

考虑用户满意度的智能建筑多目标能源优化

郑方圆¹, 陈立征^{1*}, 王文奎¹, 张汉元¹, 范英乐²

(1. 山东建筑大学信息与电气工程学院, 山东 济南 250101; 2. 国网徐州供电公司, 江苏 徐州 221005)

摘要:为提高建筑节能,本研究构建低碳智能建筑能源优化系统。提出考虑用户满意度的智能建筑能源优化方法,搭建智能建筑能源优化系统模型,引入照明和空调负荷作为柔性负荷参与系统的优化调度,增加系统调度灵活性,此外电动汽车可与智能建筑双向交流,并且智能建筑可根据分时电价与公用电网进行电能双向传输。基于上述模型,以智能建筑日运行成本最小为目标,同时保证用户的满意度,构建由智能建筑运行成本和用户满意度构成的多目标优化问题,利用加权求和法处理多目标问题,然后通过 CPLEX 对系统模型优化求解。最后与多个不同的策略进行对比,本研究提出的策略可以保证用户满意度在 0.95 以上的前提下,降低系统运行成本。算例的对比结果证明,本研究提出的智能建筑能源优化方法可以实现智能建筑的节能减排并提高系统的经济性。

关键词:用户满意度;智能建筑;柔性负荷;能源优化;加权求和法

中图分类号:TM73

文献标志码:A

引用格式:郑方圆,陈立征,王文奎,等. 考虑用户满意度的智能建筑多目标能源优化[J]. 山东大学学报(工学版),2025,55(2):45-57.

ZHENG Fangyuan, CHEN Lizheng, WANG Wenkui, et al. Intelligent building energy optimization considering user satisfaction[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(2):45-57.

Intelligent building energy optimization considering user satisfaction

ZHENG Fangyuan¹, CHEN Lizheng^{1*}, WANG Wenkui¹, ZHANG Hanyuan¹, FAN Yingle²

(1. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; 2. State Grid Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221005, Jiangsu, China)

Abstract: To improve building energy efficiency, a low-carbon intelligent building energy optimization system was constructed in this study. The energy optimization system model for intelligent building was constructed. lighting and air conditioning loads were considered as flexible loads to participate in the optimal scheduling of the system, which increased the flexibility of system scheduling. In addition, bidirectional interaction between electric vehicles and intelligent buildings was enabled, and electricity could be transmitted by intelligent buildings to the utility grid in two directions according to the time-of-use electricity price. Based on the above model, a multi-objective optimization problem composed of power generation cost and user satisfaction was constructed with the goal of minimizing operating cost and ensuring user satisfaction. The weighted sum method was used to deal with the multi-objective problem, and then the system model was optimized by CPLEX. Compared with several different strategies, the system operation cost can be reduced by the strategy proposed in this paper on the premise that the user satisfaction is ensured to be above 0.95. The comparison results of the numerical examples proved that the energy conservation and emission reduction in intelligent buildings could be achieved and the economy of the system could be improved by the intelligent building energy optimization method proposed in this study.

Keywords: user satisfaction; intelligent building; flexible loads; energy optimization; weighted sum method

收稿日期:2024-05-24

基金项目:山东省自然科学基金青年基金资助项目(ZR2021QF066);山东省高等学校“青年创新团队科技计划”资助项目(2022KJ204)

第一作者简介:郑方圆(2000—),女,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为能源优化。E-mail:z_fangy@163.com

* 通信作者简介:陈立征(1989—),男,山东泰安人,讲师,硕士生导师,博士,主要研究方向为系统稳定分析。

E-mail:chenlizheng120@163.com

0 引言

节能减排是实现可持续发展、落实“双碳”行动的重要路径^[1]。目前,大力发展可再生能源,构建以新能源为主体的新型电力系统逐渐达成共识^[2-3]。建筑能耗占世界总能耗的30%以上,建筑节能是解决当下节能降耗问题的重点^[4]。在建筑节能系统中,新能源发电和新能源汽车分别可以提供清洁能源和移动式储能^[5]。但是可再生能源出力具有不确定性和波动性^[6],在含有光伏发电的建筑能源调度系统中需要有效准确地优化控制^[7],既要充分发挥储能、可中断负荷等灵活性资源的作用^[8],也要保证用户的满意度,这就给建筑能源系统的运行带来极大挑战。因此,综合考虑建筑节能和用户满意度的智能建筑能源系统建模是建筑能源优化的研究重点。

当前,国内外已有很多关于建筑能源优化的成果。文献[9]构建智能建筑主动配电网统一模型,利用多种暖通空调设备运行灵活性,保证用户舒适度的同时提高电网风电接纳能力。文献[10]建立含热力系统和电力系统的社区微网模型。文献[11]提出含高比例分布式能源的智能园区运行框架,包含楼宇内能源联供、电动汽车等资源建立计及用户需求模型。文献[12]建立含有光伏、电动汽车和储能系统的住宅智能建筑系统。但是,很少有文章会同时考虑含有新能源发电、电动汽车、柔性负荷、储能系统以及外接电网的智能建筑能源优化调度。

在能源优化系统目标选择方面,国内外已有许多研究成果。文献[13]以用能成本最低为目标建立能源系统优化模型,实现多种可调负荷促进分布式能源电力消纳目标。文献[14]提出一种基于用户行为预测的光伏社区需求响应策略,采用成本最低目标函数优化可调度负荷,实现削峰填谷以及降低用电成本。文献[15]建立一种建筑系统双层优化新框架,以建筑能源成本最低和配电负载系数最大为目标函数,实现建筑用能经济性和稳定性。文献[16]构建含电力市场的互联多智能建筑的分层能源管理系统,实现系统运营成本、二氧化碳排放、电网依赖最低。

虽然,上述研究已在建筑能源领域取得很多成果,但是下述问题未充分考虑:(1)大部分文章建立

的建筑能源系统没有考虑电动汽车、柔性负荷同时参与智能建筑系统,没有综合考虑两者与可再生能源、公用电网之间的协调配合;(2)在优化模型建立过程中选择的优化目标多为系统的运行成本,很少同时考虑建筑用户心理。

针对上述问题,本研究提出考虑用户满意度的智能建筑多目标能源优化方法。本研究搭建智能建筑能源调度模型框架,介绍各种设备优化模型,进行三个用户满意度模型以及对非线性模型的线性化处理,根据建立的能源调度模型框架以日运行成本最低和三个用户满意度最高为目标函数建立多目标能源优化模型,并利用加权系数法对多目标进行处理,最后通过CPLEX求解器对模型优化求解。通过与多个不同策略的对比,验证了所提出的调度策略的经济性和有效性。

1 智能建筑能源优化系统模型

1.1 系统框架

智能建筑系统包含分布式太阳能光伏发电系统、固定储能系统、充电桩、电动汽车、固定负荷、柔性照明负荷、柔性空调负荷。其中,电动汽车通过充电桩与智能建筑搭载,具备一定的电力调蓄能力;柔性照明负荷和柔性空调负荷将建筑内部的一部分刚性负荷变为柔性负荷,可作为建筑的后备容量,提高智能建筑能源调度灵活性。太阳能光伏能够满足智能建筑大部分的用电需求,多发电时可以满足自给自足,并可以蓄存多余电力以及根据分时电价进行余电上网;少发或不发电时,靠储能系统、电动汽车的电池以及调节柔性负荷来保证智能建筑系统稳定运行。如果这些设备无法满足系统供需平衡,则需要外部公用电网提供辅助保证整个系统的供需平衡。智能建筑能源优化调度系统框架如图1所示。

图1中 P_{PV} 为可再生光伏(photovoltaic, PV)的输出功率,kW; P_{EV} 为电动汽车(electric vehicle, EV)与智能建筑双向交互功率,kW; P_{ESS} 为储能系统(energy storage system, ESS)与智能建筑双向交互的功率,kW; P_{AC} 为柔性空调(air conditioner, AC)消耗功率,kW; P_{LED} 为柔性照明负荷(light emitting diode, LED)消耗功率,kW; P_{Load} 为智能建筑中固定负荷消耗功率,kW; P_{Grid} 为智能建筑与公用电网双向交互功率,kW。

