

基于改进粒子群算法的综合能源系统多目标优化运行

董敏^{1,2}, 刘可真², 赵庆丽³, 陈镭丹⁴, 姚岳², 赵雄¹

(1. 云南经济管理学院 云南省高校智能制造创新重点实验室, 云南 昆明 650304;

2. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650504;

3. 中国能源建设集团云南省电力设计院, 云南 昆明 650051;

4. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

摘要:“双碳”目标下, 电力能源系统需要逐步向节能低碳的方向发展, 综合能源系统(IES)是解决能源与环保问题的重要举措。目前对 IES 的研究主要集中在分布式能源、储能并网和多目标优化等方面, 智能算法是处理优化问题的重要途径, 但随着模型复杂化, 传统的智能算法存在收敛性差、容易陷入局部最优的问题。基于此围绕 IES 经济、环保与稳定运行目标, 构建了考虑经济性、环保性及出力不平衡性 3 个指标的基于改进粒子群算法的 IES 多目标优化模型。首先, 以 3 个指标最优为目标搭建了 IES 模型; 其次, 采用隶属度函数和层次分析法(AHP)进行归一化处理并确定权重系数; 最后, 引入粒子浓度评价算子改进粒子群算法, 对所提模型进行求解, 并分析系统在单一目标和多目标情况下的运行结果, 验证了模型和算法的有效性。改进算法显著提高了收敛速度, 有效避免了粒子陷入局部最优。

关键词:综合能源系统; 经济调度; 节能环保; 粒子浓度; 改进粒子群算法

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24540

Multi-objective Optimal Operation of Integrated Energy System Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

DONG Min^{1,2}, LIU Kezhen², ZHAO Qingli³, CHEN Leidan⁴, YAO Yue², ZHAO Xiong¹

(1. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Innovation in Yunnan Universities, Yunnan College of Business Management, Kunming 650304, Yunnan, China; 2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, Yunnan, China; 3. China Energy Engineering Group Yunnan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Kunming 650051, Yunnan, China; 4. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650214, Yunnan, China)

Abstract: Under the "dual carbon" goal, the electric energy systems need to gradually develop towards the way of energy saving and low carbon. The integrated energy system (IES) is an important measure to solve energy and environmental protection problems. At present, the research on IES mainly focuses on distributed energy, energy storage grid connection and multi-objective optimization. Intelligent algorithm is an essential way to deal with optimization problems. However, with the complexity of the model, the traditional intelligent algorithms have the problem of poor convergence and easy to fall into the local optimum. Centering on the objectives of economy, environmental protection and stable operation, a multi-objective optimization model of IES based on improved particle swarm optimization considering three indicators of economy, environmental protection and output imbalance was built. Firstly, the IES model was established with the goal of optimizing the three indicators. Secondly, the membership function and the analytic hierarchy process (AHP) were used to normalize and determine the weight coefficient. Finally, the particle concentration evaluation operator was introduced to improve

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金资助项目(2022J1279); 云南经济管理学院科学研究基金资助项目(2021ZD05);

云南经济管理学院学科建设基金资助项目(2022XKJS02)

作者简介: 董敏(1992—), 男, 硕士, 讲师, Email: dongmin0820@163.com

通讯作者: 刘可真(1974—), 女, 博士, 教授, Email: liukezh@foxmail.com

the particle swarm algorithm to solve the proposed model, and the operating results of the system under single-objective and multi-objective conditions were analyzed, which verifies the effectiveness of the model and algorithm. The improved algorithm significantly improve the convergence speed and effectively avoid the particles falling into the local optimum.

Key words: integrated energy system (IES); economic dispatch; energy conservation and environmental protection; particle concentration; improved particle swarm optimization algorithm

电力能源使用的覆盖程度日益增加,电能使用规划若还是按照过去的规划经验进行直接规划,那么对于综合能源系统稳定性、能源合理利用以及成本可控性来说,都是一种很大的挑战。因此,如何降低对市场的依赖,同时减少环境污染,实现能源可持续发展变成了当下首要解决的问题^[1-2]。

人工智能算法是处理这类规划问题的重要手段,文献[3]针对气候变化对综合能源系统(integrated energy system, IES)供需的影响进行研究,基于反向传播(back propagation, BP)神经网络等智能算法,建立了综合能源系统动态模型;文献[4]提出了一种基于非支配排序遗传算法的综合能源系统优化控制策略,验证了该优化控制策略的有效性;文献[5]基于改进的模拟-退火粒子群算法,以系统运行成本最优为目标,构建了区域 IES 经济模型,结果表明该算法收敛性较快,同时能保证系统的经济性。牛顿拉夫逊法是能流计算中常用的计算方法,但其收敛性与所选取的初值息息相关,文献[6]针对能流计算初值选取问题,提出了基于拟牛顿法的 IES 能流计算方法,具有良好的收敛性,且对初值依赖程度低,能够很好地解决使用牛顿法时因初值而造成运算不收敛的问题。文献[7]搭建了 IES 日前调度概率最优能量流系统模型,提出了基于二阶锥优化的综合能源系统日前调度概率最优能量流计算,但模型未考虑 IES 不确定因素。文献[8]针对传统粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法在求解时容易陷入局部最优的问题,考虑使用改变搜索步长来提高其全局搜索能力,并将小生境技术融合进 PSO 算法中。

