

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220006

基于改进旗鱼算法的综合能源系统能量管理

张政林, 张惠娟, 孙文治, 李玲玲

(省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津 300130)

摘要: 综合能源系统在实现可再生能源利用中具有重要价值。为使系统中各设备出力得到进一步优化, 将生物质能与综合能源系统相结合, 并且将各个时刻的柔性负荷纳入能量调度, 构建了一种沼气发电系统、光伏发电系统与微型燃气轮机驱动下的源-储-荷协同多目标能量管理模型。以系统与主电网的交互及燃料费用、惩罚费用和设投资及运行费用为优化目标, 以用户综合用能满意度、新能源利用率和电能自治程度为评价指标, 求解模型最优配置。利用非线性攻击方式、差分变异策略、哈里斯鹰算法中的软包围策略及防止算法停滞策略来改善旗鱼算法的全局搜索能力。通过算例对比分析表明, 所提出的改进算法和能量管理模型在不同场景下均有效地提高了经济效益和环保效益, 并且改进旗鱼算法在全局寻优和搜索精度等方面具有优势。

关键词: 综合能源系统; 能量管理模型; 旗鱼算法; 运行策略; 生物质能

Energy management of an integrated energy system based on an improved sailed fish optimizer algorithm

ZHANG Zhenglin, ZHANG Huijuan, SUN Wenzhi, LI Lingling

(State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: An integrated energy system is important in the utilization of renewable energy. Combining biomass energy with an integrated energy system and incorporating flexible loads at various moments into energy dispatch, a source-storage-load multi-objective energy management model driven by the synergy of biogas and photovoltaic power generation systems and a micro gas turbine is constructed. This is to further optimize the output of each part of the system. The optimal configuration of the model is established, taking the internal interaction of the system and fuel costs, penalty costs, equipment investment and operating costs as the optimization goals, and taking the user's comprehensive energy satisfaction, new energy utilization rate and electric energy autonomy as evaluation indicators. Non-linear attack methods, differential mutation, soft encirclement in the Harris hawk optimization algorithm and the algorithm stagnation prevention strategies are used to improve the global search ability of the sailed fish optimizer algorithm (SFO). Comparative analysis of calculation examples shows that the proposed improved algorithm and energy management model effectively improve economic and environmental benefits in different scenarios, and the ISFO algorithm has advantages in global optimization and search accuracy.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Tianjin (No. 19JCZDJC32100).

Key words: integrated energy system; energy management model; sailed fish optimizer algorithm; operational strategy; biomass energy

0 引言

近年来, 随着工业化进程的不断推进以及社会经济的快速发展, 用于制冷、制热以及供电时所消

耗的能源增加, 传统化石能源的逐渐短缺, 因此需要对供能系统和能源结构做出优化^[1-3]。相比较于传统单一的能源供应系统, 综合能源系统(integrated energy system, IES)凭借其可再生能源利用率高、运行控制灵活以及对环境污染小等特点^[4-7], 有效地将分布式电源和储能设备及负荷用户整合为一体, 提高系统的经济性、环保性和多样性, 正成为当前国

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(19JCZDJC32100);
河北省自然科学基金资助项目(E2018202282)

内外解决区域型供能问题和系统集成多样化问题的重要措施^[8-15]。生物质能的优点在于清洁低碳、替代性好以及材料来源丰富,在沼气发电等方面具有广阔的发展前景^[16]。

基于综合能源系统的优化调度和运行策略,文献[17]使用改进多目标灰狼优化算法对冷热电系统进行求解。文献[18]提出了一种基于可能度的冷热电系统微网区间优化调度模型,实现其经济和环保效益。文献[19]提出了一种基于冷热电三联产设施的气电互联网络多目标优化模型,并使用 NASA-II 算法进行求解。文献[20-25]研究了源-荷互动调度策略和需求侧响应策略在能量管理中的可行性,为负荷响应调度出力技术的发展作出实践参考。