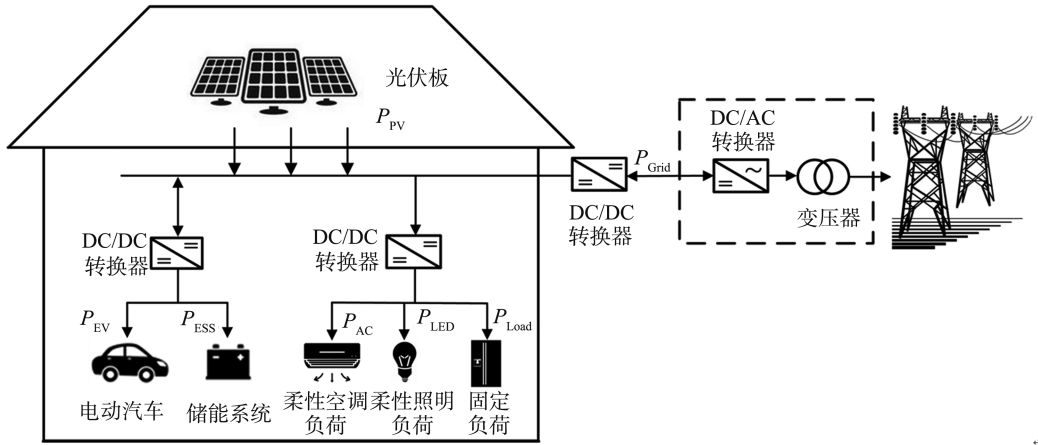


图1 智能建筑能源优化调度系统框架

Fig.1 Schematic diagram of intelligent building energy optimization scheduling system

1.2 系统组件模型

1.2.1 可再生光伏发电模型

太阳能光伏发电与太阳辐射强度、光伏特性和光伏组件温度相关性很大^[17],光伏组件输出功率

$$P_{PV} = P_{r1} \frac{I_s}{I_r} [1 + \rho(T_{cell} - T_r)], \quad (1)$$

式中: P_{PV} 为光伏电池的输出功率, kW; P_{r1} 为光伏额定功率, kW; I_s 为光伏表面太阳辐照强度, $W \cdot m^{-2}$; I_r 为标准测试环境下的辐射值, $I_r = 1000 W \cdot m^{-2}$; ρ 为功率的温度系数, 取为 $-0.0049 / ^\circ C$; T_{cell} 为光伏组件温度, $^\circ C$, T_r 为标准测试环境下的环境温度, $T_r = 25 ^\circ C$ 。

1.2.2 储能系统和电动汽车蓄电池模型

储能系统与电动汽车储能均使用化学电池(蓄电池), 电池的容量更新公式^[18]为

$$\begin{cases} E(t)S_{Bat} = E_{ini}S_{Bat} + P_c(t)\eta_c - \frac{P_d(t)}{\eta_d}, \\ \text{for } t = T_a \\ E(t)S_{Bat} = E(t-1)S_{Bat} + P_c(t)\eta_c - \frac{P_d(t)}{\eta_d}, \\ \forall t \in (T_a, T_b] \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $E(t)$ 为 t 时刻电池荷电状态, 此处的 t 是离散变量, 下文提到的 t 均为离散变量; E_{ini} 为电池初始时刻荷电状态; $P_c(t)$ 、 $P_d(t)$ 分别为电池充放电功率, kW; η_c 、 η_d 分别为电池充放电效率; S_{Bat} 为电池容量, kWh; T_a 为参与调度的开始时刻、 T_b 为参与调度的结束时刻。

1.2.3 柔性照明负荷模型

柔性照明负荷与环境照度有关, 功率根据环境照度变化而变化, 表达式如下

$$P_{LED}(t) = \frac{L(t) - L_{nature}(t)}{\alpha \cdot \beta \cdot \gamma} \cdot S, \quad (3)$$

式中: $L(t)$ 为环境的总照度, lx; $L_{nature}(t)$ 为自然照度, lx; $P_{LED}(t)$ 为柔性照明所消耗功率, kW; α 为LED的发光效率; β 为LED的利用效率; γ 为房间的维护系数; S 为建筑内房间的占地面积, m^2 。

1.2.4 柔性空调负荷模型

以制冷变频空调为研究对象, 最常见的空调房间温度变化的物理模型为等效热参数(equivalent thermal parameters, ETP)模型, 表达式为

$$C \frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{R} [T_{out}(t) - T_{in}(t)] - Q, \quad (4)$$

式中: $T_{in}(t)$ 和 $T_{out}(t)$ 分别为 t 时刻的室内室外温度, $^\circ C$; C 为房间的等效热容, kWh/ $^\circ C$; R 为房间等效热阻, $^\circ C/kW$; Q 为空调的制冷量, kW, 其值与空调用电功率 P_{AC} 存在关系, $Q = \eta P_{AC}$, η 是空调能效比^[19]。

2 用户满意度模型

2.1 电动汽车满意度模型

本研究搭建的智能建筑系统包含有电动汽车、柔性照明负荷和柔性空调负荷, 因此在对智能建筑系统进行能源优化时需要考虑用户的心理, 这里选取电动汽车满意度、柔性照明满意度和柔性空调满意度来衡量用户心理满意度。

电动汽车在建筑能源优化调度中充当着储能的角色, 在系统用电低谷时, 将电能储存在内, 在用电高峰时, 将存储的电能释放出来, 缓解系统调峰的压力。电动汽车在参与调度过程中, 中间过程不

涉及满意度的问题,只考虑结束调度时刻的电池荷电状态是否达到电动汽车用户的心理预期^[20]。因此,电动汽车满意度

$$F_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \min \left\{ 1, \frac{E_{\text{end}_i}}{E_{\text{exp}_i}} \right\}, \quad (5)$$

式中: M 为电动汽车数量; E_{exp_i} 为第*i*辆电动汽车调度结束时用户期待达到的荷电状态(state of charge, SOC); E_{end_i} 为第*i*辆电动汽车在调度周期结束时刻的荷电状态。电动汽车满意度取值范围是 $[0, 1]$,如果在调度周期结束时刻电动汽车的荷电状态与用户期待的荷电状态相同,那么电动汽车最大满意度取值1。

2.2 柔性照明满意度模型

在管理照明负荷容量时,要考虑满足用户的舒适度。因此,在应对系统频率事件时调整照明负荷功率,确保照明用户的舒适度最优。一般来说,可以使用高斯分布函数来描述用户对环境平均照度的满意程度。柔性照明的用户满意度

$$F_2 = \begin{cases} \exp\left(\frac{-(L(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), & \text{if } L(t) \in [200, 500] \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $L(t)$ 为环境的总照度, lx; μ 为期望值; σ 为方差; A 为用户对环境总照度的满意度阈值。式(6)中 $\mu=350$, $\sigma=100$, $A=0.4$ ^[21]。高斯分布函数中照明满意度与照度的关系如图2所示。

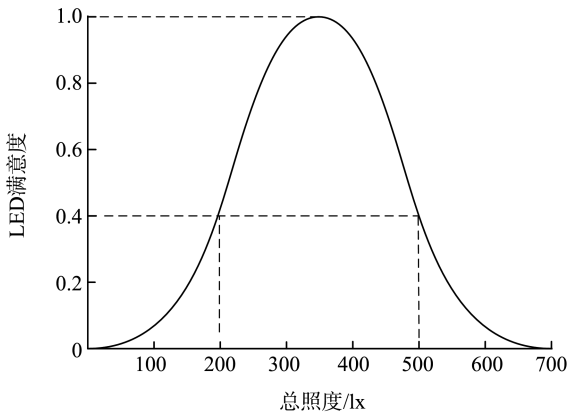


图2 高斯分布函数中照明满意度与照度的关系

Fig.2 The relationship between illuminance satisfaction and total illuminance in the Gaussian distribution function

从图2可看出,当环境总照度在350 lx时,用户的满意度取值为1。根据设定的满意度阈值可知,环境总照度的取值范围为 $[200, 500]$ lx。

2.3 柔性空调满意度模型

传统的空调只是以室内空气温度和相对湿度

作为控制目标,但是忽略了人体对环境的满意度。本研究以舒适度指标为控制目标,作为柔性空调的满意度,使空调系统根据用户需求来变化,在实现智能建筑最优调度的同时保证用户满意度。预测平均评价(predicted mean votes, PMV)是通用的热舒适度指标^[22],热舒适度指标

$$I_{\text{PMV}} = (0.303 \exp^{-0.036M} + 0.028) \{ M - W - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{\text{cl}} [(t_{\text{cl}} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{\text{cl}} h_c (t_{\text{cl}} - t_a) \}, \quad (7)$$