传统的负荷预测算法在收敛性方面也还有提升空间,文献[9]针对负荷预测参数具有较高相似度的特点,在电-热互联系统的基础上提出一种模糊 C 均值的聚类算法,根据数据密度设置聚类参数,通过与传统径向基函数预测结果比较,同时提升能源系统负载运行的稳定性。文献[10]对电-热联合系统能量管理进行了研究。能量管

理面临着用户用能的随机性和清洁能源出力的波动性等问题,为更好管理能源,文献[11-12]提出基于强化学习的电-热联合系统能量管理方法,考虑了清洁能源及负荷的不确定性,同时将能源管理近似为马尔可夫决策过程,有效提升了系统响应能力,实现系统能量优化管理。

然而,传统算法在实际应用过程中无法满足目前所建模型的复杂程度以及最优解维度增多的情况,存在着收敛性差、寻优困难等问题^[13-14]。基于上述背景,本文围绕综合能源系统经济性、环保性及出力不平衡性 3 个指标,搭建了基于多目标的 IES 优化调度模型,并采用改进 PSO 算法进行求解;最后,分析系统在单一目标和多目标情况下的运行结果,验证模型和算法的有效性。

1 综合能源系统模型建立

综合能源系统能量流示意图如图 1 所示。系统主要包含多能源供给侧、负荷侧及能量转化与储存环节。能源设备包括光伏(photovoltaic, PV)、风机(wind turbine, WT);转化设备包括电锅炉(electric boiler, EB)、燃气锅炉(gas boiler, GB)、燃气轮机(gas turbine, GT)、电制冷机(electric chiller, EC)、吸收式制冷机(absorption chiller, AC)和电转气(power to gas, P2G)设备;储能设备针对电/热/气等能源进行储存。

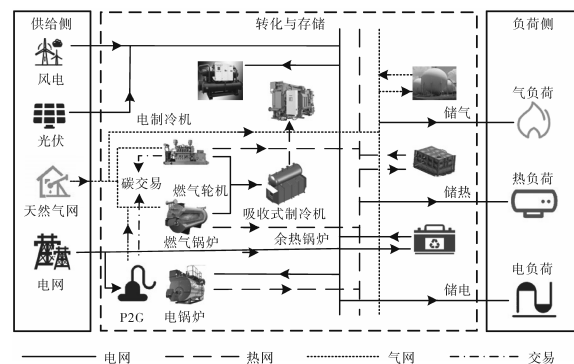


图1 综合能源系统能量流示意图

Fig.1 Schematic diagram of energy flow of integrated energy system

为解决仅考虑单一目标下能源系统优化无

法同时满足不同能源调度需求的问题,本文选取一个园区(生活区)为研究对象,以系统经济性、环保性和系统不平衡量为优化目标,构建模型,并以此优化运行分析。

1.1 成本模型

以IES成本最低、环保性最好及系统不平衡量最小为优化目标。系统成本 C_1 主要由购电费用 $C_{e,b}$ 、燃气费用 C_g 、维护成本 C_{om} 以及P2G设备运行获取收益 C_p 四部分构成,即

$$C_1 = C_{e,b} + C_g + C_{om} - C_p \quad (1)$$

$$C_{e,b} = \sum_{t=1}^T b_{e,b} P_{e,b,t} \Delta t \quad (2)$$

$$C_g = f_g \sum_{t=1}^T \left(\frac{P_{GT,t}}{\eta_{GT}} + \frac{Q_{GB,t}}{\eta_{GB}} \right) \Delta t \quad (3)$$

$$C_{om} = \sum_{t=1}^T K_i P_{i,t} \Delta t \quad (4)$$

$$C_p = \sum_{t=1}^T f_g P_{P2G,t} \Delta t \quad (5)$$

式中: $b_{e,b}$ 为购电价格系数; f_g 为天然气单价; K_i 为第 i 台设备的维护成本系数; $P_{e,b,t}$ 为 t 时段系统向电网购电功率; $P_{GT,t}$ 、 $Q_{GB,t}$ 分别为 t 时段第 i 台燃气轮机的电功率和燃气锅炉的热功率; η_{GT} 、 η_{GB} 分别为燃气轮机及燃气锅炉的产热效率; $P_{i,t}$ 为第 i 台设备的出力; $P_{P2G,t}$ 为P2G设备运行出力; Δt 为 t 时段间隔。

环保成本 C_2 由 CO_2 排放量表示,即^[15]

$$C_2 = \sum_{t=1}^T (c_{grid} P_{grid,t} + c_{gas} P_{GT,t}) \Delta t \quad (6)$$

式中: c_{grid} 为电网向外购电对应的二氧化碳排放系数,取 $0.877 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; $P_{grid,t}$ 为 t 时段IES向外部电网的购电功率; c_{gas} 为燃气轮机燃烧天然气所排放的二氧化碳系数,取 $0.22 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; $P_{GT,t}$ 为 t 时段燃气轮机发出的电功率。

综合能源系统实际运行过程中存在不平衡量,为了让IES运行更加接近实际生产工况,考虑系统出力不平衡量,减少系统运行时出力的不平衡差额,是保证系统优化运行的关键,系统出力不平衡量表示如下:

$$C_3 = \sum_{t=1}^T (P_{out,t} - P_{in,t}) \quad (7)$$

$$P_{out,t} = L_{CA,t} + L_{HA,t} + L_{EA,t} \quad (8)$$

$$P_{in,t} = P_{WT,t} + \frac{P_{GT,t}}{\eta_{GT}} + \frac{P_{grid,t}}{\eta_{grid}} \quad (9)$$

