

基于粒子群算法的蓄直组合型电采暖系统运行优化策略

王 清¹, 李琮琮¹, 王平欣¹, 吴青青², 蔡小雨²

(1. 国网山东省电力公司营销服务中心(计量中心), 济南 250003;

2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要:为提高电采暖系统的用电能效,提出了一种基于粒子群算法(PSO, particle swarm optimization)的蓄直组合型电采暖系统运行优化策略。建立了电采暖建筑墙体内外影响因素数学模型,在确定电暖气数量前提下利用 Matlab 中的 Simulink 工具箱搭建整体系统。结合需求响应思想建立以用户采暖电费最小为目标函数,选取不同子模块构成控制模块实现仿真验证,并采用反余弦方法对学习因子进行更新的改进粒子群算法,对设定目标函数进行求解。最后通过山东济南某企业用电数据算例,对比能耗和经济性两个方面可得:全天总能耗低于实际的能耗、测得两个连续工作日电费相较未优化时分别节约了 17.16% 和 16.48%。

关键词:蓄直组合型电采暖; PSO 算法; Simulink; 需求响应

DOI: 10.15938/j.jhust.2023.01.014

中图分类号: TM924 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2023)01-0114-08

Operation Optimization Strategy of Commercial Combined Electric Heating System Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

WANG Qing¹, LI Congcong¹, WANG Pingxin¹, WU Qingqing², CAI Xiaoyu²

(1. State Grid Shandong Electric Power Company Marketing Service Center (Metering Center), Jinan 250003, China;

2. North China Electric Power University, School of Electrical and Electronic Engineering, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to improve the energy efficiency of the electric heating system, a particle swarm optimization (PSO, Particle Swarm Optimization)-based operation optimization strategy for the direct storage combined electric heating system is proposed. A mathematical model of influencing factors inside and outside the walls of electric heating buildings is established, and the simulink toolbox in matlab is used to build the overall system under the premise of determining the quantity of electric heating. Combining demand response ideas, the objective function is to establish the minimum heating and electricity cost of the user, and different sub-modules are selected to form the control module to achieve simulation verification, and the inverse cosine method is used to update the improved particle swarm algorithm to update the learning factor to solve the set objective function. Finally, through a calculation example of electricity consumption data of an enterprise in Jinan, Shandong, comparing energy consumption and economy can be obtained: the total energy consumption throughout the day is lower than the actual energy consumption, and the electricity bill is reduced by 17.16% compared with the unoptimized time.

Keywords: storage straight combined electric heating; PSO algorithm; Simulink; demand response

收稿日期: 2021-10-13

基金项目: 国网山东省电力公司科技(520626200020); 国家自然科学基金(2018J0553)。

作者简介: 李琮琮(1972—), 女, 硕士, 高级工程师;

吴青青(1995—), 女, 硕士研究生。

通信作者: 王 清(1979—), 男, 博士研究生, 高级工程师, E-mail: 1799726266@qq.com.

0 引 言

随着能源枯竭及全球变暖的加剧,各国对绿色能源的重视程度正在逐步提高,电能作为优质清洁能源,提高其在能源终端的占比至关重要。我国大力提倡用户用能电气化,电采暖以成本低、效率高、使用灵活、安装简易等优点被广泛运用^[1]。文[2]提出了家庭能源管理系统控制策略,利用分时电价和用户室内舒适度来控制家庭负荷以达到削峰填谷的目的。目前普遍投入使用的室温控制模式利用率较低,造成热量不必要的浪费,更无法体现峰谷电价的优势,导致高额电费的产生,这对电能替代的有效推广是十分不利的^[3]。

迄今为止,已有多位学者对提高电采暖系统的用电能效做出深入研究,文[4]基于自弹性和交叉弹性矩阵的理论,提出了一种用户需求响应行为模型。文[5-6]基于研究综合热负荷基础,透彻解释分布式电采暖负荷群调节能力。目前用户侧的需求响应行为主要在用户聚合层面上进行优化调度^[7]。文[8-11]中温控负荷的优化控制建模基础是以用电经济性的角度去考量,根据客户的需求不同,以有效性对温控负荷进行建模,通过模拟仿真的模式,去得到用电人群所需的各个响应模型。但是,电采暖系统的负荷行为不仅与经济水平有关,还受到房屋构造和室外的环境的影响,但该文献并未提及^[12-13]。从当前已有的研究来看,在建筑动态传热建模中,没有对影响室内温度的因素进行精细化考虑。

本文在汲取前人的研究基础上,提出蓄直组合型电采暖优化系统,建立考虑建筑墙体内外影响因素的数学模型,并通过改进学习因子的 PSO 算法对目标函数进行求解。将需求响应技术思想与电采暖优化相联系,对有效实现削峰填谷、匡助实现碳达峰、碳中和具有深远意义。

