

计及用户满意度的蓄热式电采暖与 风电互动运行优化策略

屈高强¹, 郭飞², 党东升¹, 张庆平², 韩一鸣¹, 高保皓¹

(1. 国网宁夏电力有限公司经济技术研究院, 宁夏 银川 750001; 2. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: 随着“双碳”战略目标的提出, 要求进一步推进以风、光为主体的清洁能源大规模接入电网。为提升电网风电消纳能力, 减少弃风现象, 提出计及用户满意度的蓄热式电采暖与风电互动优化运行模型。首先, 分析蓄热式电采暖设备参与风电消纳的运行机理; 然后, 在综合考虑风电消纳、经济性以及用户满意度等方面的优化需求后, 建立蓄热式电采暖与风电联合运行的多目标优化模型, 并采用一种基于灰色关联分析与改进混沌粒子群算法的电网优化运行模型求解方法; 最后, 基于某电网数据仿真, 提出满足系统优化运行需求的方案。算例结果表明: 模型可有效地增加风电消纳能力, 减少设备运行成本, 满足用户对温度的舒适体验, 为未来的蓄热式电采暖以及风电的投资提供决策支持。

关键词: 蓄热式电采暖; 风电消纳; 用户满意度; 灰色关联分析; 混沌粒子群算法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.007 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2023)01-0055-11

Optimization strategy for interactive operation of regenerative electric heating and wind power considering user satisfaction

QU Gaoqiang¹, GUO Fei², DANG Dongsheng¹, ZHANG Qingping², HAN Yiming¹, GAO Baohao¹

(1. Economic & Technological Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China;

2. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China)

Abstract: With the strategic goal of developing "double carbon", it is required to further promote the large-scale integration of wind and solar power as the main source of clean energy. In order to improve the wind power consumption capability and reduce the wind power curtailment, a interactive optimization operation model of regenerative electric heating and wind power considering user satisfaction is proposed. Firstly, the operation principle of regenerative electric heating equipment participating with wind power is analyzed; then, a multi-objective optimization model for the combined operation of regenerative electric heating and wind power is established considering wind power consumption, economical property and user satisfaction. A grey relational analysis based improved chaotic particle swarm optimization algorithm is adopted for solving the proposed model; finally, an operation scheme which satisfying all the operation requirements is proposed based on the simulation data of a real grid. The simulation results show that the model can effectively increase the wind power consumption capability, reduce the operating cost, satisfy the user's thermal comfortable level, and provide decision support for future development for the regenerative electric heating and wind power.

Key words: regenerative electric heating; wind power consumption; user satisfaction; grey relational analysis; chaotic particle swarm algorithm

收稿日期: 2021-12-15; 修回日期: 2022-04-13

基金项目: 国网宁夏电力研究项目(SGNXJY00JCJS2100036); 宁夏自然科学基金(2022AAC03614); 2018年宁夏回族自治区青年拔尖人才计划

通信作者: 屈高强(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事新型配电网规划设计与分布式电源接入研究; E-mail: qgq300@163.com

随着国家“双碳”战略目标的部署,“碳达峰、碳中和”战略成为“十四五”时期构建现代产业体系的主攻^[1],以风、光为主体的清洁能源大规模接入电网。由于风电出力具有波动性和不确定性,高比例的风电接入对电网安全稳定运行造成了威胁^[2-3]。因此,风电消纳对电网灵活性提出了更高要求^[4],为蓄热式电采暖技术发展提供了机遇。蓄热式电采暖设备作为灵活的可调节资源可有效解决新能源与负荷时空不匹配问题,促进新能源消纳,支撑电网的安全稳定与经济运行^[5]。

目前,已有大量国内外学者针对蓄热式电采暖参与风电消纳的运行优化问题进行了研究。在优化目标方面,文献[6]以总煤耗最小为优化目标,提出蓄热式电采暖与风电联合运行的优化模型,提高系统的风电消纳能力,增加系统运行的经济性的同时也降低了系统的碳排放量;文献[7]以煤耗量和热舒适度为目标建立热电联合优化模型;文献[8]在优化目标中考虑系统风电消纳能力,建立以弃风率最小、电锅炉的调节频率最小的目标函数优化模型。在风电消纳方面,文献[9]应用鲁棒优化理论建立考虑风电不确定性的蓄热式电锅炉与风电联合的优化调度模型,缓解风电不确定性对系统风电消纳能力的影响;文献[10]以系统净收益最大化为目标,在技术约束下最大限度地提高系统利润,并研究了不同气候条件下混合发电系统对新能源消纳的影响。在参与主体方面,文献[11-12]提出采用电热混合储能系统与电网进行电量交换,从而提高系统对风电消纳能力。在优化模型求解算法方面,针对蓄热式电采暖与风电联合运行的多目标优化模型,一般通过粒子群算法以及遗传算法等算法。文献[13]基于改进粒子群算法对含蓄热式电锅炉、风电以及火电机组的多目标优化调度模型进行求解;文献[14]建立以全系统总煤耗最低为优化目标,采用遗传算法对目标函数进行求解。

上述文献的优化目标主要集中于反映经济成本的煤耗量和反映社会效益碳排放量,存在以下问题:优化目标较为单一,未全面考虑蓄热式电采暖参与风电消纳情况下系统的运行成本、风电消纳量等因素;蓄热式电采暖设备参与风电消纳的优化模

型中忽略了用户满意度对用户参与需求侧响应积极性的影响;传统的多目标优化模型求解算法存在全局搜索能力差等弊端。

为此,本文建立考虑用户满意度的蓄热式电采暖与风电联合运行的多目标优化模型,在此基础上提出一种基于灰色关联分析与改进混沌粒子群算法(improved chaotic particle swarm optimization, ICPSO)的多目标优化模型求解方法。首先,分析蓄热式电采暖设备参与风电消纳的运行机理;其次,建立考虑用户满意度的需求响应模型,在综合考虑风电消纳、运行成本以及用户满意度后,制定约束条件以保证电网能够安全稳定运行,在此基础上,提出一种基于灰色关联分析与ICPSO算法的多目标运行优化模型求解方法;最后,基于某电网的实际数据进行仿真,提出满足系统运行需求的方案,算例结果表明:风电联合蓄热式电采暖设备有良好的运行特性。