式中: $P_{out,t}$ 、 $P_{in,t}$ 分别为 t 时段IES的输出、输入功率; $L_{CA,t}$ 、 $L_{HA,t}$ 、 $L_{EA,t}$ 分别为 t 时段用户消耗冷、热、电

负荷功率; η_{grid} 为发电效率。

1.2 约束条件

冷热电功率平衡约束和微网内各设备负荷约束是区域综合能源系统的主要约束。

1)冷功率平衡约束表达式为

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (\eta_{AC} Q_{AC,i,t} + \eta_{EC} P_{EC,i,t} - L_{CA,t}) = 0 \quad (10)$$

式中: $Q_{AC,i,t}$ 为 t 时段AC输入的热功率; $P_{EC,i,t}$ 为 t 时段EC输入的电功率; η_{AC} 、 η_{EC} 分别为AC和EC的制冷系数。

2)热功率平衡约束表达式为

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (\eta_{HE} Q_{HE,i,t} - Q_{HX,i,t} - Q_{AC,i,t} - L_{HA,t}) = 0 \quad (11)$$

式中: $Q_{HE,i,t}$ 为 t 时段第 i 台设备余热锅炉回收的热功率; $Q_{HX,i,t}$ 为 t 时段系统与热网的耦合热损耗; η_{HE} 为余热锅炉的产热效率。

3)电功率平衡约束表达式为

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (P_{grid,s,t} + P_{PV,i,t} + P_{WT,i,t} + P_{GT,i,t} - P_{grid,b,t} - P_{EV,i,t} - P_{ES,C,i,t} + P_{ES,D,i,t} - L_{EA,t}) = 0 \quad (12)$$

式中: $P_{grid,s,t}$ 为 t 时段系统与外部交换的功率; $P_{PV,i,t}$ 为 t 时段第 i 个设备光伏输出的电功率; $P_{WT,i,t}$ 为 t 时段第 i 个设备风力机组输出的电功率; $P_{EV,i,t}$ 为 t 时段第 i 辆电动汽车充电功率; $P_{ES,C,i,t}$ 、 $P_{ES,D,i,t}$ 分别为 t 时段第 i 个蓄电池充、放电功率。

4)储能约束表达式为

$$0 \leq E_{s,t} \leq E_i \quad (13)$$

式中: $E_{s,t}$ 为 t 时段储存设备 i 储存的电量; E_i 为储存设备满容量状态下的储存容量。

5)WT出力约束表达式为

$$P_{WT,i,t} = P_{WT,i,t}^{inu} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{WT,i,t} \leq P_{WT,i,t}^{norm} \quad (15)$$

式中: $P_{WT,i,t}^{inu}$ 为 t 时段第 i 台风机的实际消纳值; $P_{WT,i,t}^{norm}$ 为 t 时段第 i 台风机的实际出力值。

6)其他设备出力上下限及稳定性约束的表达式如下所示:

$$\begin{cases} P_{i,min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,max} \\ Q_{i,min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,max} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} -\beta_{GT} \Delta t \leq P_{GT,t+1} - P_{GT,t} \leq \beta_{GT} \Delta t \\ -\beta_{GT} \Delta t \leq Q_{GT,t+1} - Q_{GT,t} \leq \beta_{GT} \Delta t \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_i 为设备 i 的电功率; Q_i 为设备 i 的热功率; $P_{i,max}$ 为最大电功率; $P_{i,min}$ 为最小电功率; $Q_{i,max}$ 为最

大热功率; $Q_{i,\min}$ 为最小热功率; $P_{GT,i}, P_{GT,i+1}$ 分别为当前时段及下一时段燃气轮机发出的电功率; $Q_{GT,i}, Q_{GT,i+1}$ 分别为当前时段及下一时段燃气轮机发出的热功率; β_{GT} 为燃气轮机的最大爬坡速率。

2 模型求解

本文搭建的综合能源系统优化模型中含有多个目标函数及约束条件,这类问题一般可运用单纯形算法、非线性规划算法、遗传算法、粒子群算法等优化算法。这些算法以各自的逻辑最终都能求解出优化模型,但无法完全解决局部搜索和全局搜索这两者间的矛盾。传统的优化算法在求解方面操作简单且精度较高,但运行稳定性差、结果容易陷入局部最优、寻优能力比较差的缺点也无法避免。

本文采用改进的PSO算法对模型求解,对多目标函数进行处理及优化改进基本PSO算法,在保证获取最优的情况下,更精确地衡量系统不同运行模式下对规划的影响。

2.1 多目标函数处理

采用隶属度函数对多目标函数进行处理^[15],将其分别归一化、线性叠加,进而将多目标函数合并成一个统一的函数进行求解。目前,如何确立隶属度函数是一个有待深入探究的问题,虽然研究人员对模糊概念的理解、应用形式各有不同,但是若能在处理模糊信息问题时有效体现模糊原理,则仍有异曲同工的作用。因此,在确定过程中带有主观性,研究人员结合了自己的部分先验经验,对于最终结果虚拟性判定。本节模型中的经济性、系统不平衡性指标的隶属度函数、环保性的隶属度函数如下式所示:

$$A_L(g_i) = \begin{cases} 0 & g_i \leq g_{i,\min} \\ \frac{(g_i - g_{i,\min})}{(g_{i,\max} - g_{i,\min})} & g_{i,\min} \leq g_i \leq g_{i,\max} \\ 1 & g_i \geq g_{i,\max} \end{cases} \quad (18)$$

$$A_S(g_i) = \begin{cases} 1 & g_i \leq g_{i,\min} \\ \frac{(g_{i,\max} - g_i)}{(g_{i,\max} - g_{i,\min})} & g_{i,\min} \leq g_i \leq g_{i,\max} \\ 0 & g_i \geq g_{i,\max} \end{cases} \quad (19)$$