1 电采暖建筑动态传热建模

电采暖^[14-16]建筑动态传热影响室内温度变化,本文针对建筑围护结构考虑热负荷影响因素进行建模,墙体外部影响因素包括有太阳辐射,大气辐射;墙体内部影响因素包括:户间传热,人体温度。

1.1 墙体外部影响因素

1.1.1 太阳辐射模型为

$$Q_s = \partial_{A\theta} I_{A\theta} + \partial_{a\theta} I_{a\theta} \quad (1)$$

式中: Q_s 指太阳辐射热量(W/m^2); $\partial_{A\theta}$ 指太阳直射时,墙体外部对太阳辐射吸收率; $I_{A\theta}$ 指与水平面保持 θ 角斜方向所受到的来自太阳的辐射强度(W/m^2); $\partial_{a\theta}$ 为墙体外对太阳辐射散射的吸收率; $I_{a\theta}$ 与 $I_{A\theta}$ 所表达含义相似,不同的是此表达式表示的是太阳散射辐射强度(W/m^2)。

1.1.2 大气辐射模型

$$Q_B = \partial_c I_B \psi_B = \partial_c [C_b T_a^4 (0.51 + 0.208 \sqrt{P_a}) \Phi] \psi_B \quad (2)$$

式中: Q_B 指大气辐射热量(W/m^2); ∂_c 为大气辐射材料吸收率; I_B 为大气辐射强度(W/m^2); ψ_B 为角系数; C_b 为黑体辐射常数,值为 $5.67(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_a 为室外天气温度(K); P_a 为空气中水蒸气压力(kPa); Φ 为物体表面接受辐射的角系数。

1.2 墙体内部影响因素

1.2.1 户间传热模型

以居民用户为主的建筑房间之间采用的取暖设备不同,各户间温度不同从而导致户间传热现象,因此建立户间传热模型为

$$Q_C = \sum_{i=1}^n k_i S_i (t_a - t_b) \quad (3)$$

式中: Q_C 为户间传热热量(W/m^2); k_i 为建筑房间墙壁第 i 面的传热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; S_i 为墙第 i 面面积; $t_a - t_b$ 为室内与邻室温度之差。

1.2.2 人体温度模型

电采暖建筑考虑人体舒适度,因此考虑人体温度散热所提供的热量为

$$Q_D = n \Psi q_1 C_r \quad (4)$$

式中: Q_D 为人体散热热量(W/m^2); n 为居民用户室内人数; Ψ 为人群群居系数,取0.75为本文标准; q_1 为人体显热散热量,取85为本文标准; C_r 为人体显热散热系数,取1为本文标准。

1.3 仿真程序的实现

选取面积为 50m^2 的房间为初始研究对象,本章节仿真程序实现使用软件主要是 Matlab 中的 Simulink 工具箱,其特殊功能是可以使用户非常直观地对物理模型可视化。

1.3.1 电暖气数量的确定

电暖气数量根据房间设计热负荷确定,具体按

下式计算:

$$N = (1 + k) Q / Q_m \tag{5}$$

式中: N 为电暖气所需数量;计及实际状况下影响因素,如电压波动、功率衰减等; k 为附加运行系数取 0.2; Q 为房间热负荷值; Q_m 为有效功率值。

表 1 房间建筑材料保暖系数表

Table 1 Thermal coefficient of building materials in the room

保温类型	面层类型		
	瓷砖	塑料	木地板
聚苯板	0.16	0.21	0.23
泡沫混凝土	0.15	0.21	0.23

电暖气数量需在房间取暖前确定,本文模拟的房间面积为 50 m^2 ,设计热负荷为 60 W/m^2 ,由计算可得该房间设计热负荷为 $Q_h = 50 \times 60 = 3\,000\text{ W}$ 。以某品牌电暖气(尺寸 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$,功率 25 W/片)作为房间取暖设备,模拟房间内采用瓷砖为铺设材料,聚苯板为保温材料,房间建筑材料保暖系数由表 1 可查,从而根据以上可计算出所需要的电暖气总数量为: $N = 1.2 \times 3\,000 / (25 \times 0.84) \approx 170$ (片)。

1.3.2 仿真模块验证

通过仿真根据上述建立的电采暖建筑动态传热数学模型,进一步实现计算机仿真。

本文所提电采暖系统使用 Simulink 工具箱后,形成可视化如图 1 所示,包括太阳辐射模块、大气辐射模块、户间传热模块、人体温度模块、控制开关模块及热负荷计算模块等。