1 基于需求响应的蓄热电采暖与风电耦合机理

1.1 蓄热式电采暖设备结构及运行方式

本文蓄热式电采暖主要指蓄热式锅炉,其具有运行成本低、环境污染小等优点。蓄热式电锅炉包括电锅炉、蓄热水罐、换热器和热力管网等设备。电锅炉采用分量蓄热的蓄热方式,即谷电时段存储部分热量在峰电时段使用,起到了削峰填谷、优化电网运行结构的作用。电锅炉中有被炉水浸没的电极板,通过调节锅炉内电极浸没深度,还可以实现功率的无极调节^[15]。换热器用于冷热液体之间的热量转换,电锅炉中产生的热量通过换热器存储至蓄热水罐中。峰电时段由热力管道对蓄热水罐中的热能进行传输。

1.2 蓄热式电采暖与风电互动运行模式

当前,新能源发电技术日趋成熟,新能源发电比例不断增加,传统“源随荷动”调度模式难以满足新能源消纳需求,电网对新能源的消纳能力成为衡量电网调度能力的重要依据。峰电时段通常都在白天,谷电时段则多在晚上。虽然风电具有随机性,但是在晚上谷电时段,风力发电量普遍较高,容

易产生“弃风”问题。蓄热式电锅炉“移峰填谷”的作用,有助于消纳风电^[9]。夜间负荷低谷时段,风力发电的电能传送到电网,如果风力发电不足时,通过电网及时补充电,保证电锅炉以额定功率运行。电锅炉产生的热能一部分通过热力管网直接热能,另一部分可以通过蓄热水罐进行储存。在白天用电高峰阶段,对储存的热能进行释放、分配,起到“移峰填谷”、消纳风电、减少弃风量的作用。同时,通过缩小昼夜间用电负荷的峰谷差,可以减少发电机组启停的频率,延长机组使用寿命,避免发电机组的资源浪费。在满足用户用电舒适度与温度舒适度的条件下,本文蓄热式电采暖参与风电消纳的运行模式如图1所示,其中热电机组既可以发电也可以承担热负荷。

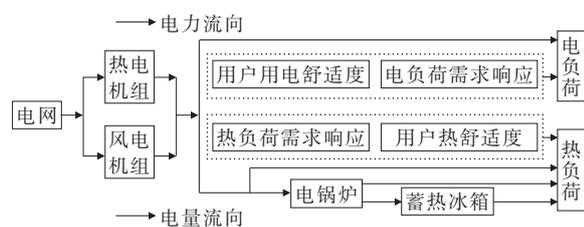


图1 蓄热式电采暖与风电互动运行模式

Figure 1 Interactive operation mode of regenerative electric heating and wind power

1.2 用户满意度模型

用户满意度主要分为用电舒适度和温度舒适度两类,两者均会影响用户参与需求响应的积极性,进而影响蓄热式电采暖设备在参与风电消纳时的削峰填谷特性。

1) 用电舒适性评估。

在激励机制下,用户可以直接快速地通过激励措施参与电网互动,调整用电方式。用户用电舒适度是衡量用户用电方式变化量的指标。当用户未改变用电方式时,用户用电方式满意度最大,此时用户满意度为1。随着用户需求响应量的增大,用户用电方式变化程度增大,其用电方式满意度降低。当用户需求响应量等于初始负荷总量时,用户用电方式满意度最低,用电舒适度降为0。

用户用电舒适度建立在用户需求响应量与初始负荷的基础上,本文根据用户的实际用电曲线与舒适度最大值来构建数学模型,进而计算用户的用

电舒适度值,其计算方式为

$$\varphi = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |\Delta P_t^{\text{DR}}|}{\sum_{t=1}^T \Delta P_t} \quad (1)$$

式中, T 为调度周期内的时段数,本文将调度周期设置为1d,1h作为一个运行时段,共24个运行时段; $|\Delta P_t^{\text{DR}}|$ 为第 t 个运行时段用户响应量的绝对值; ΔP_t 为第 t 个运行时段负荷预测总用电量。

2) 温度舒适性评估。

用户的温度舒适度直接影响用户的用电决策,进而影响蓄热式电采暖设备的削峰填谷特性,影响风电消纳量。因此,需建立模型全面反映用户的舒适度感觉。本文采用热感觉平均标度预测(predicted mean vote, PMV)^[16]指标衡量人体对室内温度的敏感程度, $P_{\text{MV}} \in [-3, 3]$ 。 $P_{\text{MV}} = 0$ 表示用户的温度舒适度最高,随着PMV偏离0的程度增大,用户的温度舒适度变差。

PMV指标综合考虑空气温度、湿度,流速、人体着装、活动状态等用户温度舒适度的影响因素,即

$$P_{\text{MV}} = P_{\text{MV1}} + P_{\text{MV2}} \quad (2)$$

其中, P_{MV} 由两部分组成, P_{MV1} 考虑了人体新陈代谢、机械功以及所处气压, P_{MV2} 主要考虑了热辐射效应包含用户室内的衣着以及用户室内体表温度。

$$P_{\text{MV1}} = [0.303 \exp(-0.036X) + 0.028] [(X - W) - 3.05 \times 10^{-3} (5733 - 6.99(X - W) - p_w)] - 0.42 [(X - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} X (5867 - p_w) \quad (3)$$

式中, X 为人体新陈代谢率,可取为固定值,取值范围为 $[58, 100]$, W/m^2 ; W 为用户产生的机械功; p_w 为水蒸气的气压。

$$P_{\text{MV2}} = -0.0014X(34 - t_k) - 3.96 \times 10^{-8} \theta_c \cdot [(t_c + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - \theta_c \theta_t (t_c - t_k) \quad (4)$$

式中, t_k 为空气的温度,其为动态变化量,取值范围为 $[22, 30]$, $^{\circ}\text{C}$; θ_c 为用户室内的衣着系数; t_c 为室内的人体表面温度; \bar{t}_r 为平均辐射温度,具有动态特性,取值范围为 $[10, 40]$, $^{\circ}\text{C}$; θ_t 为热传递系数。PMV指标与用户满意度的对应关系如图2所示。