式中: A_L, A_S 为目标函数的隶属度,前者为偏大型,后者为偏小型; g_i 为第*i*个指标的目标函数; $g_{i,\max}, g_{i,\min}$ 分别为第*i*个目标的隶属度函数最大值和最小值。

本节模型综合考虑了经济性、环保性和系统

不平衡性,但指标相互之间关系比较复杂,容易因为自身主观能动性导致在选择决策系数时,系统优化运行不合理。因此,针对本文多目标模型使用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)来确定隶属度函数权重系数^[16]。AHP的特点就是对于复杂问题进行抽离化处理,使得整体综合问题转化为单一简单问题,将维度降低,从而可以通过逻辑关联进行数学建模求解。AHP具体步骤如下:

1)用1~9的整数 a_{ij} 表示每个指标重要程度;

2)构造判断矩阵如下式所示:

$$D = [a_{ij}]$$

其中

$$a_{ij} = a_i/a_j \quad (20)$$

式中: D 为判断矩阵; a_i, a_j 分别为第*i*个和第*j*个指标的重要程度。

3)层次单排序及其一致性检验。一致性检验如下式所示:

$$\begin{cases} CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \\ CR = \frac{CI}{RI} \end{cases} \quad (21)$$

式中: CI 为一致性指标; $\lambda_{\max}$ 为矩阵最大的特征根; CR 为一致性比率,一般当 $CR < 0.1$ 时,认为 D 的不一致程度在容许的范围内,有满意的一致性,通过一致性检验; RI 为平均随机一致性指标,与判别矩阵的维度有关。

4)将判别矩阵的特征向量进行标准化,得到综合权重。

所构建模型中会出现经济与系统不平衡两个指标交叉的情况,遂在指标权重获取后,引入重合系数(取值0.7),同时标准化处理3个目标函数,得到3个目标权重分别为:0.36, 0.33和0.31。最后,得到综合能源系统的目标函数,可简化为下式所示:

$$C = \varepsilon_1 A_1(f_1) + \varepsilon_2 A_2(f_2) + \varepsilon_3 A_3(f_3) \quad (22)$$

式中: ε_i 为各目标的权重系数; $A_i(f_i)$ 为各目标的隶属度函数, $i = 1, 2, 3$ 。

2.2 改进粒子群(PSO)算法

2.2.1 惯性权重因子的改进

在传统PSO算法中,惯性权重 ω 通常为常数或者线性变化,这样会使算法陷入局部最优。本文使用非线性递减方法调整 ω 值,可以较好地平衡PSO算法的全局和局部搜索能力,前期权重较大,全局中能快速搜索初期粒子,后期惯性权重

减小,在局部中寻找最优解,同时随着惯性权重的递减,粒子运动轨迹将逐步逼近最优解。求解 ω 的非线性公式如下式所示:

$$\omega(n) = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \exp[-k(n/n_{\max})]^3 \quad (23)$$

式中: $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 分别为迭代开始和结束时的惯性权重,取值为1和0; k 为控制因子,影响惯性权重变化趋势,取值为10; n 为本轮迭代次数; $n_{\max}$ 为最大迭代次数。

2.2.2 个体最优值的改进

首先,引入免疫算法中的抗体浓度来评价算子,可以避免粒子群陷入局部最优解。抗体浓度可用来表征当前样本的丰富程度,也可以一定程度反映解的泛化性和鲁棒性,当抗体浓度过高时则意味着种群的丰富性较低,这种情况不利于样本的泛化性提升,算法容易陷入局部最优解。所以,抗体浓度评价算子能够识别到浓度过高的个体,并且能够起到抑制的作用,保护个体多样性。

然后,通过类比抗体浓度评价算子,构建粒子浓度评价算子,综合考虑粒子亲和度和适应度,同时,也提高了全局搜索性能,评价算子公式如下:

$$d(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P(i,j) \quad (24)$$

$$P(i,j) = \begin{cases} 1 & \|P_i - P_j\|_2 < \gamma_2 \\ 0 & \|P_i - P_j\|_2 \geq \gamma_2 \end{cases} \quad (25)$$

式中: $d(i)$ 为粒子 i 的亲密度,也即浓度评价算子; $P(i,j)$ 为粒子 i 与 j 的密集关系,0为稀疏,1为密集; N 为粒子总数; P_i, P_j 分别为粒子 i 和 j 的位置, $i, j=1, 2, \dots, N$; γ_2 为两个粒子作为密集的最大距离。

模型中采用了粒子浓度评价算子后,即为粒子群算法增加了浓度惩罚因子,以最小化惩罚为目标,重新开展算法计算。在粒子群单次迭代时,先使用适应度评价函数计算粒子适应度值,然后再计算粒子亲密度函数,用粒子适应度值与该粒子的亲密度值的差额,作新的适应度。粒子由小到大重新排序,取最小值为此次迭代的最优值。粒子再进行更新,进入下一次迭代,依此循环往复。