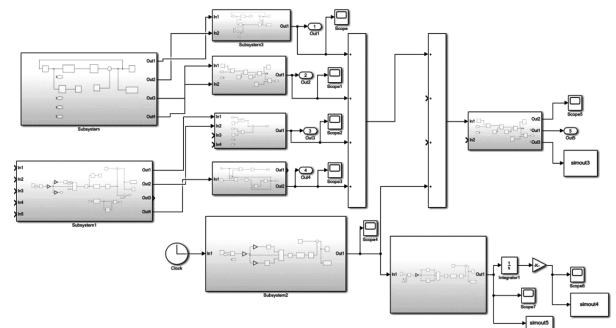


图 1 电采暖系统 Simulink 仿真图

Fig. 1 Simulink simulation of electric heating system

电采暖建筑室内温度计算过程如下:运行系统前先将建筑物室外温度、地理位置信息及材料保温系数数据输入 Simulink 模型中,然后对模型中仿真

时间和步长进行设置,最后运行程序。程序运行过程具体表现为首先通过太阳辐射和大气辐射对建筑外墙、门窗、地面及户间传热几个因素耗热量相加,由此可得房间实时热负荷。系统控制开关模块与实际生活中控制室温的温控设备精度一致,检测到输出的室内温度设定模块数据差值与实时室内温度,两者之间存在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的差距。当两者之差小于 1°C 时,实时室内温度比室内设定温度高 1°C ,开关模块输出 0,此时使能子系统为关闭状态,电采暖系统不提供热量;当两者之差大于 1°C 时,实时室内温度比室内设定温度低 1°C ,开关模块输出 1,此时使能子系统为工作状态,电采暖系统提供热量。最后室内温度和建筑耗热量等由 To Workspace 模块输出系统计算结果至 Matlab 工作空间,将以上结果导入 Excel 进行下一步数据分析处理。

2 基于粒子群算法的蓄直组合型运行优化策略

2.1 电采暖建筑的运行优化模型

在建立电采暖建筑动态传热建模的基础上,选取粒子群算法对模型求解,根据本文提出的蓄直组合型电采暖的需求响应思想,对算法进行设计。根据运行结果及收敛情况,对控制参数取值进行不断的调整,确定了控制参数的取值。

电采暖用户普遍希望在满足取暖需求条件下,成本花费尽可能小。故建立了以最小电费为目标函数的运行模型,具体数学表达公式如下:

$$\min W = \sum_{t_{p0}}^{t_p} (P_{dt} + P_{ct})c_p + \sum_{t_{q0}}^{t_q} P_{dt}c_q \tag{6}$$

式中: W 为电费; P_{dt} 为直接制热电暖气的电功率; P_{ct} 为蓄热装置的电功率; c_p 为低谷电价; c_q 为峰值电价; $t_{p0} \sim t_p$ 为低谷电价时段; $t_{q0} \sim t_q$ 为峰值电价时段。

本文提出蓄直组合型电采暖系统,其蓄直组合型的含义为:蓄热和直接加热两种方式组合为用户提供满足其舒适度的热量,将需求响应融入蓄直组合型电采暖系统的思想可简述为:

- 1)在低谷电价时段,电采暖系统为用户供暖采用电暖气直接制热的方式;与此同时,蓄热装置存储热量,直到蓄热装置存储到最大存储量;
- 2)在高峰电价时段,电采暖系统为用户供暖采用蓄热和直热组合的方式为用户提供足够的热量。基本思路是:先使用蓄热装置产热,在其产生热量不

够时,辅助启动直热电暖气产热。

具体直热和蓄热电功率的数学表达公式如下所示:

$$P_d = \begin{cases} 0 & t \in [t_{q0}, t_q] \text{ 且 } H_t < S_{t-1} \\ \frac{H_t - S_{t-1}}{\eta_0} & t \in [t_{q0}, t_q] \text{ 且 } 0 \leq H_t \leq S_{t-1} \\ \frac{H_t}{\eta_0} & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_c = \begin{cases} \min(C_e, \frac{S_{\max} - S_{t-1}}{\eta_1}) & t \in [t_{p0}, t_p] \text{ 且 } S_{t-1} < S_{\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_d 为直接制热电暖气的电功率; P_c 为蓄热装置的电功率; H_t 为 t 时刻用户实际热负荷需求量; η_0 为直热效率; η_1 为蓄热效率; C_e 为蓄热功率; S_t 指时刻为 t 时,此时蓄热装置的蓄热量; $S_{\max}$ 为蓄热装置热量的最大存储量。

结合实际情况考虑,有以下约束条件:

1) 热负荷需求量基本要求:

$$P_d \eta_0 + P_c \eta_1 \geq H_t \quad (9)$$

2) 直热电暖气电功率范围:

$$0 \leq P_d \leq P_{d, \max} \quad (10)$$

式中 $P_{d, \max}$ 为直热电暖气电功率最大值。

3) 蓄热装置容量范围:

$$0 \leq S_t \leq S_{\max} \quad (11)$$

4) 蓄热装置的蓄热、放热功率范围:

$$\begin{cases} 0 \leq P_c \leq P_{c, \max} \\ 0 \leq P_f \leq P_{f, \max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_f 为蓄热装置的放热功率。

5) 蓄热设备的启用准则:

$$S_t = \begin{cases} 0 & t \in [t_{q0}, t_q], S_{t-1} < H_t \\ S_{t-1} - H_t & t \in [t_{q0}, t_q], S_{t-1} \geq H_t \\ S_{t-1} + C_e \eta_1 & t \in [t_{p0}, t_p], S_{t-1} < S_{\max} - C_e \eta_1 \\ S_{\max} & t \in [t_{p0}, t_p], S_{t-1} \geq S_{\max} - C_e \eta_1 \end{cases} \quad (13)$$

以上数学模型的决策变量是由 1 个小时内 P_d 和 P_c 结合第 3.1 节给定热舒适需求下热负荷曲线可得。

由式(6)~(8)可知,目标函数与电暖气总功率有关。电暖系统是否对房间内部加热,受限于电暖气的总功率。当电暖气总功率一直保持为固定值,在对房间供暖加热时,电暖气总功率输出的大小,与目标函数有关。因此,电暖气总功率之和是电暖气

直接加热与蓄热电功率相加得到结果。由此可见,室内温度和预期设定的温度存在差值时,电暖气将进行工作;达到一致时,则停止工作。电暖气系统是否工作以及是否启停动作保持一致,都会在系统工作中体现出来。以优化后全天总能耗低于优化前的能耗,同时提高电采暖系统运行效率为目标,将电暖气总功率与房间实时热负荷联系起来,首先根据设计热负荷计算出此时所需开启的电暖气数量 N (采用向上取整原则),最后得出此时电采暖的总功率 Q_p 为 $170 \times 25 = 4250$ (W),有效热功率为 $25 \times 0.84 = 21$ (W),从而根据室内空气动态热平衡方程公式,由此计算出实时室内温度。上述分组启停模块过程在仿真软件中实现图如图 2 所示。

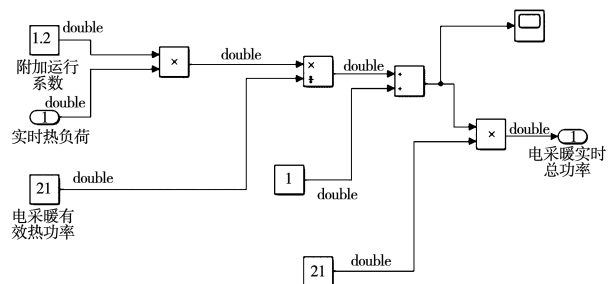


图 2 分组启停模块在仿真软件中的实现图

Fig. 2 Realization diagram of grouping start-stop module in simulation software

2.2 改进粒子群算法

PSO 算法于 1995 年提出,该算法的运行优化思路可归结为:对初始化粒子速度和位置两方面进行不断迭代,得到每一次迭代更新后的个体极值和局部极值,并最终得到群体最优值^[17-18]。一般情况,用到式(14)和式(15)来进行更新粒子的速度和位置的操作。

$$V_{k+1} = \omega V_k + c_1 r_1 (P_k - X_k) + c_2 r_2 (P_{gk} - X_k) \quad (14)$$

$$X_{k+1} = X_k + V_{k+1} \quad (15)$$

$$\omega = \omega_1 - \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_{\max}} k \quad (16)$$

式中: k 为迭代次数; $k_{\max}$ 为能够迭代的最大限度; V_{k+1} 为粒子第 $k+1$ 次迭代的速度值; X_{k+1} 为粒子第 $k+1$ 次迭代的位置值; P_k 为粒子第 k 次迭代的个体极值; P_{gk} 为第 k 次迭代的全局极值; c_1 和 c_2 为采用反余弦的学习因子; r_1 和 r_2 是为区间(0,1)上的任意值; ω 为惯性权重; ω_1 为起始系数; ω_2 为末位系数。

c_1 反映的是粒子当下寻找到的最优解对粒子飞行速度的影响, c_2 反映的是整个粒子群当下认定到的最优解对粒子飞行速度的影响。而较大或较小的

值都不利于粒子寻优。本文采用 $c_1 = 1.5$ 、 $c_2 = 1.5$ 和反余弦的方法对粒子群算法进行了多次实验,最终确定选用反余弦的方法更新学习因子。反余弦的主要思想是:寻优前期加快 c_1 和 c_2 的更新速度,使粒子尽快完成局部搜索,后期通过选取较大的 c_2 值,保证粒子寻优过程中的多样化^[19]。具体数学表达式如下:

$$c_1(k) = c_{1f} + (c_{1e} - c_{1f}) \left(1 - \frac{\arccos(-\frac{2k}{k_{\max}}) + 1}{\pi}\right) \tag{17}$$

$$c_2(k) = c_{2e} + (c_{2e} - c_{2f}) \left(1 - \frac{\arccos(-\frac{2k}{k_{\max}}) + 1}{\pi}\right) \tag{18}$$