现有的文献在模型求解中应用算法较为单一,结果可能导致其在综合能源系统能量优化管理中的全局搜索能力和寻优能力欠缺,且大多从综合能源系统的经济效益最大化等角度进行分析,对生物质能的考虑较少,对沼气发电余热回收再利用的研究较少,柔性负荷参与系统调度的方式不够灵活。因此,本文采用一种改进旗鱼算法(improved sailed fish optimizer, ISFO)对系统模型进行最优求解,将生物质能与沼气发电技术结合应用到综合能源系统中,并且把柔性负荷纳入系统经济调度范围,在保障冷热电负荷需求的同时,利用生物质能带来的电能和热能。以设备出力为优化变量进行最优配置,通过算例分析证明基于改进旗鱼算法的综合能源系统具有良好的可行性,以及生物质能对综合能源系统的未来发展具有重要意义。

1 含生物质能的综合能源系统

含生物质能的综合能源系统结构框架如图1所示,其主要设备包括光伏发电系统、沼气发电系统、微型燃气轮机、吸附式制冷机以及储能装置等。

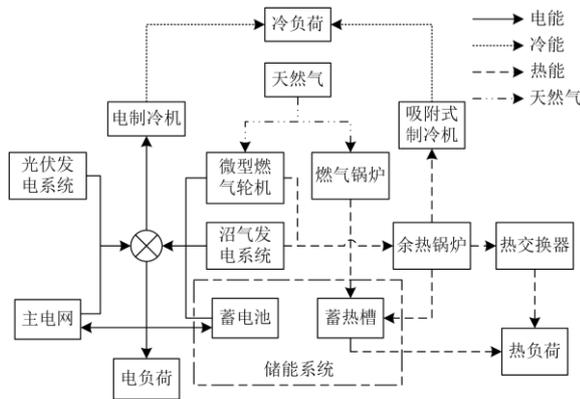


图1 综合能源系统结构

Fig. 1 Structure diagram of IES system

2 综合能源系统能量管理模型

2.1 目标函数

文献[26]考虑了一种结合单日系统运行成本、污染物排放和一次能源利用率3个指标的多目标优化模型,利用线性加权法构建目标函数。本文在此基础上,选取一天时间为研究周期,以电网交互及燃料费用、惩罚费用、设备投资及运行费用为目标函数,构建多目标能量管理模型。

2.1.1 交互及燃料费用

交互及燃料费用(f_1)包括综合能源系统与电网交互的费用(F_{Grid})和燃料消耗费用(F_{fuel}),表达式为

$$\min(f_1) = F_{Grid} + F_{fuel} \quad (1)$$

$$F_{Grid} = k_{buy} \sum_{t=1}^T P_{buy}(t) - k_{sell} \sum_{t=1}^T P_{sell}(t) \quad (2)$$

$$F_{fuel} = \sum_{t=1}^T c_g [G_{mt}(t) + G_{gb}(t)] \quad (3)$$

式中: k_{buy} 、 k_{sell} 分别为 t 时刻主电网的购电单价和售电单价; $P_{buy}(t)$ 、 $P_{sell}(t)$ 分别为 t 时刻的购电功率和售电功率; c_g 为天然气的单价; $G_{mt}(t)$ 、 $G_{gb}(t)$ 分别为 t 时刻燃气轮机和燃气锅炉消耗的天然气的量。

2.1.2 惩罚费用

惩罚费用(f_2)包括环境污染惩罚费用(F_{poll})、能量供需不平衡的补偿费用(F_{PU})和柔性负荷响应调度费用(F_f)。

$$\min(f_2) = F_{poll} + F_{PU} + F_f \quad (4)$$

微型燃气轮机、燃气锅炉、吸附式制冷机运行时以及与主电网交互电能过程均会消耗化石能源,并产生一定量的碳化物、硫化物和氮化物等废气污染物,处理这些污染物所需要的费用即为环境污染惩罚费用,如式(5)所示。

$$F_{poll} = \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^K \left\{ \left[\sum_{i=1}^N (c_k \chi_{i,k}) P_i(t) \right] + (c_k \chi_{grid,k}) P_{buy}(t) \right\} \quad (5)$$

