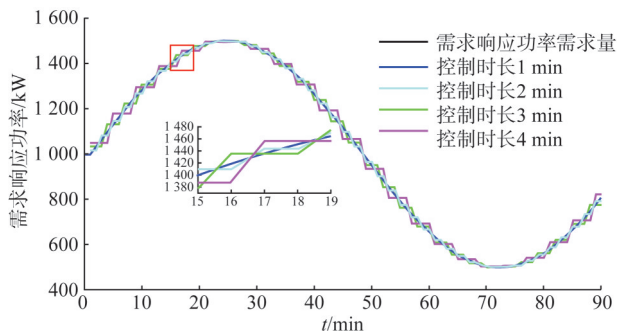


图6 负荷跟踪效果

Fig. 6 Effect of load tracking

5.3.2 控制策略分析

为展现 PSME-VESSE 策略对用户意愿度和受控频率的影响。设定电网的需求响应需求量为

2 000 kW, 室外温度为 36 ℃, 补偿电价为 0.3 元/kWh。通过对比 PSME-VESSE 策略与文献[16]的虚拟储能优先排序 (virtual energy storage priority sorting, VESPS) 策略在从 22 ℃~28 ℃ 的设定温度下的区别, 数据对比如表 2 所示, 控制频率对比如图 7 所示。对应需求响应功率如图 8 所示。

表2 控制频率对比结果

Tab. 2 Comparison results of control times

PSME-VESSE 策略		VESPS 策略	
平均控制频率	平均用户意愿	平均控制频率	平均用户意愿
1.114 1	0.535 6	1.256 7	0.513 3

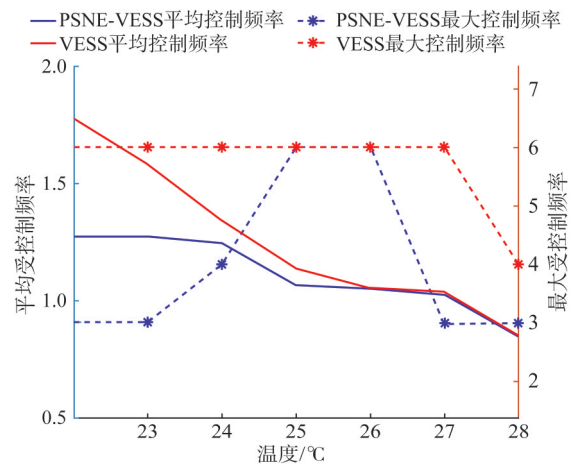


图7 控制频率对比

Fig. 7 Comparison of control frequencies

由图 7 和表 2 可知, 随着设定温度的降低, PSME-VESSE 策略的平均控制频率相较于 VESPS 策略的优化效果愈加显著。整体的平均控制频率减少了 11.3%, 用户意愿度提高了 4.3%。由图 8 可知, 在低初始设定温度时, PSME-VESSE 策略比 VESPS 策略的响应率略高。一方面是因为 PSME-VESSE 策略比文献[16]的传统 VESPS 策略增加了对用户或设备特性的差异性的考虑, 提出了分层优先排序, 将空调虚拟储能按用户特性分层, 实现了更精准的优先级排序。另一方面结合了微元法, 使得在空调设定温度较低时, 空调虚拟储能处于高 VSOC 状态, 拥有较长的可控制时长, 减少了控制次数, 从而提升了用户意愿度。综上所述, 本文提出的 PSME-VESSE 策略通过微元法对最小目标控制时长进行优化, 从而在较低设定温度时, 可获得比 VESPS 策略更高的需求响应率和更少的受控制频率, 有效降低负荷聚合商的计算量, 更好地满足电

网需求。

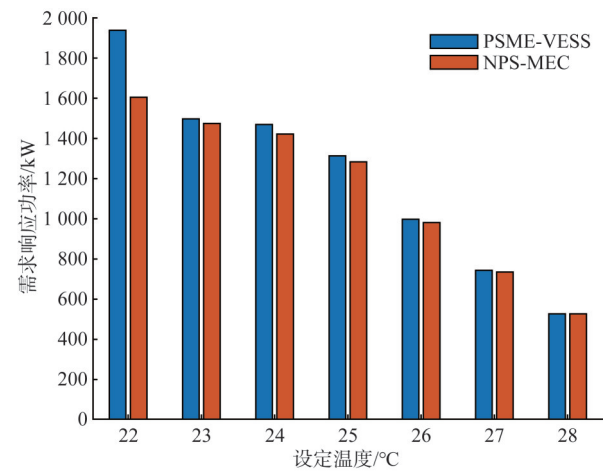


图 8 控制策略需求响应量对比

Fig. 8 Comparison of demand response volumes of control strategie

5.3.3 分层优先排序效果分析

为凸显分层优先排序对用户意愿度及控制频率的优化效果, 本文通过设置 2 种场景来分析分层优先排序效果的有效性, 场景情况如下。

场景一: PSME-VESS 策略;