式中: c_{1f} 、 c_{2f} 为初始值; c_{1e} 、 c_{2e} 为末位值。
为证明经反余弦方法改进的粒子群具有更高的寻优速度,本文选取函数 f_1 进行验证,具体数学表达式如下:

$$f_1 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \tag{19}$$

其中 f_1 的自变量 x_i 的取值范围是 $(-100, 100)$ 。测试结果如图 3 所示。

由图中可知,当学习因子 $c_1 = c_2 = 1.5$ 时,迭代次数达到 21 次左右可以接近最优解,而采用反余弦方法对学习因子改进之后,迭代次数到达 13 次左右便可接近最优解。

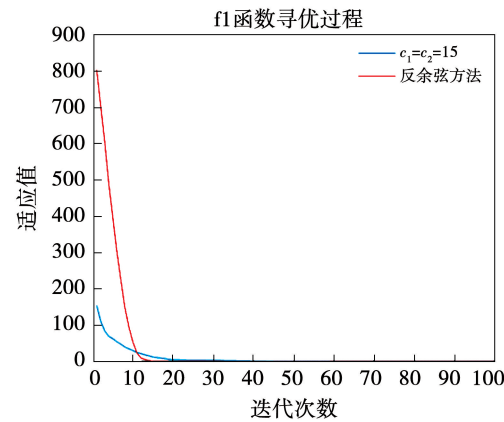


图 3 f_1 函数寻优过程对比图

Fig. 3 Comparison chart of the optimization process of f_1 function

基于粒子群算法,求解 2.1 节提出的以最小电费为目标函数,结合蓄直组合型思想的电采暖系统模型的主要步骤如图 4 所示。

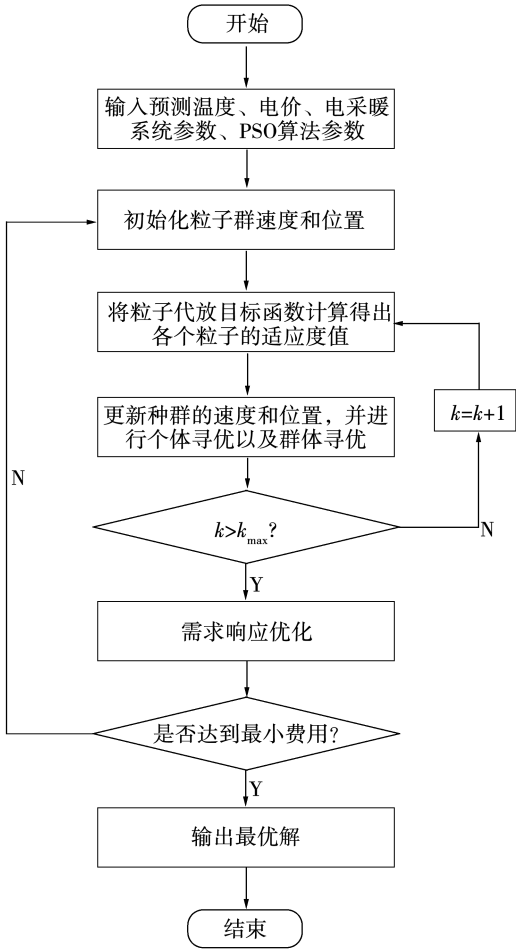


图 4 PSO 算法流程图
Fig. 4 Flow chart of PSO algorithm

3 算例与分析

3.1 热负荷需求曲线

为验证 PSO 算法在电采暖系统中优化的可行性,本工程选取山东济南某一企业,现已改造成电暖气沿地面敷设的电采暖系统。建筑围护结构为混凝土,墙内外没有任何保温材料,该企业办公区域需供暖区域的占地面积将近为 $2\,900\text{ m}^2$,办公区域平面图如图 5 所示。

由《山东省发展和改革委员会关于山东电网 2020 - 2022 年输配电价和销售电价有关事项的通知》可知,济南市工商业的电价分布情况如图 6 所示。其中高峰时段(电价为 $0.899\,8\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$): $8:30 - 11:00$, $14:30 - 21:00$;低谷时段(电价为 $0.318\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$): $12:00 - 13:00$, $23:00 - 7:00$;其余时段电价为 $0.608\,9\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ^[20]。