式中: $k=1,2,3$,且 K 为污染物的种类, $K \in \{CO_2, SO_2, NO\}$; c_k 为处理第 k 类污染物应缴纳的处罚金单价; $\chi_{i,k}$ 为第 i 类设备对第 k 类污染物的排放系数; $\chi_{grid,k}$ 为从主电网购电时第 k 类污染物的排放系数; $P_i(t)$ 分别为 t 时刻第 i 类设备的发电量。

在综合能源系统中,将新能源输出的多余电能出售给主电网,负荷较大时产生的能量缺额通过从主电网购电补偿,但受输电线路的功率约束购买电量和出售电量并非无限制,所以会产生能量过剩和能量缺额,为了保证综合能源系统新能源的利用率

和供能可靠性, 本文引入浪费能量处罚费用(F_{was})和能量缺额处罚费用(F_{vac})。

$$F_{\text{PU}} = F_{\text{was}} + F_{\text{vac}} \quad (6)$$

$$\begin{cases} F_{\text{was}} = \sum_{t=1}^T k_{\text{was}} [P_{\text{was}}(t) + H_{\text{was}}(t) + Q_{\text{was}}(t)] \\ F_{\text{vac}} = \sum_{t=1}^T k_{\text{vac}} [P_{\text{vac}}(t) + H_{\text{vac}}(t) + Q_{\text{vac}}(t)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: k_{was} 和 k_{vac} 分别为浪费和缺额能量惩罚单价; $P_{\text{was}}(t)$ 、 $P_{\text{vac}}(t)$ 、 $H_{\text{was}}(t)$ 、 $H_{\text{vac}}(t)$ 、 $Q_{\text{was}}(t)$ 、 $Q_{\text{vac}}(t)$ 分别为 t 时刻浪费和缺额的电能、热能、冷能。

柔性负荷响应调度费用(F_f)包括电负荷转移费用(F_{mov})和冷热负荷的削减费用(F_{cut})。

$$F_f = F_{\text{cut}} + F_{\text{mov}} \quad (8)$$

$$\begin{cases} F_{\text{cut}} = c_{\text{cut}} \sum_{t=1}^T [H_{\text{cut}}(t) + Q_{\text{cut}}(t)] \\ F_{\text{mov}} = c_{\text{mov}} \sum_{t=1}^T [P_{\text{mov}}(t)] \end{cases} \quad (9)$$

式中: c_{cut} 、 c_{mov} 分别为削减冷热负荷的单价和转移电负荷的单价; $H_{\text{cut}}(t)$ 、 $Q_{\text{cut}}(t)$ 分别为 t 时刻削减的热负荷和冷负荷; $P_{\text{mov}}(t)$ 为 t 时刻转移的电负荷。

2.1.3 设备投资及运行费用

$$\min(f_3) = F_{\text{DG}} + F_{\text{OM}} \quad (10)$$

$$F_{\text{DG}} = \mu(r, l) \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} \frac{c_i^{\text{DG}} x_i P_i}{365l} \quad (11)$$

$$F_{\text{OM}} = \mu(r, l) \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} \frac{c_i^{\text{OM}} x_i P_i}{365l} \quad (12)$$

式中: F_{DG} 和 F_{OM} 分别为设备投资成本和运行成本; $\mu(r, l)$ 为折旧系数, r 为设备的折现率, l 为设备的寿命周期; N_{DG} 为设备的类型数; c_i^{DG} 为第 i 类设备的投资成本; c_i^{OM} 为第 i 类设备的运维成本; x_i 为第 i 类设备的数量; P_i 为第 i 类设备的输出功率。