式中: I_{PMV} 为热舒适度指标, M 为人体能量代谢率, W/m^2 ; W 为人体的机械功率,一般取0, W/m^2 ; P_a 为空气中水蒸气分压力, Pa; f_{cl} 为服装的面积系数,夏季一般取1.1; t_a , t_r 和 t_{cl} 分别为环境温度、平均辐射温度和人体表面温度, $^{\circ}\text{C}$; h_c 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 。我国根据文献[23]中夏季空调设计条件, I_{PMV} 的范围为: $-1 \leq I_{\text{PMV}} \leq 1$ 。

由于不同个体对舒适度标准有明显差异,当多数人满意时,有少数人对室内环境仍感到不舒适,因此利用预测不满意百分比(predicted percentage of dissatisfied, PPD)来表示人们对热环境的不满意百分数。热舒适度指标与用户对热环境的不满意程度之间换算关系

$$I_{\text{PPD}} = 100 - 95 \exp^{[-(0.03353I_{\text{PMV}}^4 + 0.2179I_{\text{PMV}}^2)], \quad (8)$$

式中: I_{PPD} 为用户对热环境的不满意程度。

柔性空调的用户满意度

$$F_3 = 1 - \frac{I_{\text{PPD}}}{100}. \quad (9)$$

I_{PMV} 与 I_{PPD} 的对应关系如图3所示。

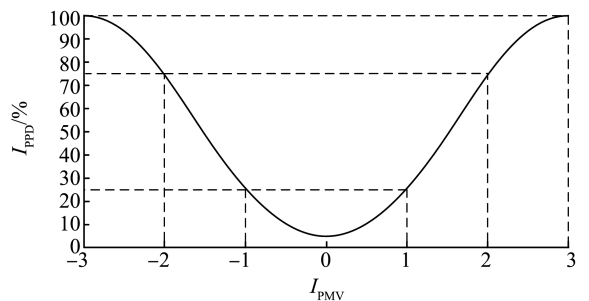


图3 I_{PMV} 与 I_{PPD} 的对应关系

Fig.3 The relationship between I_{PMV} and I_{PPD}

I_{PMV} 、 I_{PPD} 与热感觉之间对应关系如表1所示。

表1 I_{PMV} 、 I_{PPD} 与热感觉对应表

Table 1 The corresponding relationship between I_{PMV} , I_{PPD} and thermal sensation

I_{PMV}	热感觉	$I_{PPD}/\%$
+3	热	100
+2	暖和	75
+1	稍微暖和	25
0	舒适	5
-1	稍微凉快	25
-2	凉快	75
-3	冷	100

2.4 模型线性化

柔性照明满意度模型和柔性空调满意度模型都是非线性模型。为了降低计算复杂度,提高求解质量,将上述问题线性化为线性规划问题。

分段线性化的原理为:将非线性函数的取值范围平均分为 K 个区间,并在每个区间内引入二元变量 z 和连续性变量 w 构建成一个线性函数,用构成的 K 个线性函数来逼近原非线性函数。分段线性函数可以表示为

$$x = \sum_{k=1}^{K+1} w_k a_k, \quad (10)$$

$$y = \sum_{k=1}^{K+1} w_k f(a_k), \quad (11)$$

式中, x 为照明照度或空调 PMV 的值, y 为对应的满意度指标, k 为区间的索引, a_k 为区间 k 的起始点, f 为原始函数, w_k 为区间端点 a_k 的系数。 w_k 需要满足以下约束条件

$$w_1 \leq z_1, w_k \leq z_{k-1} + z_k, w_{K+1} \leq z_K, \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^{K+1} w_k = 1, \quad (13)$$

$$0 \leq w_k \leq 1, \forall k \in \{1, \dots, K\}, \quad (14)$$

式中, w_1 和 z_1 分别为区间 1 的端点系数和二元状态, z_k 为区间 k 的二元状态, z_K 为区间 K 的二元状态, w_{K+1} 为区间 K 的末端端点的系数。其中 z_k 需要满足以下约束

$$\sum_{k=1}^K z_k = 1, z_k \in \{0, 1\}, \forall k \in \{1, \dots, K\}. \quad (15)$$

柔性照明满意度函数线性化前后的图像如图 4 所示,柔性空调 I_{PMV} - I_{PPD} 函数线性化前后的图像如图 5 所示。两图中黑色实线为线性化前的原函数图像,红色虚线为分段线性化后的图像。图 4、5 中 z_i 是当前区间的状态,取值为 0 或 1; a_1 、 a_2 分别为区间 1 的起始点和终点, a_{K+1} 表示照度(或者 I_{PMV})的最大值。

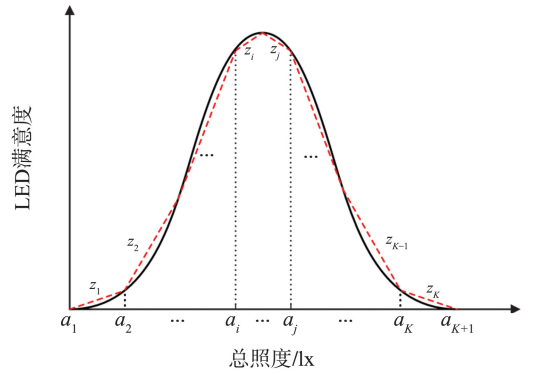


图4 LED 满意度线性化前后对比
Fig.4 Comparison of LED satisfaction before and after linearization

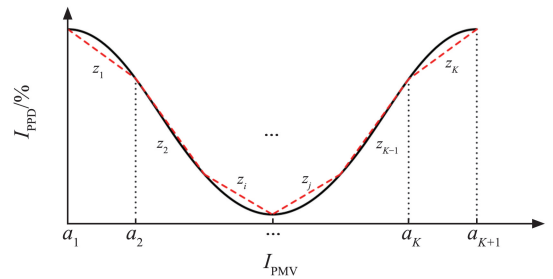


图5 I_{PMV} - I_{PPD} 线性化前后对比
Fig.5 Comparison of I_{PMV} - I_{PPD} before and after linearization

3 考虑用户满意度的智能建筑能源优化模型

3.1 目标函数

智能建筑能源优化系统以日运行成本最低和用户满意度最高为目标,是个典型的多目标函数优化问题。智能建筑日运行成本主要包括各设备的维护成本和折损成本、电网购售电成本。用户满意度主要包括电动汽车满意度、柔性照明满意度和柔性空调满意度。

3.1.1 日运行成本目标

智能建筑能源调度系统日运行成本为

$$F_4 = \sum_{t=1}^N (M_{dis_PV}(t) + M_{mt_PV}(t) + M_{dis_ESS}(t) + M_{mt_ESS}(t) + M_{dis_EV}(t) + M_{mt_EV}(t) + M_{Grid}(t)), \quad (16)$$

式中: N 为调度周期内的采样个数; $M_{dis_PV}(t)$ 、 $M_{mt_PV}(t)$ 分别为光伏的折损和维护费用,元; $M_{dis_ESS}(t)$ 、 $M_{mt_ESS}(t)$ 分别为储能系统的折损和维护费用,元; $M_{dis_EV}(t)$ 、 $M_{mt_EV}(t)$ 分别为电动汽车的折损和维护费用,元; $M_{Grid}(t)$ 为智能建筑与电网购售电的费用^[24],元。

智能建筑能源调度系统日运行成本包括分布式光伏发电、储能系统、电动汽车的维护和折损成本。

折损成本表达式为

$$\begin{cases} M_{\text{dis}}(t) = \varepsilon \cdot \frac{M_0}{hP_{r2}} \cdot P(t) \\ \varepsilon = \frac{(1+a)^b \cdot a}{(1+a)^b - 1} \end{cases}, \quad (17)$$

式中: $M_{\text{dis}}(t)$ 为设备的折损费用, 元; ε 为折损率; M_0 为单位功率初始投入费用, 元/(kWh); h 为设备年运行小时数, $h=8760$; P_{r2} 为储能和电动汽车的额定充放电功率或光伏额定功率, kW; $P(t)$ 为储能、电动汽车充放电功率或光伏发电功率, kW; a 为折旧率, b 为设备使用年限。