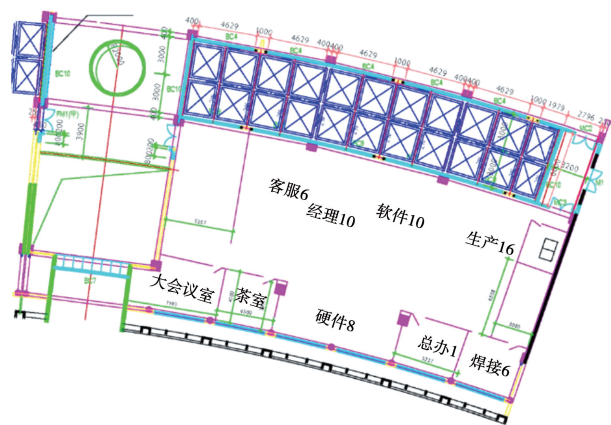


图 5 办公区域平面图
Fig. 5 Floor plan of office area

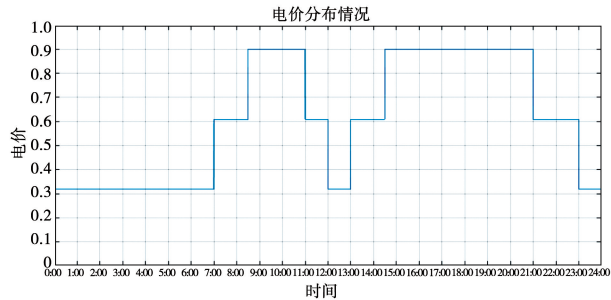


图 6 济南市工商业的店家分布情况
Fig. 6 Distribution of industrial and commercial stores in Jinan

在确定该办公区域建筑特性,并已知办公区域的室内和室外环境的情况之下^[21],利用式(20)求取室内热负荷需求量。

$$C_y \frac{dT_y}{d\tau} = \sum_{j=1}^n Q_s(\tau) + Q_B(\tau) + Q_C(\tau) + Q_D(\tau) + Q_A(\tau)$$

$\tau = 1, 2, 3, \dots, 24$

(20)

式中: C_y 为办公室空气的热容; n 为墙面数; $Q_s(\tau)$ 、 $Q_B(\tau)$ 、 $Q_C(\tau)$ 和 $Q_D(\tau)$ 的具体表达式见 1.1 节, $Q_A(\tau)$ 为 τ 时刻蓄直组合型电采暖系统给室内提供的热量。某天室外温度情况及相关热负荷需求曲线如图 7 所示。

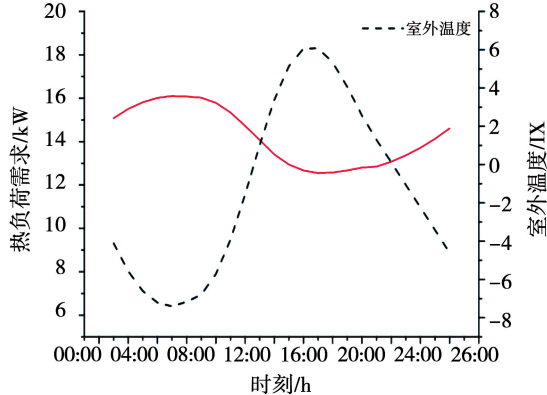


图 7 室内热负荷需求
Fig. 7 Indoor heat load demand

3.2 粒子群算法优化结果对比分析

3.2.1 能耗对比

本文优化方案中设有:23:00 – 7:00 和 12:00 – 14:30 时段直热电气开启,为用户供暖;与此同时,蓄热装置存储热量,直到蓄热装置存储到最大存储量。其他时段由电采暖系统为用户供暖采用蓄热和直热组合的方式为用户提供足够的热量。基本思路是:先使用蓄热装置产热,在其产生热量不够时,辅助启动直热电气产热。而未优化方案则是运行策略中没有进行粒子群算法优化,也没有将其优化后的结果代入 Simulink 模块中。

由图 8 可见,经粒子群算法优化后的蓄直组合型电采暖系统,在低谷电价时段(00:00 – 7:00)的耗热量逐渐上升,该现象是受需求响应的思想影响,即在此期间直热电气和蓄热装置同时开启。在 7:00 – 12:00 时段,该办公区域的热负荷量几乎不再增加,主要原因是该时段靠蓄热装置释放热量,且建筑物材料具有适当保持温度的能力,所以该时段不需要直热电气提供热量。12:00 – 13:30 时段与 00:00 – 7:00 时段同理,因此该时段出现耗热量逐渐上升的趋势。13:30 后与 7:00 – 12:00 时段同理,蓄热装置释放热量。