2.2 评价指标

2.2.1 综合用能满意度

引入柔性负荷参与系统的能量调节过程, 由冷/热负荷的削减量和电负荷的转移量所导致系统无法满足负荷需求, 本文通过负荷用户的综合用能满意度(s)对系统的供能情况进行评价。

$$s = 1 - \frac{\int_1^T [H_{\text{cut}}(t) + Q_{\text{cut}}(t) + P_{\text{mov}}(t)] dt}{\int_1^T [H_L(t) + Q_L(t) + P_L(t)] dt} \quad (13)$$

式中, $P_L(t)$ 、 $H_L(t)$ 、 $Q_L(t)$ 分别为 t 时刻电负荷、热负荷、冷负荷。

2.2.2 新能源利用率

考虑到综合能源系统中新能源设备出力的占比低, 采用新能源利用率(u)对光伏发电量、沼气系统的发电及余热在综合能量中所占比重进行评价。

$$u = \frac{\int_1^T [P_{\text{bio}}(t) + H_{\text{bio}}(t) + P_{\text{pv}}(t)] dt}{\int_1^T [P_{\text{Load}}(t) + H_{\text{Load}}(t) + Q_{\text{Load}}(t)] dt} \quad (14)$$

式中: $P_{\text{bio}}(t)$ 、 $H_{\text{bio}}(t)$ 分别为 t 时刻沼气系统输出电量和热量; $P_{\text{pv}}(t)$ 为 t 时刻光伏发电的输出电量;

$H_{\text{Load}}(t)$ 、 $Q_{\text{Load}}(t)$ 、 $P_{\text{Load}}(t)$ 分别为 t 时刻柔性负荷调度之后剩余的热负荷、冷负荷、电负荷。

2.2.3 电能自治率

负荷用户对电的需求通常大于对冷/热负荷的需求, 冷/热功率通过系统内部设备产能提供, 当系统中设备的发电量不能满足电负荷需求时, 通过向主电网购电来补偿, 采用电能自治率(z)对系统发电量在电负荷中的占比进行评价。

$$z = \frac{\int_1^T [P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{buy}}(t)] dt}{\int_1^T P_{\text{Load}}(t) dt} \quad (15)$$

2.3 约束条件

2.3.1 平衡约束

负荷平衡需要满足冷、热、电 3 种负荷下的平衡约束, 具体约束的表达式如式(16)、式(17)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{Load}}(t) = P_L(t) + P_{\text{mov}}(t) \\ H_{\text{Load}}(t) = H_L(t) - H_{\text{cut}}(t) \\ Q_{\text{Load}}(t) = Q_L(t) - Q_{\text{cut}}(t) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} P_{\text{bio}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{mt}}(t) + P_{\text{dis}}(t) + P_{\text{buy}}(t) = \\ P_{\text{Load}}(t) + P_{\text{er}}(t) + P_c(t) + P_{\text{sell}}(t) \\ H_{\text{bio}}(t) + H_{\text{he}}(t) + H_{\text{gb}}(t) + H_{\text{dis}}(t) = \\ H_c(t) + H_{\text{ar}}(t) + H_{\text{Load}}(t) \\ Q_{\text{ar}}(t) + Q_{\text{er}}(t) = Q_{\text{Load}}(t) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{\text{mt}}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机输出电量; $P_{\text{dis}}(t)$ 和 $P_c(t)$ 分别为蓄电池的放电量和充电量; $P_{\text{buy}}(t)$ 和 $P_{\text{sell}}(t)$ 分别为购电量和售电量; $P_{\text{er}}(t)$ 为电制冷机消耗电量; $H_{\text{he}}(t)$ 为余热锅炉输出热量; $H_{\text{gb}}(t)$ 为燃气锅炉输出热量; $H_{\text{ar}}(t)$ 为吸收式制冷机消耗的热量; $H_{\text{dis}}(t)$ 和 $H_c(t)$ 分别为蓄热槽的放电量和充电电量; $Q_{\text{ar}}(t)$ 和 $Q_{\text{er}}(t)$ 分别为吸收式制冷机和电制冷机输出冷量。