场景二: 无排序的微元控制策略(non priority sorting of micro element control, NPS-MEC)。

对比数据如表 3 所示, 结果如图 9 所示。

表 3 分层优先排序效果

Tab. 3 Effect of hierarchical prioritization

PSME-VESS		NPS-MEC	
平均控制频率	平均用户意愿	平均控制频率	平均用户意愿
0.869 0	0.806 4	1.001 4	0.607 1

结合图表可知, 无论在何种控制温度下, PSME-VESS 策略的表现始终优于 NPS-MEC 策略。通过增加分层优先排序, 使得平均用户意愿度提高了 32.82 %, 控制频率减少了 13.22 %。这是因为 PSME-VESS 策略优先选择高荷电状态和高用户意愿度以及低控制频率的空调进行控制, 从而在意愿度和控制频率两个方面具有良好的表现, 如图 10 所示, 场景一比场景二的需求响应率高。综上所述, PSME-VESS 策略可以有效地提高参加需求响应的用户意愿度, 减少整体用户的受控制频率。

5.3.4 求解时间分析

本文通过 MATLAB 2019 a 软件进行算例仿真,

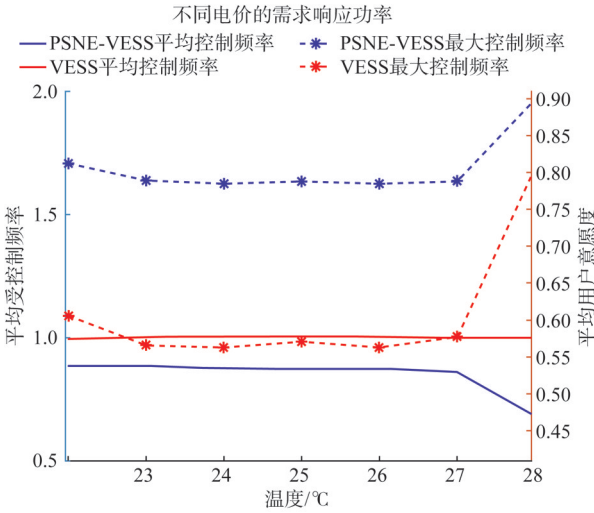


图 9 用户意愿度及控制频率对比

Fig. 9 Comparison of user willingness and control frequency

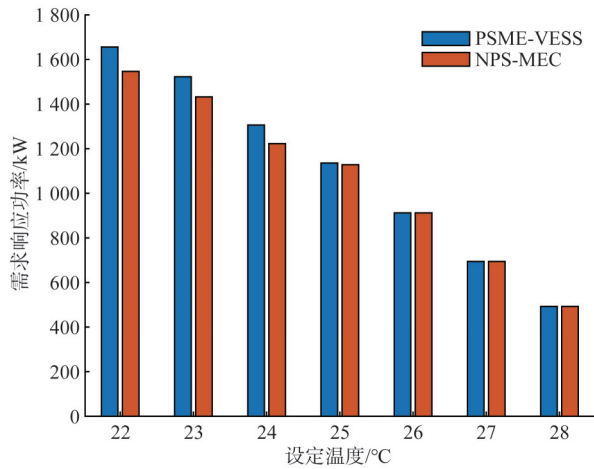


图 10 分层优先排序效果

Fig. 10 Effect of hierarchical prioritization

对比本文提出的 PSME-VESS 策略与 VESPS、NPS-MEC 策略与加入分层优先排序策略的 VESPS 策略这 4 种策略的求解时间进行对比, 对比结果如表 4。

表 4 求解时间分析

Tab. 4 Solve the time analysis

控制策略	PSME-VESS	VESPS	NPS-MEC	加入分层优先排序的 VESPS
求解时间/s	0.082 2	0.032 5	0.033 4	0.197 4

由表 4 可知, PSME-VESS 策略的求解时间为 0.0822, 高于 VESPS 策略和 NPS-MEC 策略, 但远低于加入分层优先排序的 VESPS 策略。这是因为 PSME-VESS 策略结合了微元法与分层优先排序,