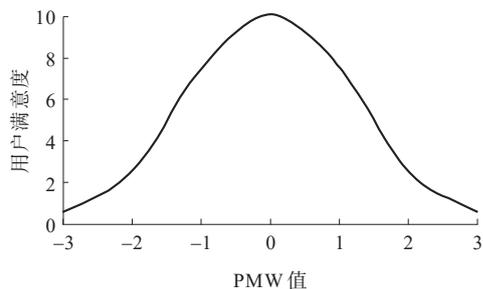


图2 PMV指标与用户满意度的关联

Figure 2 Correlation between PMV index and user satisfaction

由图2可知,舒适对应的PMV指标为0,热对应的PMV指标为3,冷对应的PMV指标为-3。温度升高过程中,PMV指标逐渐增大,用户满意度降低;温度降低过程中,PMV指标逐渐减小,用户满意度也随着降低。由此可知,用户满意度取决于不同时刻的温度。PMV值 μ_{PMV} 与温度 t_k 的关系^[17]为

$$\mu_{PMV} = \begin{cases} 0.3895(t_k - 26), & t_k \geq 26 \\ 0.4065(-t_k + 26), & t_k < 26 \end{cases} \quad (5)$$

当 $\mu_{PMV} = 0$ 时,用户温度感受为舒适时对应的室内温度为 26°C ,此时用户温度舒适度最高。根据ISO 7730推荐的PMV取值范围为 $[-0.5, 0.5]$,对应的室内温度取值范围为 $[24.8, 27.3]^{[18]}$ 。

2 考虑蓄热式电采暖的风电消纳运行优化模型

2.1 目标函数

考虑蓄热式电采暖参与的风电消纳运行优化的主要目标是在提高风电消纳要求下兼顾经济性和低碳性。本文以风电消纳量最大、系统运行成本最小、用户满意度最好为目标。

1) 风电消纳最大。

风电出力具有波动性和不确定性,风电机组高比例接入电网增大了系统调节的负担。当风电出力超过系统调节能力时,为保证电网安全稳定运行就会产生弃风现象,制约风电消纳。基于蓄热式电采暖设备的特性,以风电弃风消纳最大为目标,电力系统消纳风电的能力可表示为

$$\max F_1 = \frac{\sum_{m=1}^N G_m + P_i + \Delta P_i - (P_L + \Delta P_L)}{\lambda \cdot \varphi} \quad (6)$$

式中, G_m 为发电机组的额定容量; $P_i, \Delta P_i$ 分别为电力系统中的可中断负荷与可中断负荷的增量; $P_L, \Delta P_L$ 分别为电负荷与电负荷的增量; λ, φ 分别为风电场的同时率与风电的反调峰率。

2) 系统运行成本最小。

系统运行成本是衡量经济性的一个重要指标,当经济性最好时,系统运行成本最小。

① 蓄热式电采暖运行成本。

蓄热式电采暖设备运行成本主要包括向电网购电费用、蓄热式电采暖设备运行维护费用以及取暖补贴,运行成本可表示为

$$S_1 = \sum_{t=1}^{24} [C_G^t P_G^t + C_1 (P_{ch}^t + P_{dis}^t) + C_2 P_{G,t}] - \sum_{n=1}^N C_{b,n} f_n(P_{3,n}) \quad (7)$$

式中, C_G^t 为 t 时刻电网售电电价; P_G^t 为蓄热式电采暖设备 t 时刻的运行功率; C_1 为蓄热式电采暖设备储热部分单位功率的运行维护费用; C_2 为蓄热式电采暖设备的放热功率; P_{ch}^t 为蓄热式电采暖设备的充电功率; P_{dis}^t 为蓄热式电采暖设备电热转换部分单位功率的运行维护费用;热电采暖设备的放热功率; $C_{b,n}$ 为第 n 个蓄热式电采暖设备的取暖补贴; f_n 为第 n 个蓄热式电采暖设备关于用电总量和政府补贴政策的函数; $P_{3,n}$ 为第 n 个蓄热式电采暖设备输出的功率。

② 机组的燃料成本。

热电联产机组分为压式机组和抽汽式机组2种基本类型,冬季供暖主要采用抽汽式机组。抽汽式机组的燃料成本为

$$S_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{chp}} [A_i P_{chp,i}^2(t) + B_i P_{chp,i}(t) + C_i H_{chp,i}(t) P_{chp,i}(t) + D_i H_{chp,i}^2(t) + E_i H_{chp,i}(t) + F_i] \quad (8)$$

式中, $P_{chp,i}(t), H_{chp,i}(t)$ 为第 i 台抽汽式机组 t 时刻的发电及供热功率; N_{chp} 为抽汽式机组的数量; $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i$ 分别为第 i 台抽汽式机组的燃煤系数,可由热电机组的耗量特性 a, b, c 以及机组的热电比 C_v 求得。

③风电机组发电成本。

$$S_3 = \sum_{t=1}^T \gamma_w P_w^{t,f} \quad (9)$$

式中, γ_w 为风电的单位发电成本系数; $P_w^{t,f}$ 为 t 时刻风电的预测功率; T 为调度周期设置为 24 h。

综上所述, 系统运行成本为

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^3 S_i \quad (10)$$

3) 用户满意度最好。

用户满意度是衡量蓄热式电采暖供暖能力的重要指标。文 1.3 建立了用户满意度模型。其中, 式(1)可求用电舒适度, 式(2)~(5)可求温度舒适度。

2.2 约束条件

1) 蓄热式电锅炉运行约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{hp}(t) \leq P_{HP, \max} \\ 0 \leq P_{eb}(t) \leq P_{EB, \max} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} M(t) - M(t-1) \leq P_{sto, \max} \\ M(t-1) - M(t) \leq P_{rel, \max} \\ M_{\min} \leq M(t) \leq M_{\max} \\ P_{sto}(t) \cdot P_{rel}(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)、(13)中, $P_{HP, \max}$ 、 $P_{EB, \max}$ 分别为热泵、电锅炉额定运行功率, MW; $P_{sto, \max}$ 、 $P_{rel, \max}$ 分别为热储蓄热、放热功率上限, MW; $M(t)$ 为在 t 时刻热储的储热量, MW·h; M_{\max} 、 M_{\min} 分别为热储最大、最小储热量, MW·h。

2) 功率平衡约束。

①电功率平衡约束。

$$P_w^t + P_b^t = P_{H, in}^t + P_h^t \quad (13)$$

②热功率平衡约束。

$$\begin{cases} Q_h^t = Q_{zg}^t + Q_{G, in}^t \\ Q_x^t = Q_{zg}^t + Q_{G, out}^t \end{cases} \quad (14)$$