维护成本表达式为

$$M_{\text{mt}}(t) = C_{\text{mt}} \cdot P(t), \quad (18)$$

式中: $M_{\text{mt}}(t)$ 为各设备的维护费用, 元; $P(t)$ 为储能和电动汽车充放电功率或光伏发电功率, kW; C_{mt} 为单位功率维护费用, 元/kWh。

(2) 电网交互成本

智能建筑根据分时电价与大电网进行交互, 交互成本模型如下

$$M_{\text{Grid}}(t) = P_{\text{Grid}}(t) \cdot M_{\text{price}}(t), \quad (19)$$

$$M_{\text{price}}(t) = \begin{cases} m_p, & t \in T_p \\ m_f, & t \in T_f \\ m_g, & t \in T_g \end{cases}, \quad (20)$$

式中: $M_{\text{Grid}}(t)$ 为智能建筑与电网交互总费用, 元; $P_{\text{Grid}}(t)$ 为智能建筑向电网买电或者卖电的功率, kW; $M_{\text{price}}(t)$ 为智能建筑向电网买电或者卖电的单位功率价格, 元/kWh, T_p 为平时时段的单位功率电价; m_p 为平时时段的单位功率电价; T_f 为峰时时段的单位功率电价; m_f 为峰时时段的单位功率电价; T_g 为谷时时段的单位功率电价; m_g 为谷时时段的单位功率电价。

3.1.2 总目标函数

本研究的能源优化策略考虑四个目标函数: 日运行成本最小、电动汽车用户满意度最大、柔性照明用户满意度最大和柔性空调用户满意度最大。4个目标函数的物理意义都不相同, 为了方便后续对模型优化求解, 需要先对其标么化处理, 再利用加权求和的方法将多目标问题模型转化为单目标问题模型。4个目标函数线性加权后的目标函数为:

$$F = \min \{-\omega_1 F_1 - \omega_2 F_2 - \omega_3 F_3 + \omega_4 F_4 / F_{\text{max}}\}, \quad (21)$$

式中: F_{max} 为3个用户满意度均取最大时的智能建筑日运行成本, 元; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为本研究的4个目标函数的权重系数^[25], 满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$ 。

3.2 约束条件

系统约束条件包括功率平衡约束、储能系统、电动汽车的充放电功率约束、电池荷电状态约束、建筑与电网的交互功率约束以及柔性负荷的功率约束。

(1) 功率平衡约束

功率平衡约束表达式为

$$\begin{aligned} P_{\text{Load}}(t) + P_{\text{LED}}(t) + P_{\text{AC}}(t) + P_{\text{Grid}_s} + \\ P_{\text{ESS}_c}(t) + P_{\text{EV}_c}(t) = \\ P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{Grid}_b}(t) + P_{\text{ESS}_d}(t) + P_{\text{EV}_d}(t), \end{aligned} \quad (22)$$

式中: $P_{\text{Load}}(t)$ 为智能建筑的固定负荷功率, kW; $P_{\text{LED}}(t)$ 为LED照明功率, kW; $P_{\text{AC}}(t)$ 为柔性空调使用功率, kW; $P_{\text{ESS}_c}(t)$ 、 $P_{\text{ESS}_d}(t)$ 分别是储能系统的充放电功率, kW; $P_{\text{EV}_c}(t)$ 、 $P_{\text{EV}_d}(t)$ 分别为电动汽车的充放电功率, kW; $P_{\text{Grid}_s}(t)$ 、 $P_{\text{Grid}_b}(t)$ 分别为智能建筑与公用电网进行交互时的售电功率和买电功率, kW。

(2) 功率上下限约束

为了避免求解过程中出现设备同时充电、放电的情况, 引入布尔变量表示各设备的充电、放电状态以及向建筑购电、售电状态^[26]。设备的充放电状态以及向建筑购电、售电状态为

$$\begin{cases} U_c^s(t) + U_d^s(t) \leq 1 \\ U_{\text{Grid}_b}(t) + U_{\text{Grid}_s}(t) \leq 1 \\ U_c^s(t), U_d^s(t), U_{\text{Grid}_b}(t), U_{\text{Grid}_s}(t) \in \{0, 1\} \end{cases}, \quad (23)$$

式中, $U_c^s(t)$ 、 $U_d^s(t)$ 分别为设备的充电、放电状态; $U_{\text{Grid}_b}(t)$ 、 $U_{\text{Grid}_s}(t)$ 分别为建筑的购电、售电状态。

设备充、放电功率以及建筑向电网购电、售电功率约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_c^s(t) \leq U_c^s(t) P_{c,\text{max}}^s \\ 0 \leq P_d^s(t) \leq U_d^s(t) P_{d,\text{max}}^s \\ 0 \leq P_{\text{Grid}_b}(t) \leq U_{\text{Grid}_b}(t) P_{\text{Grid}_b,\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{Grid}_s}(t) \leq U_{\text{Grid}_s}(t) P_{\text{Grid}_s,\text{max}} \end{cases}, \quad (24)$$

式中: $P_c^s(t)$ 、 $P_d^s(t)$ 分别为设备充电、放电功率, kW; $P_{c,\text{max}}^s$ 、 $P_{d,\text{max}}^s$ 分别为设备的最大充电、放电功率, kW; $P_{\text{Grid}_b}(t)$ 、 $P_{\text{Grid}_s}(t)$ 分别为建筑向电网购电、售电功率, kW; $P_{\text{Grid}_b,\text{max}}$ 、 $P_{\text{Grid}_s,\text{max}}$ 分别为建筑向电网购电、售电的最大功率, kW。

(3) 储能系统和电动汽车电池荷电状态约束

储能系统和电动汽车的电池荷电状态需要满足以下约束条件

$$\begin{cases} E_{\text{end}} = E_{\text{Ini}} \\ E_{\text{min}} \leq E(t) \leq E_{\text{max}} \end{cases}, \quad (25)$$

式中: E_{ini} 、 E_{end} 分别为调度期间内储能系统的始末荷电状态,为了保证智能建筑能源调度系统的持续平稳运行,保证调度期间内储能系统始末荷电状态相同; E_{max} 、 E_{min} 分别是储能系统和电动汽车电池荷电状态所允许的最大值和最小值。

(4) 柔性负荷可调节容量约束

LED 和柔性空调 AC 系统作为柔性负荷,可调度容量也要满足一定约束,其调度容量约束的表达式为

$$P_{LED_min}(t) \leq P_{LED}(t) \leq P_{LED_max}(t), \quad (26)$$

式中: $P_{LED}(t)$ 为 LED 的总负荷功率, kW; $P_{LED_min}(t)$ 、 $P_{LED_max}(t)$ 分别为 LED 可调度的最大、最小功率, kW。柔性空调负荷与柔性照明负荷功率上下限约束形式相同。

基于第 2 章建立的系统各部分模型,通过 CPLEX 求解可得到智能建筑能源优化系统的各设备运行策略。智能建筑能源优化模型如图 6 所示。

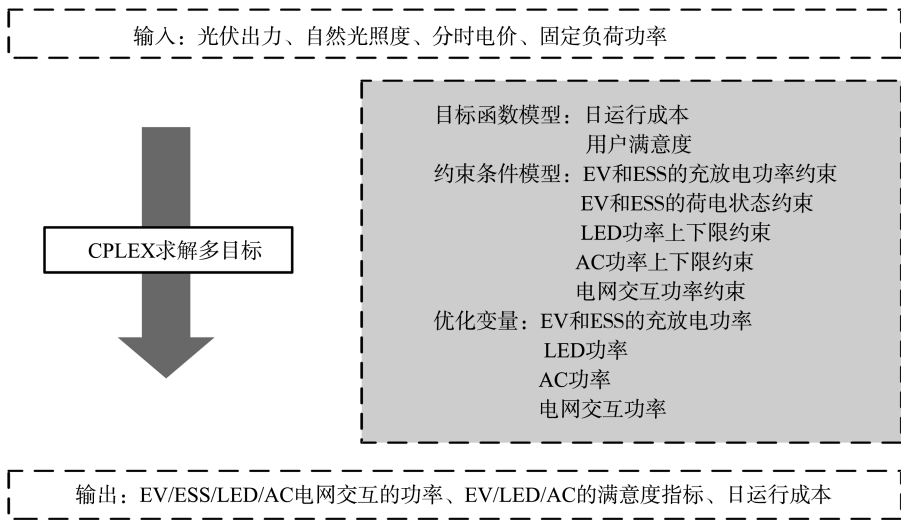


图 6 智能建筑能源优化模型

Fig.6 Energy optimization model of intelligent building

4 算例分析

4.1 系统设备初始参数

以我国北方某地区的办公建筑为研究对象,假设智能建筑能源调度系统中的可调节负荷——电动汽车、LED 照明、柔性空调参与系统调度的时间段为 7:00—19:00。其中假设参与调度的电动汽车数量为 3 辆,蓄电池容量均为 40 kWh,允许的充放电功率为 7 kW,充放电效率为 0.95,并且假设三辆电动汽车在参与开始调度时刻的 SOC 分别为 0.4, 0.45, 0.5,在调度结束时刻用户所期望的电动汽车 SOC 为 0.75。智能建筑内配备的储能系统容量为 100 kWh,最大充放电功率为 25 kW,充放电效率均