综合考虑用户意愿、设备特性聚类 and VSOC 排序,实现了从全局到局部的多层次优化。而 VESPS 策略和 NPS-MEC 策略由于没有进行分层优先排序,使得计算时间更快。但在 VESPS 策略中加入分层优先排序的求解时间却大于 PSME-VES 策略。这表明 PSME-VES 策略在优化效果和计算效率之间达到了良好平衡,适用于复杂多用户场景。尽管求解时间略高,但这是为实现更全面优化所付出的合理成本,未来可通过优化算法进一步降低时间消耗。

6 总结

本文使用一阶 ETP 模型构建变频空调负荷模型,提出了一种结合微元法与用户满意度的空调负荷虚拟储能的需求响应分层优先排序控制策略,建立聚合空调负荷参与电网需求响应的两阶段调控模型。本文主要结论如下。

1) 在需求响应潜力评估方面,考虑用户意愿、用户热舒适度和用户负荷可控度,建立需求响应潜力评估模型。模型充分考虑了各种现实因素,提升了用户满意度和参与度,搭建起用户与电网之间积极且高效的互动桥梁,构建互利共赢的互动关系。

2) 在空调负荷控制策略方面,引入了微元法思想分解需求响应过程,在其过程中将空调负荷视为虚拟储能,提出分层优先排序策略。不仅有效地满足了用户对舒适度的追求,减少了控制频率及其对用户的干扰,而且还有助于优化电力资源的配置,从而实现更为精准和高效的需求响应。

3) 本文策略主要聚焦于空调的制冷模式,未来可将空调的制热模式纳入考量,以便更全面地探讨空调负荷在需求响应中的实际运用。

参考文献

- [1] 杨永标, 颜庆国, 徐石明, 等. 公共楼宇空调负荷参与电网虚拟调峰的思考[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 103 - 107.
YANG Yongbiao, YAN Qingguo, XU Shiming, et al. Thoughts on the participation of air conditioning load in public buildings in virtual peak shaving of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 103 - 107.
- [2] 苏建军, 郭跃进, 刘萌, 等. 紧急切负荷措施的温控负荷控制策略及概率模型[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 911 - 918.
SU Jianjun, GUO Yuejin, LIU Meng, et al. Control strategy and probability model of temperature-controlled load for