式(13)、(14)中, P_w^t 为风电场 t 时刻产生的弃风功率; P_b^t 为向电网购电量; $P_{H, in}^t$ 为蓄热式电采暖设备储热部分 t 时刻的充电功率; P_h^t 为蓄热式电采暖设备 t 时刻运行功率; Q_h^t 为蓄热式电锅炉 t 时刻产生的热量; Q_{zg}^t 为 t 时刻直接供给供热公司的热量; $Q_{G, in}^t$ 、 $Q_{G, out}^t$ 分别为 t 时刻系统向蓄热装置储存、释放的热量。

3) 风电出力约束。

$$0 \leq P_{wp, t} \leq P_{wp} \quad (15)$$

式中, $P_{wp, t}$ 为风电场 t 时刻发出的有功功率; P_{wp} 为 t

时刻风电场预测功率上限。

4) 线路传输功率约束。

$$|P_{cs, t}| \leq P_{cs, \max} \quad (16)$$

式中, $P_{cs, t}$ 为输电线路 t 时刻传输的有功功率; $P_{cs, \max}$ 为线路允许输送的最大有功功率。

3 基于灰色关联分析与改进混沌粒子群的问题求解方法

本文提出基于灰色关联分析与 ICPSO 算法的求解方法。通过灰色关联分析可以将多目标问题构建成单一目标的数学模型, 并采用 ICPSO 算法进行求解, 能有效获得多目标优化模型的最优解。

3.1 灰色关联分析

灰色关联分析可以判断系统各因素间的联系紧密程度^[19]。

1) 分析序列的确定。

设有 n 个子序列, 每个序列中包含了 m 个数据。记参考序列为 $Y = Y(k)$ 比较序列为 $X_i' = X_i'(k)$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m$ 。

2) 量化变量数据。

$$x_i(k) = \frac{x_i'(k)}{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_i'(k)} \quad (17)$$

3) 确定数据最大差和最小差, 记最大差为 a , 最小差为 b 。

$$a = \min_{i=1}^n \min_{k=1}^m |y(k) - x_i(k)| \quad (18)$$

$$b = \max_{i=1}^n \max_{k=1}^m |y(k) - x_i(k)| \quad (19)$$

4) 计算参考序列与子序列中各个数据的关联程度。

$$\zeta_i(k) = \frac{a + \rho \cdot b}{|y(k) - x_i(k)| + \rho \cdot b}, k = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

其中, ρ 为分辨系数, 本文取 0.5。

5) 计算关联度。

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \zeta_i(k), i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

6) 对关联度向量 $r = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ 进行标准化处理, 得到权重向量为

$$s = (s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (22)$$

3.2 优化运行数学模型

本文提出的优化运行数学模型是一个多目标优化问题。由文2可知,优化运行模型的运行目标为风电消纳量 F_1 最大,运行成本 F_2 最小,用户满意度 F_3 最高。可得目标函数为

$$\text{Min } q(x) = s_2 F_2 - s_1 F_1 - s_3 F_3 \quad (23)$$

其中, s_i 为灰色关联分析所得权重。

式(23)将多目标问题转换为求解单目标,但仍需要满足相关约束条件,可得本文中多目标问题优化后的数学模型为

$$\begin{cases} Q(x) = \min [q_1(x), q_2(x), \dots, q_n(x)] = \\ \quad s_2 F_2 - s_1 F_1 - s_3 F_3 \\ \quad f_i \geq 0 \end{cases} \quad (24)$$

其中, $Q(x)$ 为目标函数; f_i 为约束条件。

3.3 混沌粒子群算法

粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)是通过模拟鸟群觅食行为而设计的一种智能优化算法^[20]。设粒子群的规模为 N ,搜索空间的维数为 D ,则每个粒子调整速度以及位置分别为

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \text{rand}_1(p_{\text{best}} - x_{id}^k) + c_2 \text{rand}_2(g_{\text{best}} - x_{id}^k) \quad (25)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (26)$$

其中, v_{id}^{k+1} 、 x_{id}^{k+1} 分别为第 $k+1$ 次迭代后、第 i 个粒子在 $d(d=1, 2, \dots, D)$ 维子空间的速度以及位置; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 均为学习因子; p_{best} 、 g_{best} 分别为第 k 次迭代时粒子 i 得到的最佳位置与全部粒子群所得到的最佳位置; rand_1 和 rand_2 为区间 $(0, 1)$ 间的随机数。

混沌粒子群算法(chaotic particle swarm optimization, CPSO)对粒子群算法进行优化,引入了混沌搜索的思想,避免“早熟”现象^[21]的出现,提高了粒子群搜索结果的准确性。本文选用Logistic方程形成混沌序列,即

$$z_{i+1} = \mu z_i (1 - z_i) \quad (27)$$

其中, z_i 为混沌序列, $i=0, 1, 2, \dots, n$; z_0 为初始值,且满足 $0 \leq z_0 \leq 1$; μ 为控制系数,当 $\mu=4$ 时,序列为完全混沌状态,因此,本文取 μ 为4。

3.4 改进混沌粒子群算法

本文提出的ICPSO算法,在混沌粒子群的基础

上,通过提出改进学习因子、寻优系数、淘汰机制等方式进行相应的改进。

1) 改进学习因子。

合理的 c_1 和 c_2 数值设置能有效提高算法的搜索能力。 c_1 有调节个体学习的能力,当其数值过大时,粒子易聚集在某一区域,难以在空间遍历; c_2 有调节群体学习的能力,当其值过小时,算法容易陷入局部最优解。因此,随着迭代的进行,数值恒定的 c_1 、 c_2 不利于算法寻优。本文通过改进学习因子,在算法迭代的过程中能及时改变 c_1 和 c_2 数值,即

$$\begin{cases} c_1 = 0.5 + \frac{1.5t}{T_{\text{max}}} \\ c_2 = 2 - \frac{1.5t}{T_{\text{max}}} \end{cases} \quad (28)$$