2.3 改进后的算法流程

基于以上本文模型对基本粒子群算法进行改进,采用非线性惯性权重,引入粒子浓度评价算子,提出了对基本粒子群的惯性权重因子和个体最优值的改进方法。图2为改进PSO算法优化

求解流程图。

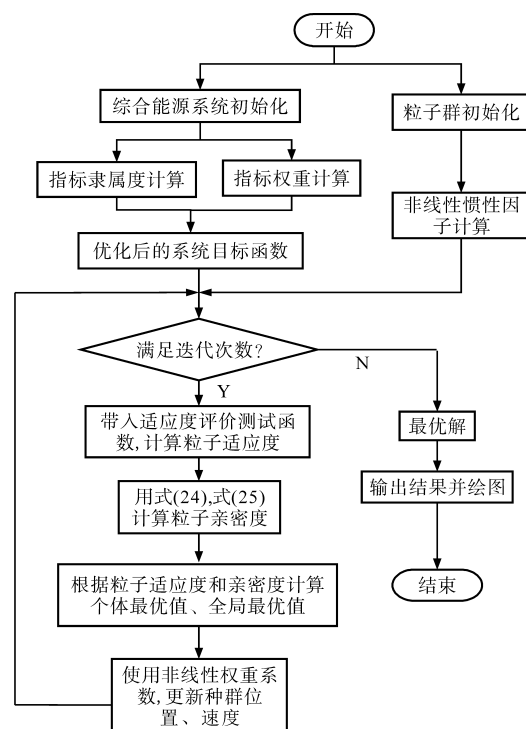


图2 改进PSO算法优化求解流程

Fig.2 Improved PSO algorithm to optimize the solution process

3 算例分析

3.1 算例参数

某园区 IES 能量流结构如图1所示。园区包含了生活区、办公区和工业区3个子区域,3个子区域以储能为能源枢纽连接构成多园区 IES。本文以其中一个园区(生活区)为研究对象进行优化分析。

仿真中, IES 系统中主要的设备相关基础参数如表1所示。园区电价如图3所示,各园区日前预测数据如图4所示。

表1 园区主要设备的相关基础参数

Tab.1 Relevant basic parameters of main equipment in the park

设备名称	参数	设备容量/kW			参数	数值		
		生活区	办公区	工业区		生活区	办公区	工业区
燃气轮机	P_{GT}	1 200	2 600	14 000	η_{GT}	0.3	0.3	0.3
燃气锅炉	Q_{GB}	1 000	1 600	4 100	η_{GB}	0.9	0.9	0.9
储电设备	P_{ES}	300	600	1 600	η_{HE}	0.9	0.9	0.9
余热锅炉	Q_{HE}	10 000	20 000	30 000	η_{EC}	4	4	4
电制冷机	P_{EC}	300	600	1 100	η_{AC}	1.2	1.2	1.2
风机	P_{WT}	1 300	3 200	4 900				
光伏	P_{PV}	500	1 500	4 200				

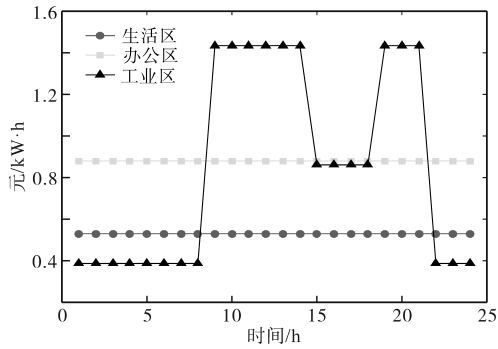
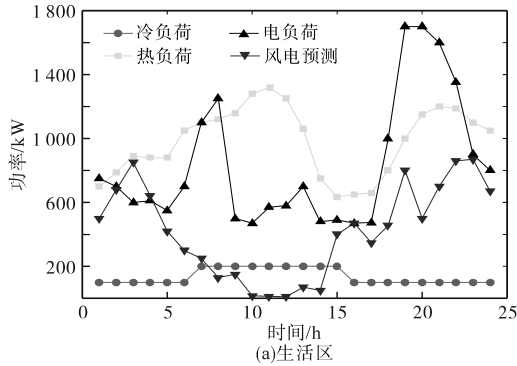
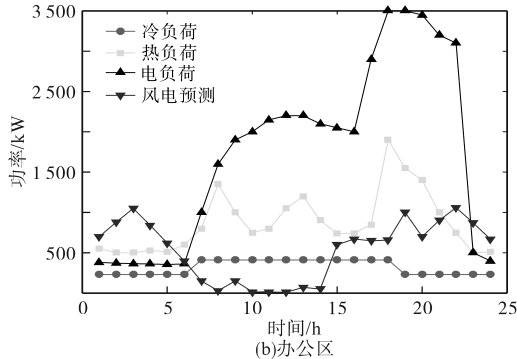