为 0.95,并且假设在参与调度时,始末 SOC 均为 0.3。智能建筑与公用电网根据分时电价进行双向互动完成能源的购买和出售,两者最大交互功率为 60 kW,分时电价将整个调度周期分为峰谷平三种时段。峰时时段为 [10: 00, 15: 00]、[18: 00, 21:00],此时的购电价格为 1.2 元/(kWh);谷时时段为[23:00,次日 7:00]、[15:00,18:00],此时的购电价格为 0.3 元/(kWh);平时时段为 [7: 00, 10:00]、[21:00,23:00],此时的购电价格为 0.78 元/(kWh)。售电价格在峰谷平三种时段的价格相同,均为 0.5 元/(kWh)。系统分布式光伏、储能系统、电动汽车的参数设置如表 2 所示。自然光照度、室外环境温度、光伏输出功率以及智能建筑固定负荷功率如表 3 所示。

表 2 光伏、储能系统、电动汽车的参数

Table 2 Parameters of PV, ESS, EV

设备名称	额定功率上限/kW	安装成本/元·(kWh ⁻¹)	寿命年限/a	折旧率	维护成本/元·(kWh ⁻¹)
PV	40	0.675	20	0.070	0.020
ESS	30	0.060	10	0.063	0.045
EV	30	0.060	8	0.098	0.045

表3 光伏输出功率、固定负荷能耗、室外温度以及自然光照度

Table 3 Photovoltaic output power, fixed load energy consumption, outdoor temperature and natural illumination

时间/h	P_{pv}/kW	P_{load}/kW	$T_{out}/^{\circ}C$	L_{nature}/lx
1	0	31.48	28.8	0
2	0	28.96	28.6	0
3	0	27.70	28.3	0
4	0	25.81	28.1	0
5	0	25.18	27.9	0
6	8.840	31.48	28.4	0
7	23.140	40.93	29.3	21.47
8	37.414	48.49	30.4	30.85
9	66.508	49.75	31.4	44.93
10	82.212	58.57	32.3	68.40
11	94.484	61.09	33.2	77.90
12	96.642	64.87	34.0	96.56
13	94.510	68.02	34.5	105.95
14	87.724	62.98	34.8	105.95
15	75.478	63.61	34.7	87.29
16	62.088	61.72	34.2	68.40
17	38.506	59.19	33.9	44.93
18	17.030	54.16	33.1	30.85
19	3.796	52.90	33.2	21.47
20	0	48.49	31.2	0
21	0	40.93	30.5	0
22	0	33.37	30.0	0
23	0	31.48	29.4	0
24	0	33.37	28.8	0

4.2 智能建筑能源优化调度策略分析

由于本研究的智能建筑能源优化调度模型中同时考虑了日运行成本和用户满意度,所以本节研究以下3种情况。

策略1:优先考虑用户满意度,在满足用户满意度最高的情况下使智能建筑能源调度运行成本最低。

策略2:优先考虑建筑日运行成本,在满足日运行成本最低的情况下尽量保证用户的满意程度最高。

策略3:仅考虑建筑日运行成本,考虑EV、LED、AC参与系统能源调度的传统方式,即三者均为固定负荷参与智能建筑的能源调度,EV只作为负荷,不再向建筑提供电能,LED不根据自然光照度进行调节,AC也不再根据室内温度变化调整功率。

根据提出的以上3种情况,列出相应的目标权重系数,如表4所示。

表4 优化目标的权重系数

Table 4 The weight coefficients of optimization objectives

策略	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
1	2/7	2/7	2/7	1/7
2	1/7	1/7	1/7	4/7
3				1

注:因策略3中未考虑用户满意度,因此此处无数值。

将权重系数代入智能建筑能源优化模型,并通过CPLEX对模型求解,策略1的调度结果以及电动汽车SOC数据、室内温度变化和室内总照度变化如图7~11所示,策略2的调度结果以及电动汽车SOC数据、室内温度变化和室内总照度变化如图12~16所示。

策略3的调度结果以及电动汽车SOC数据、室内温度变化和室内总照度变化如图17~21所示。图7~21中, P_{Gridb} 、 P_{Grids} 分别为向电网购电、售电的功率; P_{ESSs} 、 P_{ESSc} 和 P_{EVd} 、 P_{EVc} 分别表示储能系统和电动汽车的充放电功率; P_{EV1c} 、 P_{EV2c} 、 P_{EV3c} 、 P_{EV1d} 、 P_{EV2d} 、 P_{EV3d} 分别表示三辆电动汽车的充放电功率; P_{LED} 和 P_{AC} 分别表示柔性照明和柔性空调消耗的功率; C_{EV1} 、 C_{EV2} 、 C_{EV3} 分别表示三辆电动汽车的剩余电池电量; T 和 L 分别表示室内温度和室内总照度。