式中, t 为当前迭代的次数; T_{max} 为算法最大迭代次数。

2) 寻优系数。

寻优系数 σ 可以评价混沌搜索的寻优结果,通过对每次迭代中群体平均适应度的判断,从而决定是否进行淘汰机制,当 $\sigma > 1$ 时,代表此次种群平均适应度不理想,需要淘汰部分粒子。寻优系数为

$$\sigma = \begin{cases} 0, & f_{\text{avg}}(k) = f_{\text{avg}}(k+1) \\ \frac{|f_{\text{avg}}(k+1) - f_{\text{best}}|}{|f_{\text{avg}}(k) - f_{\text{best}}|}, & f_{\text{avg}}(k) \neq f_{\text{avg}}(k+1) \end{cases} \quad (29)$$

其中, f_{best} 为种群最佳适应度; $f_{\text{avg}}(k)$ 为种群平均适应度。通过寻优系数,可以筛选出混沌搜索中最优的可行解,并提高了淘汰机制的合理性。

3) 淘汰机制。

淘汰机制是指在算法迭代运行中,淘汰掉适应度较差的粒子,同时用混沌搜索中所得的最优解替代,以保持种群拥有较好的平均适应度 f_{avg} 。本文用混沌搜索中所得的最优的前3个解 r_1^* 、 r_2^* 、 r_3^* 替换掉生成粒子中适应度最差的3个粒子。引入淘汰机制的混沌粒子群算法有效提高了寻优结果的准确性与寻优过程的全局搜索能力。

3.5 基于灰色关联度与改进混沌粒子群算法的求解方法

基于灰色关联度与改进混沌粒子群算法的求解方法的具体流程如图3所示。

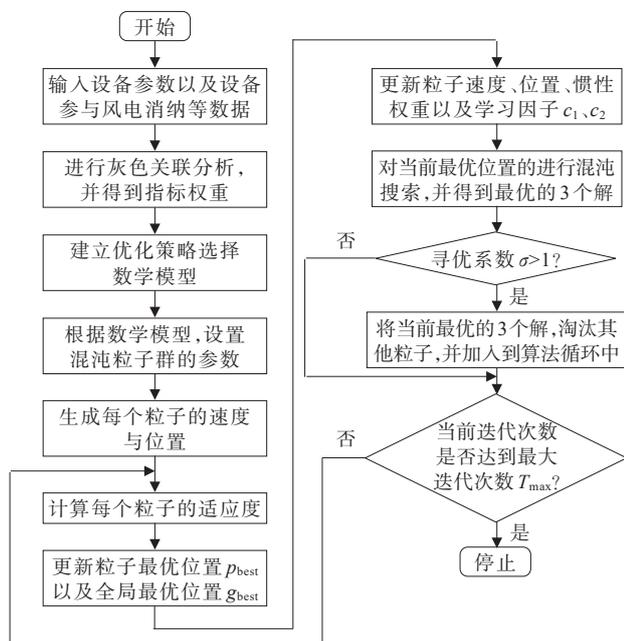


图 3 算法求解流程

Figure 3 Flowchart of solving process

1) 输入设备参数、设备参与风电消纳量以及实时电价等数据,进行灰色关联分析,计算关联度,并得到各指标的指标权重。

2) 通过指标权重建立优化运行数学模型。

3) 根据模型,设置混沌粒子群最大迭代次数 T_{\max} 、粒子数目与维数等参数。

4) 随机生成每个粒子的速度与位置。

5) 计算每个粒子的适应度。

6) 更新粒子最优位置 p_{best} 及全局最优位置 g_{best} 。

7) 根据式(25)、(26),更新粒子速度、位置,根据式(28)对学习因子 c_1 、 c_2 进行更新,同时更新惯性权重 w 。

8) 通过式(27)对当前最优位置的 g_{best} 进行混沌搜索,并得到当前最优的前 3 个解 r_1^* 、 r_2^* 、 r_3^* 。

9) 根据式(29)更新寻优系数 σ ,若 $\sigma < 1$,则转到步骤 11)中;若 $\sigma > 1$,则进行步骤 10)。

10) 将当前最优的前 3 个解淘汰掉适应度最差的 3 个粒子,并加入到算法循环中。

11) 判断当前迭代次数是否达到最大迭代次数 T_{\max} ,若达到 T_{\max} ,则停止循环并输出最优解 r^* ,否则转到步骤 5)进行循环。

为进一步研究 ICPSO 算法的优越性,分别使用传统 PSO、CPSO 和 ICPSO 各运行 100 次来对

Griewangk 和 Rastrigin 测试函数进行求解,由于测试函数是非线性多模函数,存在许多局部极值,可以用来检测算法的全局搜索能力。Griewangk、Rastrigin 的表达式分别为

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^d \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^d \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \quad (30)$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n [x_{i-1}^2 - 10 \cos(2\pi x_i + 10)] \quad (31)$$

式(30)、(31)中,Griewangk 以及 Rastrigin 函数的搜索范围分别为 $[-600, 600]$ 、 $[-5.12, 5.12]$,全局最优值都为 0。

算法参数设置如下:种群规模为 30,测试函数维数为 30,最大迭代次数 T_{\max} 为 1 000,PSO 以及 CPSO 的学习因子 $c_1 = c_2 = 1.48$,PSO 的惯性权重 $w = 0.8$,其余条件均设置相同,实验结果如表 1 所示。

表 1 不同算法的性能比较结果

Table 1 Performance comparison under different algorithms

测试函数	搜索成功率/%			平均搜索时间/s		
	PSO	CPSO	ICPSO	PSO	CPSO	ICPSO
Griewangk	63	78	92	3.274	3.872	4.174
Rastrigin	67	85	97	2.126	3.194	3.826

由表 1 可知,ICPSO 算法虽然计算时间有所增加,但搜索成功率有所提升。因此,ICPSO 算法粒子质量明显高于传统 PSO 算法和 CPSO 算法。ICPSO 算法利用加入的寻优系数,提升了粒子质量,避免了算法陷入局部最优解,提升了粒子群算法的全局搜索能力,保证了结果的精确性。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文某地区供暖项目实际运行数据为例,选取 2 台热电机组,调度周期为 24 h。热电机组参数如表 2 所示,蓄热式电采暖设备基本参数如表 3 所示,电锅炉装机容量 300 MW。该地区实时电价在高峰段(07:00—11:30,17:00—20:30)为 0.65 元/(kW·h);平时段(06:30—07:00,11:30—17:00)为 0.51 元/(kW·h);低谷段(07:00—11:30,17:00—20:30)为 0.29 元/(kW·h)。