- emergency load shedding measures[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 911 - 918.
- [3] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[J]. 中国水利, 2021(6): 1 - 38
Xinhua News Agency. The outline of the 14th Five-Year Plan (2021—2025) for national economic and social development and the long-range objectives through the year 2035 of P. R. China[J]. China Water Resources, 2021, 36(6): 1 - 38.
- [4] 发展改革委, 能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见[Z]. 北京: 发展改革委能源局, 2022.
- [5] 何金松, 叶鹏, 张涛, 等. 面向电力系统应用的空调负荷研究综述[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2019, 15(4): 343 - 349.
HE Jinsong, YE Peng, ZHANG Tao, et al. A review of air conditioning load research for power system applications[J]. Journal of Shenyang University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 15(4): 343 - 349.
- [6] 陈臻, 杜维柱, 白恺, 等. 空调温控负荷集群参与光伏消纳的潜力评估与互动框架[J]. 现代电力, 2024, 41(3): 479 - 489.
CHEN Can, DU Weizhu, BAI Kai, et al. Potential assessment and interactive framework for air conditioning temperature-controlled load clusters participating in photovoltaic consumption[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(3): 479 - 489.
- [7] 王弘利, 杨军, 李高俊杰, 等. 考虑需求响应潜力的配电网多主体交易策略[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(2): 50 - 56.
WANG Hongli, YANG Jun, LI Gaojunjie, et al. Multi-entity trading strategy of distribution network considering demand response potential[J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(2): 50 - 56.
- [8] 吴迪, 王韵楚, 郁春雷, 等. 基于高斯过程回归的工业用户需求响应潜力评估方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 94 - 101.
WU Di, WANG Yunchu, YU Chunlei, et al. Demand response potential assessment method for industrial users based on Gaussian process regression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 94 - 101.
- [9] 孙靓. 基于数据驱动的温控负荷集群可调节潜力评估与互动[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [10] 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.
- [11] 周磊, 李扬, 高赐威. 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5579 - 5589.
ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579 - 5589.
- [12] 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.
- [13] 曾庆彬, 梁伟强, 张勇军, 等. 考虑多重轮换调控的空调负荷调控潜力评估与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 123 – 131.
- ZENG Qingbin, LIANG Weiqiang, ZHANG Yongjun, et al. Regulation potential evaluation and control strategy of air conditioning load considering multiple rotation regulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 123 – 131.
- [14] 康忠健, 李锴绩, 常铮. 基于扩张状态观测器的非线性最优变频空调频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 91 – 98.
- KANG Zhongjian, LI Kaiji, CHANG Zheng. Frequency control of inverter air conditioning based on ESO nonlinear optimal control [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 91 – 98.
- [15] CHE Y, YANG J, ZHAO Y, et al. Control strategy for inverter air conditioners under demand response [J]. Processes, 2019, 7(7): 407 – 416.
- [16] ZHANG Q, GUO Q, YU Y. Research on the load characteristics of inverter and constant speed air conditioner and the influence on distribution network [C]//2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), August 10 – 13, Xi'an, China. New York: IEEE, 2016: 21 – 30.
- [17] 何俊, 傅广努, 黄海涛. 多重响应潜力影响因素作用下的变频空调负荷调控方案[J]. 现代电力, 2023, 40(4): 495 – 504.
- HE Jun, FU Guangnu, HUANG Haitao. Load Control scheme of inverter air conditioner under the influence of multiple response potential factors [J]. Modern Electric Power, 2023, 40(4): 495 – 504.
- [18] 王丹, 兰宇, 贾宏杰, 等. 基于弹性温度可调裕度的中央空调集群需求响应双层优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 118 – 126, 134.
- WANG Dan, LAN Yu, JIA Hongjie, et al. Double-layer optimization strategy of cluster central air-conditioner demand response based on elastic temperature adjustable margin [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 118 – 126, 134.
- [19] QI Y, WANG D, WANG X, et al. Frequency control ancillary service provided by efficient power plants integrated in queueing-controlled domestic water heaters [J]. Energies, 2017, 10(4): 559.
- [20] FARUQUI A, SERGICI S. BGE's smart energy pricing pilot summer 2008 impact evaluation [R]. Cambridge, UK: The Brattle Group Inc., 2009: 1 – 25.
- [21] 贺培春. 基于舒适度的室内空气调节系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [22] FANGER P O. Moderate Thermal environments determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort [J]. Environmental Science, 1984: (1): 1 – 10.
- [23] SULLIVAN M, BODE J, KELLOW B, et al. Using residential AC load control in grid operations: PG&E's ancillary service pilot [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 1162 – 1170.
- [24] 王珂, 刘建涛, 姚建国, 等. 基于多代理技术的需求响应互动调度模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 121 – 127.
- WANG Ke, LIU Jiantao, YAO Jianguo, et al. A multi-agent based interactive scheduling model considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 121 – 127.
- [25] 浙江省统计局. 2023年度浙江省人民生活等相关统计数据公报[EB/OL]. (2024 – 03 – 04). [2024 – 7 – 30]. <https://mapi.zjzwfw.gov.cn/>.
- [26] 国家统计局. 浙江省2020年第七次全国人口普查主要数据公报[EB/OL]. (2021 – 05 – 13) [2024 – 7 – 30]. <https://www.stats.gov.cn/>.
- [27] 丰力, 张莲梅, 韦家佳, 等. 基于全生命周期经济评估的海上风电发展与思考[J]. 中国电力, 2024, 57(9): 80 – 93.
- FENG Li, ZHANG Lianmei, WEI Jiajia, et al. Development & thinking of offshore wind power based on life cycle economic evaluation [J]. Electric Power, 2024, 57(9): 80 – 93.
- [28] 崔颖. 计及碳交易的含风电电力系统的优化调度[D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- [29] 余君一, 廖思阳, 柯德平, 等. 面向电网需求响应的空调负荷异质性建模与低维广播协同调控方法[J]. 中国电力, 2025, 58(12): 14 – 26.
- YU Junyi, LIAO Siyang, KE Deping, et al. Heterogeneity modeling and low-dimensional broadcast cooperative control of air conditioning load for power grid demand response [J]. Electric Power, 2025, 58(12): 14 – 26.
- [30] 何华绅, 王玉玺, 随权, 等. 计及限电不确定性的园区微电网燃气轮机与空调建筑集群多时间尺度协同调度[J]. 电力建设, 2025, 46(12): 131 – 142.
- HE Huashen, WANG Yuxi, SUI Quan, et al. Multi-time-scale coordinated scheduling of micro-turbine and air-conditioning building clusters in campus microgrid considering load curtailment uncertainty [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(12): 131 – 142.

收稿日期: 2024-05-16; 网络首发日期: 2025-02-16

作者简介:

黄如玉(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为含微电网的配电网需求响应优化调度, 13667071603@139.com;

程若发(1971), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为智能电网、能源管理、电力系统运行、需求响应、电力市场、可再生能源消纳, daingong100@126.com;

吕翔龙(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合需求响应和综合能源系统的优化调度。