图3 各园区电价情况

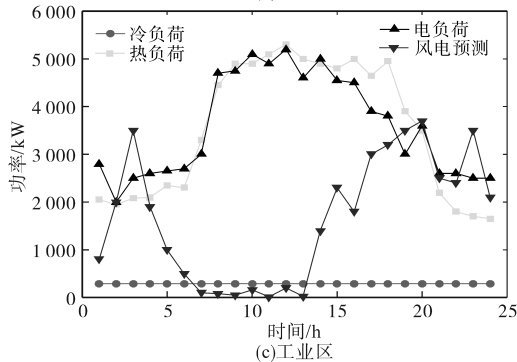
Fig.3 Electricity price of each park



(a)生活区



(b)办公区



(c)工业区

图4 综合园区冬季典型负荷参数及风力机组实际出力值

Fig.4 Typical load parameters and actual output value of wind turbine in winter in the comprehensive park

3.2 算法结果对比分析

本文采用标准测试函数 Sphere, Rastrigrin 分别对基本 PSO 算法和改进 PSO 算法进行对比,检验本节中所提算法的收敛性与稳定性。Sphere 为单峰函数,对于整体求最优解过程进行监测,Ras-

trigrin 为多峰函数,局部最优点的数量随着维数的增加呈指数型递增。标准测试函数 Sphere, Rastrigrin 的表达式如下式所示:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (26)$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10] \quad (27)$$

其中,标准测试函数 Sphere 和 Rastrigrin 的全局最优点都是 $x_i = 0, f(x) = 0$ 。

验证改进 PSO 算法的标准测试函数相关参数如表 2 所示。

表2 标准测试函数的相关参数

Tab.2 Relevant parameters of standard test function

测试函数	维数	搜索范围	最优值	位置值
Sphere	20	$[-10, 10]$	0	$[0, \dots, 0]$
Rastrigrin	20	$[-5.12, 5.12]$	0	$[0, \dots, 0]$

采用相同的随机粒子进行对比分析,以减小随机误差。对标准测试函数进行 20 次测试,测试结果如表 3 所示。

表3 不同粒子群算法测试结果对比

Tab.3 Comparison of test results of different particle swarm optimization algorithms

测试函数	测试类别	基本 PSO	改进 PSO
Sphere	全局最优值	3.001 03	0.000 049
	方差	16.983 27	0.000 008
	最优值平均值	13.412 96	0.006 096
Rastrigrin	全局最优值	26.139 47	0.001 452
	方差	245.511 13	0.001 501
	最优值平均值	63.752 82	0.073 457

由表 3 可知,在基本 PSO 中, Sphere 的全局最优值、最优值平均值分别为 3.001 03 和 13.412 96; Rastrigrin 的全局最优值、最优值平均值分别为 26.139 47 和 63.752 82,由此也可以看出,全局最优值优于最优值平均值。同时,两个测试函数在全局最优值、方差、最优值平均值方面,改进 PSO 算法的值都几乎接近于零,其收敛速度和全局搜索能力更具优势。特别是 Rastrigrin 函数尤为突出。图 5 为标准测试函数进行连续多次的实验结果。

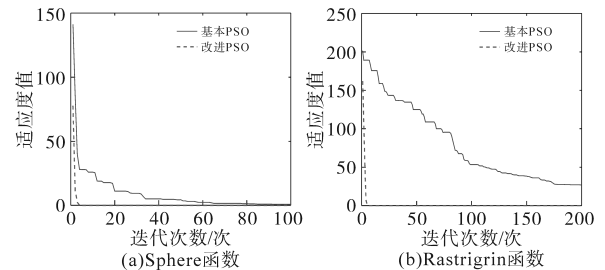


图5 标准测试函数最优适应度平均值进化情况

Fig.5 Evolution of average value of optimal fitness of standard test function

由图5可以看出,Sphere函数中基本PSO算法和改进PSO算法两条曲线基本都趋向于0,但后者收敛速度更快。Rastrigrin函数中基本PSO算法不能收敛到0,改进PSO算法能快速收敛到0。综上所述,本次算法的改进,对收敛性和全局适应性有着较好的效果。

3.3 综合能源系统设备出力分析

基于改进粒子群算法的综合能源系统设备出力优化情况如图6所示。

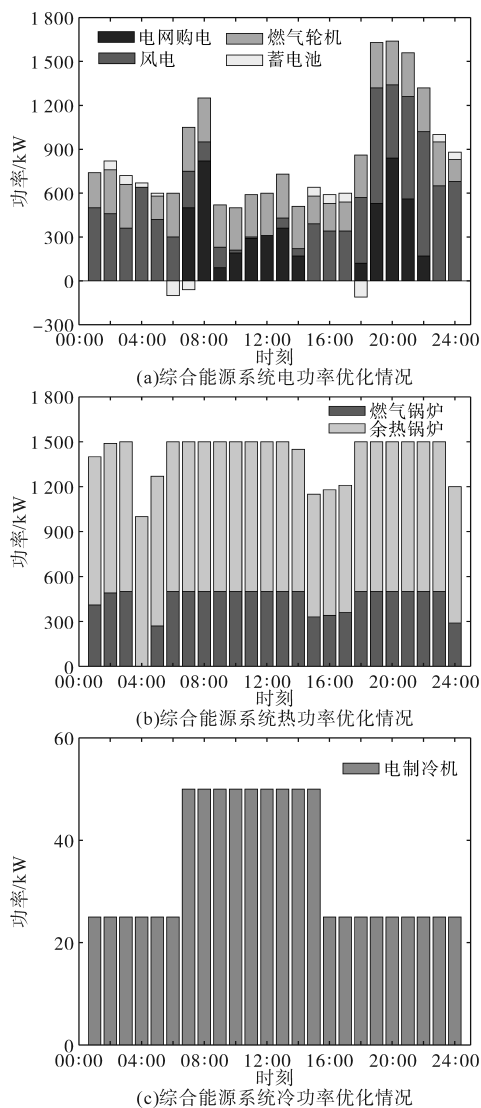


图6 设备出力优化结果

Fig.6 Optimization results of equipment output

从图6中可知,系统的电功率主要来自于GT,WT和电网购电。00:00—06:00及15:00—24:00时段,风力较足,优先消纳风电。GT从早上运行到晚上几乎全天工作。用电高峰期时,通过电网购电弥补缺额部分,从而使得从宏观上对于电网的调度进行平衡优化,其余不足部分由储能电池补充和GT出力。园区热功率需求由燃气