本研究选取蓄热式电采暖参与风电消纳,电负荷以及风电预测功率如图4所示。

表2 热电机组参数

Table 2 Parameters of Thermolectric unit

机组	最大电功率/MW	最小电功率/MW	a/(\$/(MW)^2 \cdot h\$)	b/(\$/(MW \cdot h)\$)	c/(\$/h\$)
1	400	140	0.004	14.5	100
2	210	110	0.002	21.3	152

表3 蓄热式电采暖参数

Table 3 Parameters of regenerative electric heating parameters

设备属性	单位	参数
加热功率	MW	30
蓄热量	GJ	500
最高蓄热温度	°C	800
热效率	%	95~98

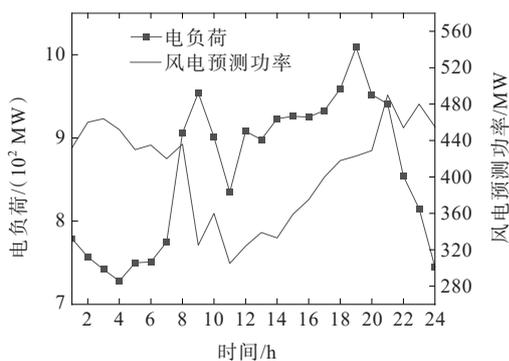


图4 电负荷以及风电预测功率

Figure 4 Electricity load and wind power output curve

4.2 优化运行计算结果及分析

为综合考虑风电消纳量、运行成本以及用户满意度,本文提出4种优化运行场景。场景1:不考虑蓄热式电采暖以及用户满意度模型,热负荷由热电机组承担;场景2:不考虑用户满意度模型,热负荷由热电机组以及电锅炉承担;场景3:不考虑用户满意度模型,在场景2中加入蓄热设备;场景4:考虑用户舒适度,用户温度舒适度指标设置为0.5,用户用电舒适度指标设置为0.93。由热电机组以及蓄热式电采暖共同承担热负荷。

4.2.1 求解结果与分析

结合文4.1的基础数据以及文4.2的具体场景,进行灰色关联分析,得到风电消纳量、运行成本及用户满意度指标的权重值分别为 $w_1=0.276$ 、 $w_2=$

0.371 、 $w_3=0.353$ 。将权重代入文3.2所建立的运行方案选择数学模型中,并采用ICPSO算法进行求解与分析,其参数设置取粒子数为25;惯性权重取 $w_{max}=0.9$ 、 $w_{min}=0.4$;粒子速度范围为 $[-0.9, 0.9]$;最大迭代次数 $T_{max}=100$ 。

通过ICPSO算法对基于灰色关联分析下的数学模型进行迭代运算,得到的目标函数值迭代如图5所示。

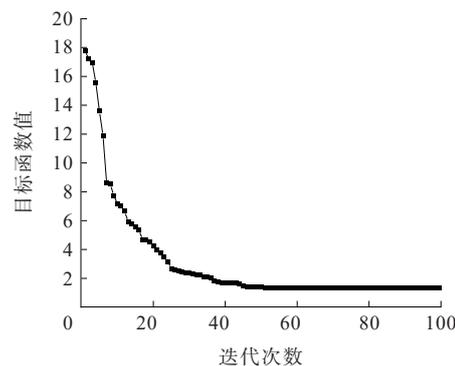


图5 目标函数值迭代

Figure 5 Objective values verse iteration

由图5可知,当通过灰色关联分析得到风电消纳量、运行成本及用户满意度指标的权重值分别为 $w_1=0.276$ 、 $w_2=0.371$ 、 $w_3=0.353$ 时,在式(23)中,目标函数值的收敛值为1.362,得到最佳运行场景为场景4,同时得到不同场景下的电功率平衡如图6~9所示。由图6~9可知,场景1~4的热电机组总计功率不断减少,风电消纳量不断增大;场景4的热电机组间的出力更加平衡,且具有更好的系统调峰能力。