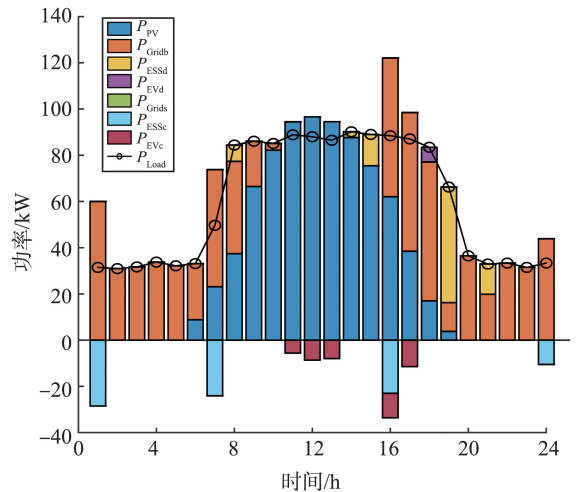


图7 策略1中各设备调度结果

Fig.7 The scheduling results of each device in strategy 1

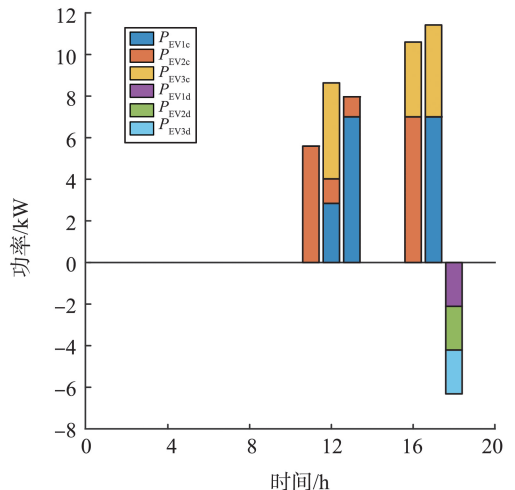


图8 策略1电动汽车充放电功率

Fig.8 Charging and discharging power of EV in strategy 1

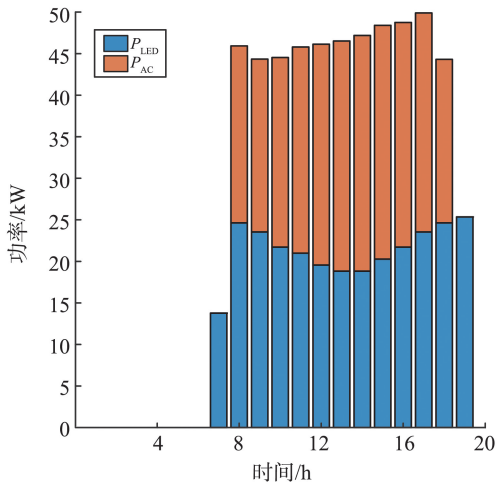


图9 策略1下柔性LED、AC的功率

Fig.9 The power of LED and AC in strategy 1

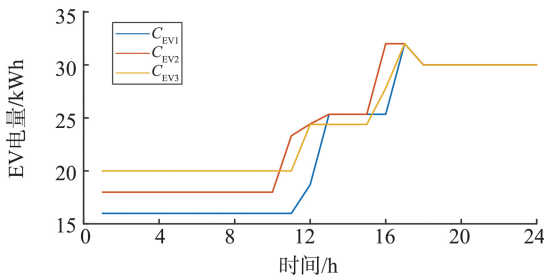


图10 策略1中电动汽车SOC的变化情况

Fig.10 EVs' SOC variation in strategy 1

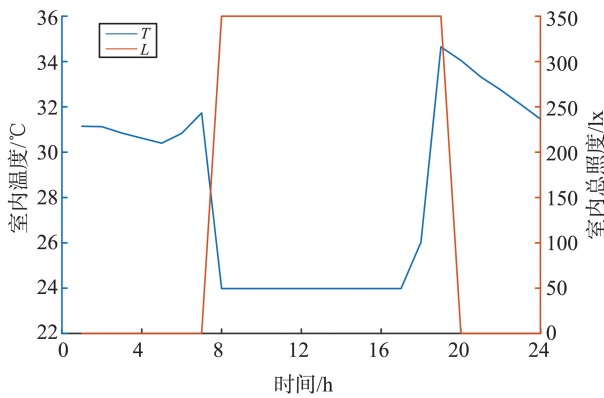


图11 策略1中室内温度和室内总照度的变化情况

Fig.11 Indoor temperature and total illuminance variations in strategy 1

从图7中可看出:在23:00—次日1:00、6:00—7:00和16:00—17:00在电价低谷时期,建筑从公用电网尽可能多地购买电能,在满足建筑内部用能的同时将一部分电能存储在储能系统和电动汽车中;在8:00—15:00,智能建筑的电能主要来源于可再生能源光伏发电,此时正值电价峰值时段,光伏所发电量基本可以满足建筑内部负荷需求,可以减少甚至不向电网购电;光伏发电过剩时,即11:00—13:00期间,可以选择将剩余电量存储在储能系统和电动汽车中,以备在用电高峰期或者电价高峰期

放电来满足建筑的用电需求;在18:00—20:00电价峰值时期,此时光伏发电逐渐减少甚至不再出力,此时将电价低谷时期以及光伏发电过剩时期存储的电量供给智能建筑维持负荷需求,从而减少电网中买电,降低系统运行成本。

从图8、9中可以看出:当优先考虑EV、LED和AC三者的用户满意度时,电动汽车EV大部分处于充电状态。在满足用户舒适度的前提下,考虑减少运行成本,因此在智能建筑光伏发电不足且电价较高的情况下,释放电能供建筑负荷使用,并保证调度结束时刻的电动汽车SOC是用户期待的SOC,保证用户满意度为1。

由图9可以看出:当优先考虑用户满意度时,LED和AC在7:00—19:00均保持较高的功率消耗,但是由于两者均是柔性可调负荷,LED可以根据室内自然光照度的变化对照度调节,AC可以根据室内温度的变化和人体舒适度对空调功率调节,因此二者可以做到在保证用户满意度最高的同时达到减少功率消耗的目的。结合图10、11可以看出:该策略下的电动汽车的SOC一直呈现上升状态,为了达到期望的SOC,在调度结束前进行放电操作,此操作也一定程度上减少了成本消耗。

从图12中可以看到:在8:00—19:00,负荷需求明显比策略1中少,这就使得此期间会产生多余的电能;9:00—15:00,建筑内部负荷需求小于可再生能源光伏的产能,因此在满足建筑内部负荷用电的情况下,可将多余电能售卖给公用电网,以此来增加收益减少日运行成本,但是低成本是牺牲用户满意度换来的结果,这种情况在实际应用中是不理想的。

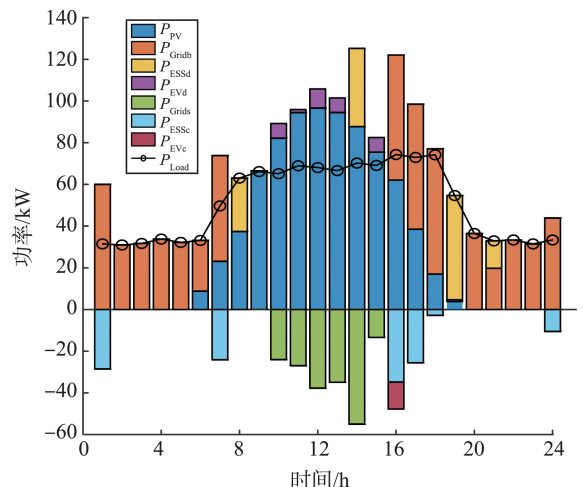


图12 策略2中各设备调度结果

Fig.12 The scheduling results of each device in strategy 2

从图13、14可以看出,与优先考虑满意度时

的柔性负荷功率消耗相比,优先考虑成本策略下的柔性负荷功率消耗呈现明显的下降趋势,LED最大和最小功率功率差将近 15 kW,这是优先考虑用电成本策略下,在用电负荷高峰时期,为了减少用电成本而大幅度减少柔性照明用电的结果,但这种结果可能导致用户满意度过低而不符合实际用电情况。

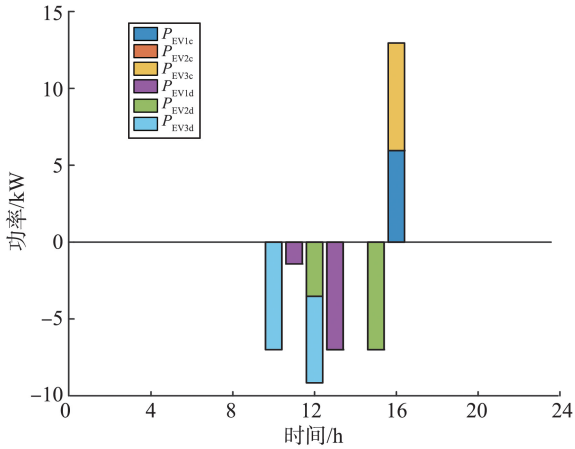


图 13 策略 2 电动汽车充放电功率

Fig.13 Charging and discharging power of EV in strategy 2

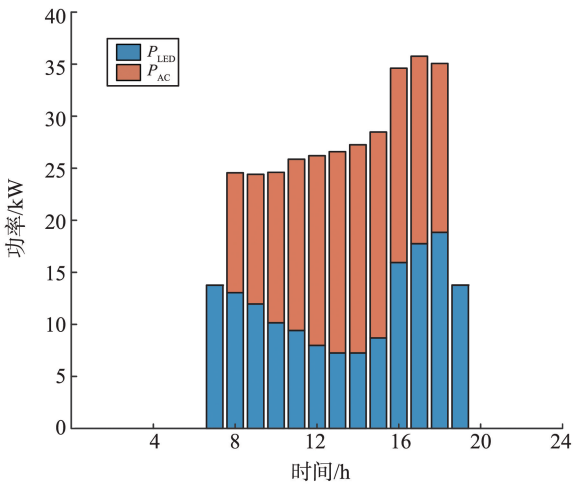


图 14 策略 2 中柔性 LED、AC 的功率

Fig.14 The power of LED and AC in strategy 2

从图 15、16 可以看出,由于优先考虑成本,电动汽车 SOC 在调度结束时未能达到期望的 SOC 并且最终 SOC 值过低,此外在调度期间室内温度和室内总照度也不理想,室内温度整体偏高、室内总照度整体偏低,策略 2 得到的结果虽然能满足日运行成本最低,但是可能与实际用电情况相差太大。

从图 17—19 中可以看出,当 EV、LED 和 AC 开始参与智能建筑的能源调度时(7:00),就以固定功率持续消费电能,与 EV、LED 和 AC 作为柔性负荷时消耗的功率相比增大很多,这无疑增加了智能建筑的用电压力以及运行成本。