锅炉和余热锅炉供应,北方冬天环境下,暖气全天供应,供暖设备出力较多。多园区IES的冷功率来源包括AC和EC,本文模型只针对生活园区,因此,冷负荷需求全部由EC提供。并且由于冬季天气寒冷,EC较少出力。

3.4 算法优化前后系统成本分析

综合考虑系统经济性、环保性和出力不平衡性,分别采用基本PSO算法和改进PSO算法对模型进行求解。求解结果显示,若同时兼顾系统3个指标,采用基本粒子群算法求解模型时,系统总运行成本为19 513元;而采用改进后的粒子群算法求解模型时,系统总运行成本为15 607元,同比下降了15.7%。算法优化前、后系统运行综合成本有所下降。因此,改进后的粒子群算法明显较优,能够找到更好的最优解,有效保证了系统的经济性。

3.5 不同目标下系统综合分析

将IES模型分别以经济最优和环保性最优做单目标优化,运行结果与综合目标最优对比,并以第3个目标出力不平衡性作为评判系统负荷所需功率差额的指标,运行结果如表4所示。出力不平衡率越高,表明系统负荷所需功率差额越多,模型效果越差;反之,系统负荷所需功率差额越少,模型效果越好,从而减少综合能源系统对外部市场的依赖。

表4 不同目标系统优化结果对比

方案	成本/元	CO ₂ 排放量/kg	出力不平衡率/%
多目标优化方案	15 607	21 180	1.4
经济性方案	14 745	22 311	4.6
环保性方案	15 849	19 046	10.7

由表4可以看出,当经济性为优化指标时,系统所需成本为14 745元,CO₂排放量为22 311 kg,与多目标优化方案和环保性方案相比,所需成本分别减少了862元和1 104元,CO₂排放量分别增加了1 131 kg和3 265 kg,说明经济性最佳以牺牲环保性为代价;当环保性为优化指标时,系统所需成本为15 849元,CO₂排放量为19 046 kg,与多目标优化方案和经济性方案相比,所需成本分别增加了242元和1 104元,CO₂排放量分别下降了2 134 kg和3 265 kg。同时,环保性方案的出力不平衡率高达10.7%,说明其最佳将以经济性差和系统负荷所需功率差额不平衡为代价。多目标优化方案综合考虑经济性、环保性及出力不平衡

性,虽然其成本、CO₂排放量2项指标不是最优,但是出力不平衡率只有1.4%,明显优于单目标优化,说明其方案能减少系统对外部市场的依赖,并为以后IES整体规划运行提供前期基础。

4 结论

本文建立了一种基于改进PSO算法的综合考虑系统经济性、环保性及出力不平衡性的IES多目标优化模型。首先,以系统经济性、环保性和出力不平衡性为目标,构建IES多目标调度模型;其次,对3个指标进行归一化处理,确定目标权重系数;最后,引入粒子浓度评价算子改进粒子群算法,并对模型进行求解。算例分析表明,改进后的PSO算法具有良好的收敛性和全局适应性;系统多目标优化可减少综合能源系统对外部市场的依赖,为加强整体规划运行提供依据。

本文构建的IES是日前经济调度优化模型,但往往在实际运行情景中会存在一定偏差。可控电源和负荷功率需要在具体实施中进行实时调度调整,因此后续将尝试研究综合能源系统的实时调度优化模型。