2.3.2 储能设备约束

蓄电池和蓄热槽的非线性约束表达式如式(18)

和式(19)所示, \max 和 \min 分别对应设备的上下限约束。

$$\begin{cases} E_{\text{bat}}^{\min} \leq E_{\text{bat}}(t) \leq E_{\text{bat}}^{\max} \\ P_{\text{c}}^{\min} \leq P_{\text{c}}(t) \leq P_{\text{c}}^{\max}, P_{\text{dis}}^{\min} \leq P_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{dis}}^{\max} \\ P_{\text{c}}(t)P_{\text{dis}}(t) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} H_{\text{hsk}}^{\min} \leq H_{\text{hsk}}(t) \leq H_{\text{hsk}}^{\max} \\ H_{\text{c}}^{\min} \leq H_{\text{c}}(t) \leq H_{\text{c}}^{\max}, H_{\text{dis}}^{\min} \leq H_{\text{dis}}(t) \leq H_{\text{dis}}^{\max} \\ H_{\text{c}}(t)H_{\text{dis}}(t) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $E_{\text{bat}}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的剩余电量; $H_{\text{hsk}}(t)$ 为 t 时刻蓄热槽的剩余热量。

2.3.3 产能设备约束

燃气轮机、燃料锅炉、余热锅炉的出力约束为

$$H_K^{\min} \leq H_K(t) \leq H_K^{\max} \quad (20)$$

式中, $H_K(t)$ 为 t 时刻设备 K 的输出热功率。

吸收式制冷机和电制冷机的出力约束为

$$Q_L^{\min} \leq Q_L(t) \leq Q_L^{\max} \quad (21)$$

式中, Q_L^{\max} 、 Q_L^{\min} 分别为设备 L 输出冷功率的上、下限。

2.3.4 柔性负荷约束

对于柔性负荷的转移量和削减量的上下限, 通过各时刻的负荷值进行约束。

$$\begin{cases} -0.1P_{\text{load}}(t) \leq P_{\text{mov}}(t) \leq 0.1P_{\text{load}}(t), \int_1^T P_{\text{mov}}(t)dt = 0 \\ 0 \leq H_{\text{cut}}(t) \leq 0.1H_{\text{load}}(t) \\ 0 \leq Q_{\text{cut}}(t) \leq 0.1Q_{\text{load}}(t) \end{cases} \quad (22)$$

2.3.5 联络功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{buy}}(t) \leq P_{\text{grid}}^{\max}, 0 \leq P_{\text{sell}}(t) \leq P_{\text{grid}}^{\max} \\ P_{\text{buy}}(t)P_{\text{sell}}(t) = 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中, P_{grid}^{\max} 为与主电网联络的电功率上限。

2.4 多目标判断矩阵

根据层析分析法^[27]的标准标度方法可得准则层对于目标层的判断矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$M(i) = \prod_{j=1}^n a_{i,j} \quad (25)$$

$$\bar{W}(i) = \sqrt[n]{M(i)} \quad (26)$$

$$w(i) = \frac{\bar{W}(i)}{\sum_{j=1}^n \bar{W}(j)} \quad (27)$$

式中: $M(i)$ 为判断矩阵第 i 行元素的累乘; $\bar{W}(i)$ 为

$M(i)$ 的 n 次方根; $w(i)$ 为第 i 个目标函数的权重系数, 由此可得: $w(1) = 0.637$, $w(2) = 0.258$, $w(3) = 0.105$ 。