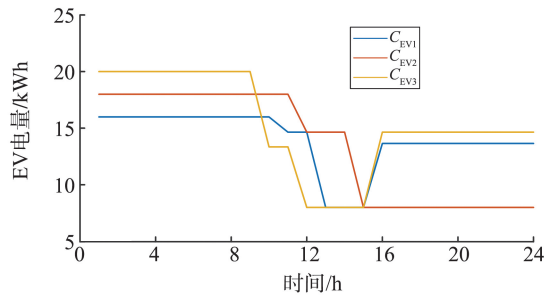


图 15 策略 2 中电动汽车 SOC 的变化情况

Fig.15 EVs' SOC variation in strategy 2

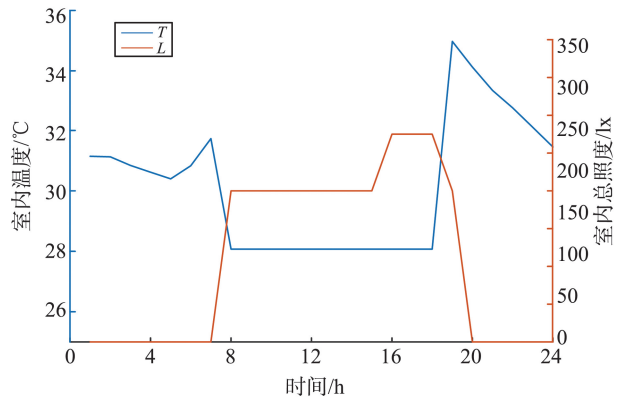


图 16 策略 2 中室内温度和室内光照度的变化情况

Fig.16 Indoor temperature and total illuminance variations in strategy 2

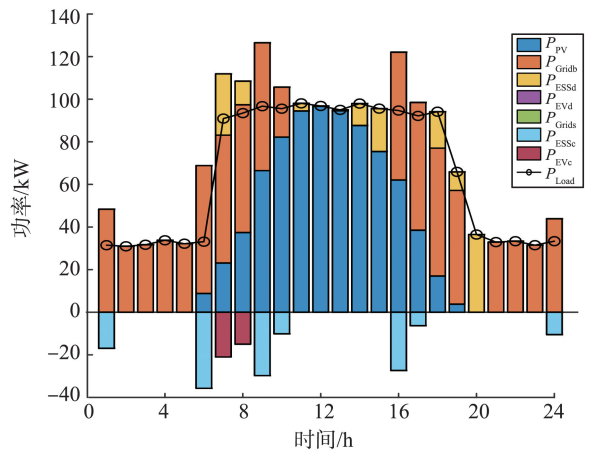


图 17 策略 3 中各设备调度结果

Fig.17 The scheduling results of each device in strategy 3

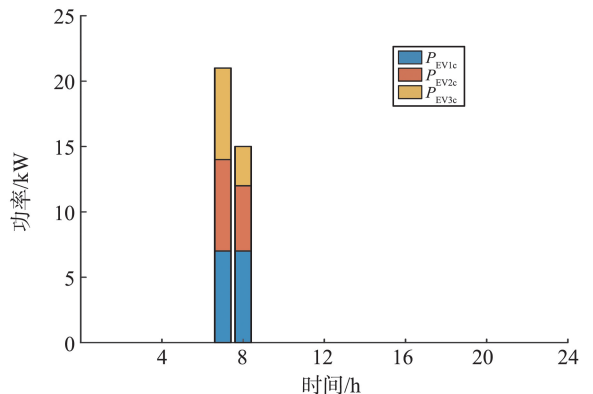


图 18 策略 3 电动汽车充放电功率

Fig.18 Charging and discharging power of EV in strategy 3

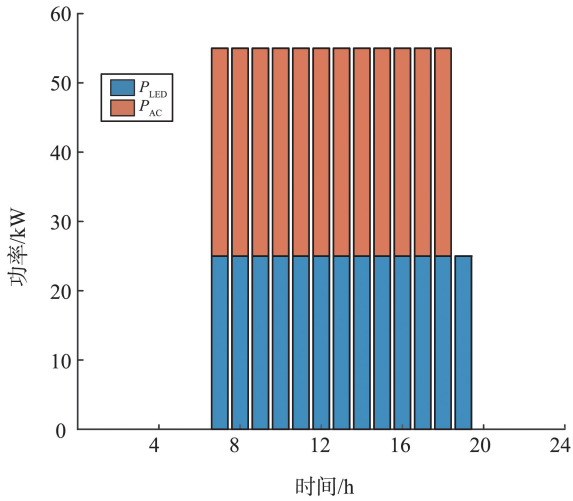


图 19 策略 3 LED、AC 消耗功率分布

Fig.19 The power of LED and AC in strategy 3

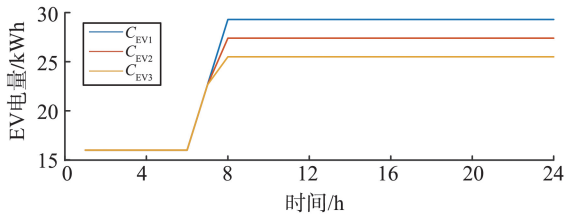


图 20 策略 3 中电动汽车 SOC 的变化情况

Fig.20 EVs' SOC variation in strategy 3

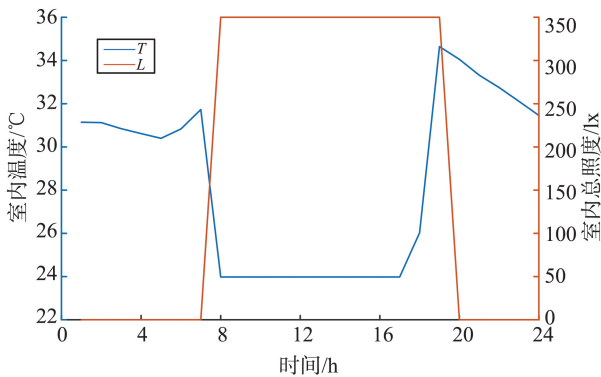


图 21 策略 3 室内温度和室内总照度的变化情况

Fig.21 Indoor temperature and total illuminance variations in strategy 3

根据图 20、21 可以看出,在策略 3 中由于 EV、LED 和 AC 均以固定功率消耗电能,电动汽车 SOC 在前 2 h 便已经达到期望数值并且此后不再变化,室内温度处于较低状态,室内总照度处于较高的状态,室内温度和室内总照度的变化趋势与策略 1 中的结果大致相同。

为了验证本研究的策略在使用加权求和的方法下的有效性,将考虑 4 个目标函数的多目标问题在 NSGA-II 方法下求解,并通过模糊决策获得最终综合最优解。3 个策略以及利用 NSGA-II 求解的 4 个目标函数的优化结果如表 5 所示。

表 5 不同策略的结果对比

Table 5 Comparison of the results of different strategies

策略	F_1	F_2	F_3	$F_4/\text{元}$
1	1.00	1.00	0.95	360.22
2	0.40	0.45	0.75	200.71
3				452.80
NSGA-II	1.00	0.96	0.92	393.00

注:策略 3 中未考虑用户满意度,因此此处没有数值。

策略 1 优先考虑用户的满意度,其次保证成本最低,因此它的优化结果电动汽车满意度为 1,LED 满意度为 1,AC 满意度为 0.95,日运行成本为 360.22 元。策略 2 是优先考虑运行成本其次考虑用户满意度,因此得到的优化结果为:电动汽车满意度为 0.40,LED 用户满意度为 0.45,AC 用户满意度为 0.75,日运行成本为 200.71 元。策略 3 只考虑建筑日运行成本,未考虑负荷柔性参与建筑能源调度也未考虑用户满意度,最终得到的最优日运行成本为 452.80 元。

通过对比结果可以发现:虽然策略 2 的日运行成本比策略 1 低很多,但是用户满意度也很低,对于智能建筑这种以人为主体的对象中,用户满意度至关重要;策略 2 这种以牺牲用户满意度达到成本降低的目的在实际应用中是不可取的;策略 3 描述比较传统的建筑能源优化方式,只考虑运行成本未考虑建筑内部的负荷可柔性的参与调度,因此得到的成本偏高。将本研究的策略利用 NSGA-II 和模糊决策结合的方法求解得到的结果为,电动汽车满意度、LED 满意度、AC 满意度与策略 1 的满意度接近,但是日运行成本却高很多。