参考文献

- [1] 杨晨曦,高立艾,唐巍. 基于贝叶斯网络时序模拟的气电耦合系统可靠性评估[J]. 电气传动, 2021, 51(11): 75-80.
YANG Chenxi, GAO Liai, TANG Wei. Reliability evaluation of gas-electric coupling system based on bayesian network time series simulation[J]. Electric Drive, 2021, 51(11): 75-80.
- [2] 欧阳翰,吕林,刘俊勇,等. 考虑可再生能源不确定性的热电联供型微网随机鲁棒经济调度[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 19-28.
OUYANG Han, LÜ Lin, LIU Junyong, et al. Stochastic robust economic dispatch of combined heat and power microgrid considering renewable energy uncertainty[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 19-28.
- [3] 包哲. 基于智能算法的综合能源系统动态建模仿真与协同运行优化集成研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
BAO Zhe. Study on coupled dynamic simulation and synergistic operation optimization of integrated energy system based on intelligent algorithm[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2020.
- [4] 王安阳,单菲菲,钟崑,等. 基于非支配排序遗传算法-Ⅲ的工业园区综合能源系统多目标优化调度[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 46-53.
WANG Anyang, SHAN Feifei, ZHONG Wei, et al. Multi-objective optimal dispatching of industrial park integrated energy systems based on NSGA-Ⅲ[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 46-53.
- [5] 施泉生,王子轩,任洪波,等. 基于改进的模拟退火-粒子群算法的区域综合能源系统经济性运行[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10801-10807.
SHI Quansheng, WANG Zixuan, REN Hongbo, et al. Economical operation of regional integrated energy system based on improved simulated annealing-particle swarm optimization[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(26): 10801-10807.
- [6] 耿宗璞,刘海涛,袁华骏,等. 基于BFGS信赖域算法的电-气综合能源系统能流计算[J]. 电气自动化, 2022, 44(1): 57-60.
GENG Zongpu, LIU Haitao, YUAN Huajun, et al. Energy flow calculation of electricity-gas integrated energy system based on BFGS trust region algorithm[J]. Electrical Automation, 2022, 44(1): 57-60.
- [7] 张磊,王海华,成霞. 基于SOCP的综合能源系统日前调度概率最优能量流[J]. 电子技术与软件工程, 2021, 22(13): 210-212.
ZHANG Lei, WANG Haihua, CHENG Xia. Day-ahead scheduling probabilistic optimal energy flow for integrated energy system based on SOCP[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2021, 22(13): 210-212.
- [8] 邹琦琦,杨国华,郑豪丰,等. 基于改进小生境PSO算法的综合能源系统调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(7): 47-52, 60.
ZOU Yuqi, YANG Guohua, ZHENG Haofeng, et al. Dispatching for integrated energy system based on improved niche PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(7): 47-52, 60.
- [9] 陈振宇,杨斌,杨世海,等. 基于模糊C均值聚类算法的电-热互联综合能源系统负荷预测[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(6): 94-98.
CHEN Zhenyu, YANG Bin, YANG Shihai, et al. Load prediction of power-thermal interconnection integrated energy system based on fuzzy C-means clustering algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2021, 40(6): 94-98.
- [10] 王新迎,赵琦,赵黎媛,等. 基于深度Q学习的电热综合能源系统能量管理[J]. 电力建设, 2021, 42(3): 10-18.
WANG Xinying, ZHAO Qi, ZHAO Liyuan, et al. Energy management approach for integrated electricity-heat energy system based on deep Q-learning network[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(3): 10-18.
- [11] DING Y, SINGH C, GOEL L, et al. Short-term and medium-term reliability evaluation for power systems with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 896-906.
- [12] 刘洋邑. 基于多目标优化的区域综合能源系统规划研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
LIU Yangyi. Research on regional integrated energy system planning based on multi-objective optimization[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

(下转第81页)

- Aerospace Engineering, 2020, 39(8): 1177-1183.
- [13] 孟玲聪, 刘福才, 赵文娜, 等. 考虑重力影响的柔性关节空间机械臂自适应迭代学习控制[J]. 高技术通讯, 2020, 30(10): 1078-1084.
- MENG Lingcong, LIU Fucui, ZHAO Wenna, et al. Adaptive iterative learning control for flexible joint space manipulator in different gravity environment[J]. Chinese High Technology Letters, 2020, 30(10): 1078-1084.
- [14] 韩俊庆, 吴爱国, 董娜. 基于滑模干扰观测器的机械臂终端滑模控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2749-2757.
- HAN Junqing, WU Aiguo, DONG Na. Terminal sliding mode control of manipulator based on sliding mode disturbance observer[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2020, 51(10): 2749-2757.
- [15] 屈海军, 杨森. 基于二型模糊遗传控制器的冗余自由度机械臂运动控制的研究[J]. 中国工程机械学报, 2021, 19(2): 117-122.
- QU Haijun, YANG Sen. Research on motion control of redundant degree-of-freedom manipulator based on type II fuzzy genetic controller[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2021, 19(2): 117-122.
- 收稿日期: 2022-12-07
修改稿日期: 2023-01-04

=====

(上接第48页)

- [13] 于新海, 王鑫, 苏日古格, 等. 基于GA和IPSO的微电网调度优化与对比分析[J]. 电气传动, 2022, 52(22): 38-43.
- YU Xinhai, WANG Xin, SU Riguge, et al. Microgrid dispatching optimization and comparative analysis based on GA and IPSO[J]. Electric Drive, 2022, 52(22): 38-43.
- [14] 武志宏, 杨永标, 李熙, 等. 综合能源系统中多能源协同优化方法研究[J]. 电气传动, 2022, 52(2): 67-73.
- WU Zhihong, YANG Yongbiao, LI Xi, et al. Research on multi-energy collaborative optimization method in integrated energy system[J]. Electric Drive, 2022, 52(2): 67-73.
- [15] 徐建军, 赵书琪, 马睿, 等. 基于改进粒子群优化算法的综合能源系统多目标优化[J]. 广东电力, 2021, 34(5): 73-81.
- XU Jianjun, ZHAO Shuqi, MA Rui, et al. Multi-objective optimization of integrated energy system based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(5): 73-81.
- [16] 陈中豪, 林晓明, 陈丽萍, 等. 社区级综合能源系统多目标模糊日前优化调度模型[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 93-99.
- CHEN Zhonghao, LIN Xiaoming, CHEN Liping, et al. Multi-objective fuzzy optimal day-ahead dispatching model for integrated community energy system[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 93-99.
- 收稿日期: 2022-08-04
修改稿日期: 2022-08-28