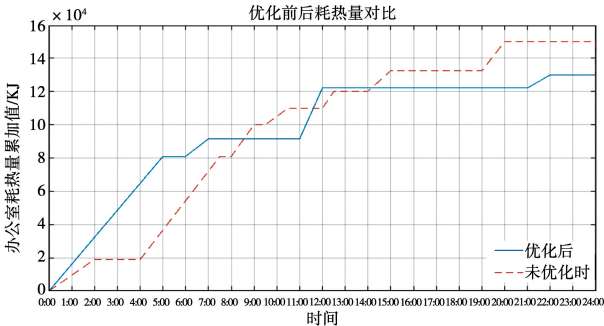


图 8 优化前后室内耗热量对比
Fig. 8 Comparison of indoor heat consumption before and after optimization

通过一整天的实验结果可以看出,采用粒子群算法优化后的蓄直组合型电采暖系统供热时,全天总能耗低于没有优化时的能耗,这说明粒子群算法优化后的蓄直组合型电采暖系统可降低房间能耗。

3.2.2 经济性对比

在上述能效对比实验的基础上,进一步进行了经济性对比的实验研究。本文采集了优化后两个连续 5 个工作日的供暖电费,以及未优化的连续 5 个工作日的供暖电费,对比数据如表 2 所示。

表 2 第 1 个连续 5 个工作日供暖电费对比

Table 2 Comparison of heating electricity charges for the first 5 consecutive working days

时间	未优化供暖电费/元	优化后供暖电费/元
周一	10.3	8.5
周二	10.4	8.2
周三	9.9	7.9
周四	10.1	9.0
周五	10.0	8.4
总计	50.7	42.0

表 3 第 2 个连续 5 个工作日供暖电费对比

Table 3 Comparison of heating electricity charges for the second 5 consecutive working days

时间	未优化供暖电费/元	优化后供暖电费/元
周一	11.3	8.9
周二	10.9	9.2
周三	10.7	9.1
周四	10.6	9.0
周五	11.1	9.4
总计	54.6	45.6

由表 2 和表 3 可知,PSO 算法优化后办公区域的蓄直组合型电采暖供暖电费,相比较未优化的供暖电费数据有明显下降。且优化后连续 5 个工作日的电费总计数额,相比较未优化时连续 5 个工作日的电费总计数额分别节约了近 17.16% 和 16.48%。

4 结 论

本文对蓄直组合型电采暖系统的运行优化策略进行研究,首先建立电采暖建筑墙体外影响因素数学模型,通过 Matlab 中的 Simulink 工具将系统可视化,将完整的室内温度计算过程仿真模拟;其次结合需求响应以用户采暖电费最小为目标函数,为实现削峰填谷,采取蓄直组合型电采暖运行策略建立目标优化模型;然后对最小电费目标函数采用 PSO 算法进行求解;最后通过算例仿真结果证明本文运行优化策略能效对比方面优化后全天总能耗低于优化前的能耗,这说明粒子群算法优化后地蓄直组合型电采暖系统可降低房间能耗。经济性方面与未优化之前相比较,优化后电费明显降低,优化后两个连

续 5 个工作日的电费总计数额,相比较未优化时电费总计数额分别节约了近 17.16% 和 16.48%,对于电网需求响应^[22]具有积极意义。

在碳中和的大背景下,电能作为优质清洁能源,本文为提供解决目前的温室效应等全球环境问题及系统成本方面提供了一种解决方式,蓄直组合型电采暖具有远大发展前景。在电采暖优化方面,未具体分析各年龄层人员舒适度需求,还可进一步将人体舒适度等考虑在内,这也是后续的研究方向。

参考文献:

[1] 范帅,郑琨琪,郭炳庆,等. 分散式电采暖负荷协同优化运行策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(19):20.
FAN Shuai, JIA Kunqi, GUO Bingqing, et al. Collaborative Optimization Operation Strategy of Distributed Electric Heating Load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,41(19):20.

[2] 韦琦,李世楠,朱莹莹. 改进 PSO 优化家庭能源管理系统控制策略[J]. 哈尔滨理工大学学报,2018,23(2):70.
WEI Qi, LI Shinan, ZHU Yingying. Improving PSO to Optimize the Control Strategy of Household Energy Management System [J]. Journal of Harbin University of Technology,2018,23(2):70.

[3] 严干贵,阚天洋,杨玉龙等. 基于深度强化学习的分布式电采暖参与需求响应优化调度[J]. 电网技术,2020,44(11):4140.
YAN Qiangui, KAN Tianyang, YANG Yulong, et al. Distributed Electric Heating Participation in Demand Response Optimal Dispatch Based on Deep Reinforcement Learning [J]. Power System Technology, 2020, 44(11):4140.