5 结论

为了解决智能建筑的节能减排问题,本研究提出了一个兼顾运行成本和用户满意度的智能建筑能源调度策略。以智能建筑的日运行成本最小、电动汽车满意度最大、柔性照明满意度最大和柔性空调满意度最大为优化目标,提出一种考虑用户满意度的智能建筑多目标优化模型,采用加权求和的方法,对多目标进行处理,然后利用 CPLEX 求解器对模型进行求解。此外将其与传统的建筑调度等其他策略进行对比分析,可以得到以下结论。

(1) 在智能建筑的能源优化调度中,将电动汽车、LED、AC 作为柔性负荷并考虑其满意度,能够有效提升用户体验、降低运行成本。

(2) 本研究选择的加权求和的方法处理多目标

问题得到的结果更佳,在保证满意度最高的同时可以求解得到最低日运行成本。

综上所述,本研究的智能建筑能源优化调度策略能够有效减少日运行成本,同时保证智能建筑用户的满意度最高,为建筑的节能减排提供有效手段。

参考文献:

- [1] QI X Y, HAN Y. Energy quota trading can achieve energy savings and emission reduction: evidence from China's pilots[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(37): 52431-52458.
- [2] 张恒旭, 曹永吉, 张怡, 等. 电力系统频率动态行为衍变与分析方法需求综述[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2021, 51(5): 42-52.
ZHANG Hengxu, CAO Yongji, ZHANG Yi, et al. Review of frequency dynamic behavior evolution and analysis method requirements of power system [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2021, 51(5): 42-52.
- [3] 张恒旭, 高志民, 曹永吉, 等. 高比例可再生能源接入下电力系统惯量研究综述及展望[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2022, 52(5): 1-13.
ZHANG Hengxu, GAO Zhimin, CAO Yongji, et al. Review and prospect of research on power system inertia with high penetration of renewable energy source [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2022, 52(5): 1-13.
- [4] LI C Z, ZHANG L M, LIANG X, et al. Advances in the research of building energy saving [J]. *Energy and Buildings*, 2022, 254: 111556.
- [5] 颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 等. 计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(17): 69-79.
YAN Xiangwu, WANG Qing'ao, LU Junda, et al. Microgrid energy scheduling with electric vehicles and flexible loads[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(17): 69-79.
- [6] 李文升, 刘晓明, 曹永吉, 等. 考虑电力系统灵活性的网-储联合规划[J]. *智慧电力*, 2023, 51(4): 30-37.
LI Wensheng, LIU Xiaoming, CAO Yongji, et al. Joint planning of energy storage and transmission line considering power system flexibility [J]. *Smart Power*, 2023, 51(4): 30-37.
- [7] 陈宇星, 梁芙蓉, 尤炜, 等. 含分布式光伏的配电网模型预测控制优化方法[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6): 100-109.
CHEN Yuxing, LIANG Furong, YOU Wei, et al. Model predictive control optimization method for distribution network containing distributed photovoltaics [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(6): 100-109.
- [8] 孙东磊, 孙可奇, 杨金叶, 等. 考虑灵活性需求的电力系统优化调度[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2022, 52(1): 120-127.
SUN Donglei, SUN Keqi, YANG Jinye, et al. Power system optimal dispatch considering the requirements of flexibility [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2022, 52(1): 120-127.
- [9] FOROOZANDEH Z, RAMOS S, SOARES J, et al. Goal programming approach for energy management of smart building[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 25341-25348.
- [10] 李泽宁, 苏粟, 靳小龙, 等. 面向提高风电接纳能力的智慧建筑能量管理策略[J]. *电网技术*, 2021, 45(6): 2288-2298.
LI Zening, SU Su, JIN Xiaolong, et al. Energy management strategy of smart buildings for improving wind power accommodation ability [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(6): 2288-2298.
- [11] 胡鹏, 艾欣, 杨昭, 等. 考虑电能共享的综合能源楼宇群日前协同优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(8): 239-245.
HU Peng, AI Xin, YANG Zhao, et al. Day-ahead optimal scheduling for cluster building with integrated energy system considering power sharing [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(8): 239-245.
- [12] 潘帅琪, 魏繁荣, 林湘宁, 等. 光伏建筑一体化社区热电联供调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(4): 24-35.
PAN Shuaiqi, WEI Fanrong, LIN Xiangning, et al. Dispatch strategy of heat and power cogeneration in building integrated photovoltaic [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(4): 24-35.
- [13] 王超, 潘麟, 刘博, 等. 新农村能源系统供用能特征分析与运行优化[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2024, 54(3): 149-159.
WANG C, PAN L, LIU B, et al. Characteristic analysis and operational optimization of energy system in new rural areas [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2024, 54(3): 149-159.
- [14] 刘振, 孙媛媛, 李亚辉, 等. 基于用户行为预测的分布式光伏智能社区需求响应策略[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2022, 52(5): 24-34.
LIU Zhen, SUN Yuanyuan, LI Yahui, et al. Demand response strategy for distributed photovoltaic smart community based on model prediction of user behavior analysis [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2022, 52(5): 24-34.
- [15] RAZMARA M, BHARATI G R, SHAHBAKHTI M, et al. Bilevel optimization framework for smart building-to-

- grid systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 582-593.
- [16] HUSSAIN M S, ALI ABBAS KAZMI S, KHAN Z A, et al. Hierarchical energy management system with a local competitive power market for inter-connected multi-smart buildings[J]. IEEE Access, 2022, 10: 19493-19506.
- [17] TOOPSHEKAN A, ABEDIAN A, AZIZI A, et al. Optimization of a CHP system using a forecasting dispatch and teaching-learning-based optimization algorithm[J]. Energy, 2023, 285:128671.
- [18] KORKAS C D, TERZOPOULOS M, TSAKNAKIS C, et al. Nearly optimal demand side management for energy, thermal, EV and storage loads; an Approximate Dynamic Programming approach for smarter buildings [J]. Energy and Buildings, 2022, 255: 111676.
- [19] 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): 699-708.
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): 699-708.
- [20] MOUSAVIZADE M, BAI F F, GARMABDARI R, et al. Adaptive control of V2Gs in islanded microgrids incorporating EV owner expectations [J]. Applied Energy, 2023, 341: 121118.
- [21] 刘景余. LED照明负荷参与电力系统一次调频与备用优化配置研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
LIU Jingyu. Research on LED lighting load participating in primary frequency modulation and standby optimal configuration of power system [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [22] 孙毅, 张辰, 李泽坤, 等. 计及多区域用户差异化PMV的柔性负荷多功率级调控策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7574-7585.
SUN Yi, ZHANG Chen, LI Zekun, et al. Flexible load multi-power level control strategy taking into account the differentiated PMV of multi-region users[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7574-7585.
- [23] 中华人民共和国建设部. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 134—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [24] MEHMOOD F, KHAN B, ALI S M. Renewable generation intermittence and economic dispatch control of autonomous microgrid with distributed sliding mode[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 130:106937.
- [25] SHI Y, WANG R, CHEN P F. Multi-criteria decision-making approach for energy-efficient renovation strategies in hospital wards: balancing energy, economic, and thermal comfort [J]. Energy and Buildings, 2023, 298: 113575.
- [26] 陈丽娟, 秦萌, 顾少平, 等. 计及电池损耗的电动公交车参与V2G的优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 52-60.
CHEN Lijuan, QIN Meng, GU Shaoping, et al. Optimal dispatching strategy of electric bus participating in vehicle-to-grid considering battery loss [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 52-60.

(编辑:熊小原)

(上接第44页)

- [20] LIU T, CHEN A, GAO F, et al. Double-loop control strategy with cascaded model predictive control to improve frequency regulation for islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 3954-3967.
- [21] ZHENG C, DRAGIĆEVIĆ T, BLAABJERG F. Model predictive control-based virtual inertia emulator for an islanded alternating current microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 7167-7177.
- [22] 王松. 一种基于神经网络的光伏电源最大功率控制系统[J]. 山东大学学报(工学版), 2004, 34(4): 45-48.
WANG Song. A maximum power control system of photovoltaic cells based on neural network[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2004, 34(4): 45-48.
- [23] 张博, 唐巍, 蔡永翔, 等. 基于一致性算法的户用光伏逆变器和储能分布式控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 86-94.
ZHANG Bo, TANG Wei, CAI Yongxiang, et al. Distributed control strategy of residential photovoltaic inverter and energy storage based on consensus algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 86-94.

(编辑:孙亚彤)