3 算法

3.1 标准的旗鱼算法

旗鱼算法(sailed fish optimizer, SFO)是一种新型的优化算法, 具有寻优能力强, 收敛速度快的优点。SFO 算法通过模拟旗鱼种群捕食沙丁鱼群的动态过程来探索问题的最优解。旗鱼种群首先对沙丁鱼种群当前位置进行搜索围猎, 沙丁鱼群不停地探索安全空间进而改变空间位置来摆脱旗鱼种群的围捕。

3.1.1 旗鱼位置更新方式

$$X_{\text{newSF}}(i) = X_{\text{elSF}}(i) - \lambda(i)r_1 \begin{bmatrix} \frac{X_{\text{ins}}(i) + X_{\text{elSF}}(i)}{2} \\ -X_{\text{oldSF}}(i) \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中: $X_{\text{newSF}}(i)$ 为在第 i 次迭代时旗鱼更新后的位置; $X_{\text{elSF}}(i)$ 表示在第 i 次迭代时旗鱼的最优位置; $\lambda(i)$ 为系数; r_1 为一个 $[0,1]$ 的随机数; $X_{\text{ins}}(i)$ 为在第 i 次迭代时沙丁鱼的最优位置; $X_{\text{oldSF}}(i)$ 为在第 i 次迭代时旗鱼的初始位置。

3.1.2 沙丁鱼位置更新方式

沙丁鱼的位置更新方式分为两种: 第一种是种群中每一个体均进行位置更新; 第二种是种群中部分个体进行位置更新。通过旗鱼的攻击力度(AP)来判断沙丁鱼种群的更新方式, 随着迭代过程的进行, AP 线性减小到 0。当 $AP > 0.5$ 时, 更新全部沙丁鱼的位置; 当 $AP \leq 0.5$ 时, 更新部分沙丁鱼的位置。

$$AP = A(1 - 2ei) \quad (29)$$

$$a = N_s \times AP, \beta = d(i) \times AP \quad (30)$$

$$X_{\text{newS}}(i) = r[X_{\text{elSF}}(i) - X_{\text{oldS}}(i) + AP] \quad (31)$$

式中: A 和 e 代表控制旗鱼攻击力的系数; $X_{\text{newS}}(i)$ 为第 i 次迭代时沙丁鱼更新之后的位置; $X_{\text{oldS}}(i)$ 为第 i 次迭代时沙丁鱼的初始位置; i 表示当前的迭代次数; $d(i)$ 表示第 i 次迭代的变量数; a 和 β 分别为部分更新时的沙丁鱼数量和维度; N_s 为沙丁鱼的数量。

3.1.3 狩猎的最后阶段

在旗鱼群狩猎沙丁鱼群最后阶段, 如果沙丁鱼的位置比旗鱼优越, 沙丁鱼将被赋值给对应的旗鱼, 并且被移除。

$$X_{\text{SF}}(i) = X_{\text{S}}(i) \quad \text{if } f(S(i)) < f(S_{\text{F}}(i)) \quad (32)$$

式中: $X_{\text{SF}}(i)$ 和 $X_{\text{S}}(i)$ 分别为在第 i 次迭代时旗鱼和沙丁鱼的位置; $S(i)$ 和 $S_{\text{F}}(i)$ 分别为沙丁鱼和旗鱼的适应度值。

3.2 改进旗鱼算法

本文采用以下策略来改善 SFO 算法性能。第一, 针对旗鱼的攻击力度 AP , 提出了一种非线性变化公式, 用来平衡算法的全局搜索和局部搜索; 第二, 把沙丁鱼群局部搜索与差分变异相结合, 提高沙丁鱼群局部搜索时的种群性能; 第三, 受伤的沙丁鱼位置被旗鱼取代, 取代位置的沙丁鱼将哈里斯鹰算法 (harris hawks optimization, HHO) 中渐进式快速俯冲的软包围第二种策略作为探索新位置方式; 第四, 当算法陷入停滞时, 旗鱼种群中代表次优解的旗鱼会随机探索新的位置, 帮助算法跳出局部最优解。