[4] WANG H, YANG J, CHEN Z, et al. Optimal Dispatch Based on Prediction of Distributedelectric Heating Storages in Combined Electricity and Heat Networks[J]. Applied Energy, 2020, 267.

[5] 李鹏,杨玉龙,黄越辉,等. 综合热电负荷控制下的省级电网风电并网研究[J]. 西安交通大学学报,2014,48(2):69.
LI Peng, YANG Yulong, HUANG Yuehui, et al. Research on the Integration of Wind Power in the Provincial Power Grid under Comprehensive Thermal Power Load Control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 69.

[6] 李亚平,姚建国,雍太有,等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(19):5519.

- LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Research on the Assessment Method of the Aggregate Power and Response Potential of Residential Temperature Control load [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2017, 37(19): 5519.
- [7] TESTI D, URBANUCCIL, GIOLA C, et al. Stochastic Optimal Integration of Decentralized Heat Pumps in a Smart Thermal and Electric Micro-grid[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 210.
- [8] 王庆泽, 陈星莺, 颜庆国, 等. 分时电价环境下的办公建筑空调负荷双层柔性优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 43.
- WANG Qingze, CHEN Xingying, YAN Qingguo, et al. Two-layer Flexible Optimal Strategy for Air-conditioning of Office Building under TOU Price[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 43.
- [9] CISEK P, TALER D. Numerical and Experimental Study of a Solid Matrix Electric Thermal Storage Unit Dedicated to Environmentally Friendly Residential Heating System [J]. Energy & Buildings, 2016, 130: 747.
- [10] 王涌, 曹志猛, 马红, 等. 乌鲁木齐市采用电采暖供热的可行性研究[J]. 新疆电力技术, 2010(4): 6.
- WANG Yong, CAO Zhimeng, MA Hong, et al. Feasibility Study on Using Electric Heating and Heating in Urumchi [J]. Xinjiang Electric Power Technology, 2010(4): 6.
- [11] 黎华林, 陈红坤, 徐坤, 等. 风电与蓄热电采暖的联合运行及其效益分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(8): 82.
- LI Hualin, CHEN Hongkun, XU Kun, et al. Combined Operation of Wind Power and REH and Its Benefit Analysis [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(8): 82.
- [12] 郇潼. 电采暖群负荷平衡控制策略研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2019.
- [13] 朱玉杰. 电采暖负荷可调节能力评估与集群控制策略研究[D]. 沈阳: 东北电力大学, 2019.
- [14] 宫铭远. 基于遗传算法的集中式电采暖系统优化控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [15] 王志强, 王珊, 张馨月, 等. 计及用户响应行为差异性的区域电采暖负荷特性建模[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 67.
- WANG Zhiqiang, WANG Shan, ZHANG Xinyue, et al. Modeling of Regional Electric Heating Load Characteristics Taking into Account the Differences in User Response Behavior [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 67.
- [16] 陈程, 陈星莺, 张健钊, 等. 考虑分时电价的地源热泵系统随机运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 57.
- CHEN Cheng, CHEN Xingying, ZHANG Jianzhao, et al. Optimization Strategy for Random Operation of Ground Source Heat Pump System Considering Time-of-use Electricity Price [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 57.
- [17] KENNEDY J, EBERHART R. Particle Swarm Optimization [C]//International Conference on Neural Networks. IEEE, 1995: 1942.
- [18] 满春涛, 刘博, 曹永成. 粒子群与遗传算法优化支持向量机的应用 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(3): 87.
- MAN Chuntao, LIU Bo, CAO Yongcheng. Application of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm to Optimize Support Vector Machine [J]. Journal of Harbin University of Technology, 2019, 24(3): 87.
- [19] 王剑晓, 钟海旺, 夏清, 等. 基于成本—效益分析的温控负荷需求响应模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 45.
- WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Temperature Control Load Demand Response Model and Method Based on Cost-benefit Analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 45.
- [20] 孟静. 计及风电消纳的峰谷分时电价定价机制研究 [D]. 沈阳: 东北电力大学, 2019.
- [21] 周晖, 付娅, 韩盟, 等. 基于粒子群算法的含大规模风电互联系统的负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 1.
- ZGOU Hui, FU Ya, HAN Meng, et al. Load Frequency Control of Large-scale Wind Power Interconnected Systems Based on Particle Swarm Optimization [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 1.
- [22] 崔屹峰, 李珍国, 杨金庆, 等. 考虑需求差异的用户蓄热式电采暖优化运行策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 116.
- CUI Yifeng, LI Zhenguo, YANG Jinqing, et al. Optimal Operation Strategy of Household Regenerative Electric Heating Considering Demand Difference [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 116.

(编辑: 温泽宇)