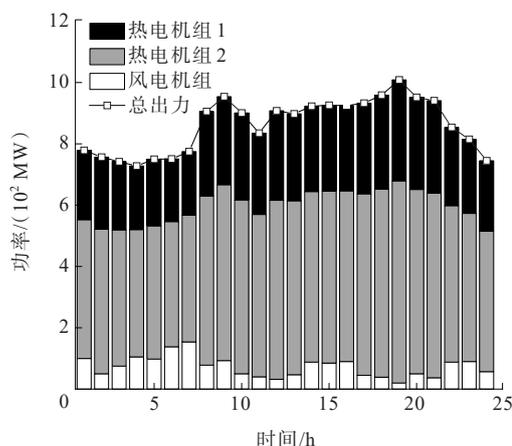


图6 场景1电功率平衡

Figure 6 Electric power balance under scenario 1

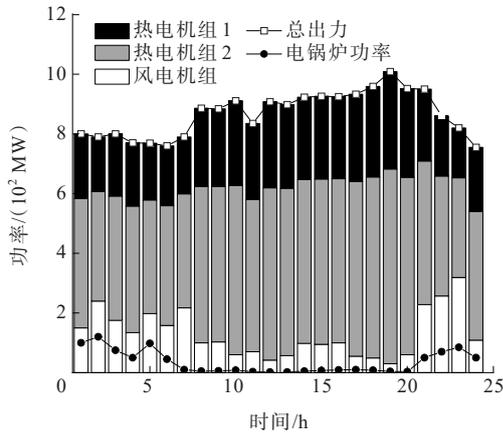


图 7 场景 2 电功率平衡

Figure 7 Electric power balance under scenario 2

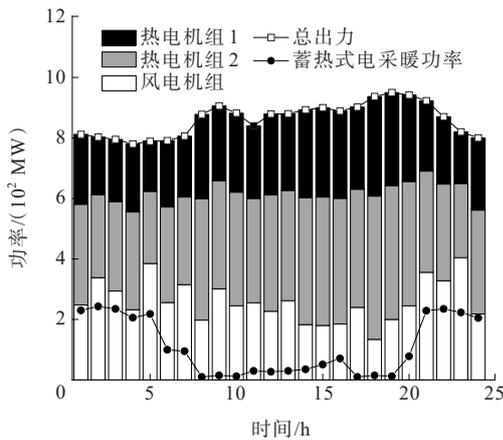


图 8 场景 3 电功率平衡

Figure 8 Electric power balance under scenario 3

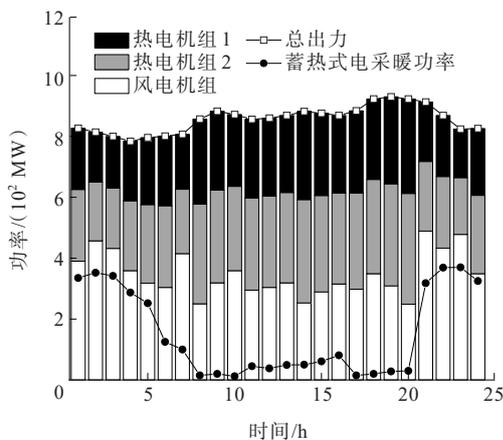


图 9 场景 4 电功率平衡

Figure 9 Electric power balance under scenario 4

由图 6 可知,当场景 1 没有蓄热式电锅炉参与调度时,20:30—次日 06:30 为用电低谷时段,热电机组为满足热负荷需求出力较高,而当用电高峰时段,热电机组需要较高出力以满足高额电负荷需

求。由图 7 可知,场景 2 在热电机组供热的基础上加入电锅炉,但热电机组仍然保持较高出力。由图 8 可知,场景 3 在场景 2 的基础上加入蓄热装置,在用电高峰时段释放低谷时段存储的热量,有效减少了热电机组的出力,风电的弃风量也相应减少。由图 9 可知,场景 4 加入了用户满意度模型,蓄热电采暖装置的功率出力相比于场景 3 进一步提升,进一步增加了风电上网空间,同时起到了“削峰填谷”的作用。

4.2.2 考虑用户满意度的场景分析

考虑用户满意度室内温度变化如表 4 所示。

表 4 考虑用户满意度室内温度变化

Figure 4 Indoor temperature variation consider user satisfaction

时段	室内温度变化/°C		
	考虑用户满意度	未考虑用户满意度	
高峰	07:00—11:30	26.8~25.5	26
	17:00—20:30	26.0~25.5	26
平时	06:30—07:00	26.5~26.8	26
	11:30—17:00	25.5~26.0	26
低谷	20:30—次日 06:30	25.5~26.5	26

如表 4 所示,20:30—次日 06:30 为电价低谷时段,风电预测出力较高,此时升高室内温度,增大电采暖设备加热功率,一方面满足用户对温度舒适度的要求,另一方面实现风电的低储,提升设备运行经济性,有效提高系统风电消纳量。06:30—07:00 为电价平时段,风电预测功率不断减小,且用户对温度要求不高,此时降低室内温度,减小电采暖设备加热功率,但电采暖设备仍处于蓄热状态,从而在后续电价高峰时段减小购电量,降低电采暖设备的运行成本,在一定程度上提高了风电消纳量。07:00—11:30 和 17:00—20:30 为电价高峰时段,此时降低室内温度,降低电采暖设备的加热功率,降低电采暖设备的运行成本。11:30—17:00 时,风电出力增大,同时考虑到为后续电价高峰时段蓄热,升高室内温度,增大电采暖设备加热功率,促进了风电消纳。

4.2.3 不同场景下系统运行成本和弃风率对比分析

4 种场景下弃风功率、运行成本以及弃风率的数据如表 5 所示。

表5 优化运行场景比较

Table 5 Comparison under different operation scenarios

运行场景	弃风功率/MW	运行成本/万元	弃风率
1	8 106.17	12.12	0.827 3
2	6 694.42	10.45	0.683 2
3	3 569.62	7.59	0.364 3
4	1 466.29	5.23	0.149 7

如表5所示,场景1的风电消纳量最小,原因是在供暖高峰时期,风力预测功率较大,热发电机组需要提高电强迫出力以满足高峰时段的热负荷需求,造成了大量的弃风且提高了运行成本。场景2采用电锅炉能替热机组分担一部分的热负荷,对弃风进行消纳。同时电锅炉热效率较高,减少了热发电机组的电强迫出力,降低了燃料费用。场景3加入了蓄热装置,电价低谷时段也是弃风量较高的时段,蓄热式电采暖在低谷时段对热能进行存储,在高峰时段进行热量的释放,有效消纳了大量的弃风,同时利用峰谷电价机制,进一步降低了蓄热式电锅炉的运行成本。场景4在场景3的基础上,考虑了用户满意度,其室内温度变化如表4所示,蓄热装置出力大于场景3,提高了低谷时段对风电的消纳能力。

5 结语

在“双碳”目标下,分布式电源的发展将持续扩大完善,随着高比例新能源大规模接入电网,为提升电网风电消纳能力,减少弃风现象,本文提出了考虑用户满意度的蓄热式电采暖参与风电消纳的运行优化模型,综合考虑了系统对风电消纳、经济性等方面的诉求,同时计及了用户满意度对系统优化调度的影响。在此基础上,提出了一种基于灰色关联分析与ICPSO算法的电网多目标运行优化模型的求解方法,并通过仿真算例进行验证。算例分析表明:

1) 通过灰色关联分析能科学、有效地建立多目标数学优化模型。在模型求解中,通过引入改进学习因子、寻优系数以及淘汰机制的ICPSO算法在全局搜索能力方面明显优越,能够更好地实现对于蓄热式电采暖参与风电消纳多目标优化问题上的求解。

2) 考虑用户满意度的系统优化调度,可有效促进新能源消纳,同时提升系统运行的经济性与低碳

性。结合电网与用户的利益诉求,通过市场环境下的激励机制,有助于充分调动用户参与系统运行优化的积极性,提升电网整体运行服务水平。

参考文献:

- [1] 鲁鹏,田浩,武伟鸣,等.需求侧能量枢纽和储能协同提升风电消纳和平抑负荷峰谷模型[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):42-51.
LU Peng, TIAN Hao, WU Weiming, et al. Demand side energy hub and energy storage cooperate to smooth peak and valley and improve wind power consumption model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1):42-51.
- [2] 张程,匡宇,刘佳静,等.考虑需求侧管理的风光燃储微电网两阶段优化调度[J].电力系统保护与控制,2022,50(24):13-22.
ZHANG Cheng, KUANG Yu, LIU Jiajing, et al. Two-stage optimal scheduling of a wind, photovoltaic, gas turbine, fuel cell and storage energy microgrid considering demand-side management[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24):13-22.
- [3] 闫桂杭,班国邦,余斌,等.考虑风光接入的柔性互联配电网概率潮流算法研究[J].供用电,2022,39(5):41-47+60.
YAN Guihang, BAN Guobang, YU Bin, et al. Research on probabilistic power flow algorithm of flexible interconnected distribution network with wind and solar access[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5):41-47+60.
- [4] 林俐,李北辰,孙勇,等.基于高比例新能源消纳的抽水蓄能容量多时间尺度迭代优化配置模型[J].电网与清洁能源,2021,37(1):104-111.
LIN Li, LI Beichen, SUN Yong, et al. Multi-time-scale iterative optimal configuration model of pumped storage capacity based on accommodation of high share new energy[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 104-111.
- [5] 宋杰,李树鹏,张卫国,等.含蓄热式电采暖的综合能源系统日前优化调度策略研究[J].智慧电力,2021,49(4):14-20.
SONG Jie, LI Shupeng, ZHANG Weiguo, et al. Day-ahead optimized dispatching strategy of integrated energy system with regenerative electric heating[J]. Smart Power, 2021, 49(4):14-20.
- [6] 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):82-88.
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):82-88.
- [7] 董彧彤,王艳松,倪承波,等.计及用热舒适度弹性的热电联合优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(23):26-34.
DONG Yutong, WANG Yansong, NI Chengbo, et al. Dispatch of a combined heat-power system considering elasticity with thermal comfort[J].Power System Protection and Control,2021,49(23):26-34.
- [8] 李国庆,庄冠群,田春光,等.基于大规模储能融合蓄热式电锅炉的风电消纳多目标优化控制[J].电力自动化设备,2018,38(10):46-52+59.
LI Guoqing, ZHUANG Guanqun, TIAN Chunguang, et al. Multi-objective optimization control of wind power consumption based on regenerative electric boiler system integrated with large-scale energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(10):46-52+59.
- [9] 陈守军,辛禾,王涛,等.风电、蓄热式电锅炉联合供暖调度鲁棒优化模型[J].电力建设,2016,37(1):103-109.
CHEN Shoujun, XIN He, WANG Tao, et al. Heating operation scheduling robust optimization model for heat storage electric boiler combined with wind power[J]. Electric Power Construction,2016,37(1):103-109.
- [10] 杨昆,孙磊,房超运,等.促进新能源消纳的混合发电系统[J].中国电力,2022,55(2):145-151.
YANG Kun, SUN Lei, FANG Chaoyun, et al. Hybrid power generation system to promote new energy consumption[J]. Electric Power,2022,55(2):145-151.
- [11] 李军徽,付英男,李翠萍,等.提升风电消纳的储热电混合储能系统经济优化配置[J].电网技术,2020,44(12):4547-4557.
LI Junhui, FU Yingnan, LI Cuiping, et al. Economic optimal configuration of hybrid energy storage system for improving wind power consumption[J]. Power System Technology,2020,44(12):4547-4557.
- [12] 朱炳铨,钱韦延,张俊,等.考虑风电消纳的电热混合储能系统优化定容方法[J].电力建设,2020,41(12):14-22.
ZHU Bingquan, QIAN Weiyan, ZHANG Jun, et al. An optimal sizing method for hybrid electrical and thermal energy storage system considering wind power accommodation[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12):14-22.
- [13] 杨丽君,梁旭日,王心蕊,等.考虑调峰权交易提高风电二次消纳能力的热电联合经济调度[J].电网技术,2020,44(5):1872-1880.
YANG Lijun, LIANG Xuri, WANG Xinrui, et al. Combined heat and power economic dispatching considering peak regulation right trading to improve secondary accommodation capability of wind power[J].Power System Technology,2020,44(5):1872-1880.
- [14] 郑伟,姚远,代邦武,等.基于数据挖掘的燃煤机组厂级负荷经济调度[J].热力发电,2021,50(7):78-83.
ZHENG Wei, YAO Yuan, DAI Bangwu, et al. Economic load dispatch of coal-fired power plant based on data mining technology[J]. Thermal Power Generation,2021,50(7):78-83.
- [15] 陈林,蔺红,成后炉.基于附加热源提高风电消纳的电热联合调度[J].太阳能学报,2021,42(10):258-264.
CHEN Lin, LIN Hong, CHENG Houlu. Electrothermal combination dispatching based on additional heat source improving wind power consumption[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2021,42(10):258-264.
- [16] DUDZIK M. Towards characterization of indoor environment in smart buildings: modelling PMV index using neural network with one hidden layer[J]. Sustainability,2020,12(17):6749.
- [17] 董京营,周博,刘晋源,等.考虑用户舒适度的虚拟电厂热电联合调度模型[J].电力建设,2019,40(1):19-26.
DONG Jingying, ZHOU Bo, LIU Jinyuan et al. Heat and power scheduling of virtual power plant considering comfort level of customers[J].Electric Power Construction, 2019,40(1):19-26.
- [18] 闫敏,加鹤萍,刘敦楠,等.考虑用户舒适度的虚拟电厂电/热综合需求响应[J].华北电力大学学报(自然科学版),2022,49(2):106-117.
YAN Min, JIA Heping, LIU Dunnan, et al. Electric/thermal integrated demand response of virtual power plant considering user comfort[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition),2022, 49(2):106-117.
- [19] OZAY C, ALTUG M, BALLIKAYA H. A new optimization technique in examining the machinability of sverker 21 steel: gray relational analysis-based genetic algorithm[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46: 11783-11795.
- [20] YUAN G H, YANG W X. Study on optimization of economic dispatching of electric power system based on hybrid intelligent algorithms (PSO and AFSA)[J]. Energy, 2019,183:926-935.
- [21] 姚泽玮,林嘉雯,胡俊钦,等.基于PSO-GA的多边缘负载均衡方法[J].计算机科学,2021,48(S2):456-463.
YAO Zewei, LIN Jiawen, HU Junqin, et al. PSO-GA based approach to multi-edge load balancing[J]. Computer Science,2021,48(S2):456-463.