3.2.1 非线性攻击力度

在标准 SFO 算法中, 利用旗鱼的攻击力度 AP 控制沙丁鱼群的更新策略, 算法由全局搜索过渡到局部搜索。在整个迭代过程, AP 由 2 线性减小到 0, 到迭代后期算法全局搜索能力较差, 易陷入局部最优, 采用 AP 非线性减小策略, 使算法到迭代后期仍然具备跳出局部最优进行全局搜索的能力。

$$AP = 2 \left[1 - \left(\frac{i}{I_{\max}} \right)^{1/5} \right]^{1/5} \quad (33)$$

式中, I_{\max} 为最大迭代次数。

以迭代次数为 200 次为试验数据, 验证在整个迭代过程中 AP 的变化情况, 其结果如图 2 所示。

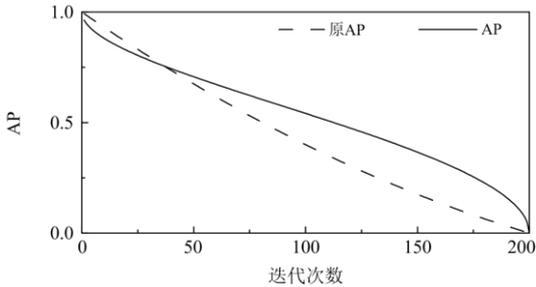


图 2 旗鱼的攻击力度

Fig. 2 Power of the sailfish's attack

从图 2 可知, 在迭代前期, AP 比原 AP 下降速度快, 加快了算法探索最优解的速度; 迭代中期, AP 变化平缓, 全局搜索能力下降, 局部搜索能力上升; 迭代后期, AP 比原 AP 大, 增强算法后期的全局搜索能力, 防止算法陷入局部最优解。

3.2.2 差分变异操作

为了提高沙丁鱼群局部搜索的能力, 引入差分变异操作, 增加种群的多样性, 提高算法全局探索能力。

$$X_{\text{newbs}}^r(i) = X_S^r(i) + F \left[X_S^{r_1}(i) - X_S^{r_2}(i) \right] \quad (34)$$

式中: $X_{\text{newbs}}^r(i)$ 为在第 i 次迭代时第 r 只沙丁鱼变异

操作之后的位置; $X_S^r(i)$ 为第 i 次迭代时第 r 只沙丁鱼变异操作之前的位置; r_1 、 r_2 和 r_3 代表随机的 3 只沙丁鱼; F 为缩放因子。

3.2.3 渐进式快速俯冲的软包围

旗鱼捕食沙丁鱼之后, 沙丁鱼结合 HHO 算法中哈里斯鹰探索最优解的方法探索新的位置。

$$X_{\text{tds}}(i) = X_{\text{ins}}(i) + r_4 \text{Levy}(\text{dim}) - AP \cdot |2uX_{\text{ins}}(i) - X_{\text{ins}}(i)| \quad (35)$$

式中: $X_{\text{tds}}(i)$ 为被替代的沙丁鱼探索的新位置; u 为 0 到 1 之间的随机数; dim 为变量的维数; Levy 为莱维飞行函数。

$$\text{Levy}(x) = 0.01 \cdot \frac{a \cdot \sigma}{|b|^{1/\xi}} \quad (36)$$

$$\sigma = \left[\frac{\Gamma(1 + \xi) \cdot \sin(\pi\xi/2)}{\Gamma((1 + \xi)/2) \cdot \xi \cdot 2^{(\xi-1)/2}} \right]^{1/\xi} \quad (37)$$

式中: a 、 b 为 [0,1] 均匀分布的随机数; ξ 是取值为 1.5 的常数。

3.2.4 跳出停滞策略

在算法迭代寻优过程中, 比较连续两次迭代的适应度值, 判断算法是否陷入停滞, 当算法陷入停滞时, 对次优旗鱼个体进行随机搜索位置信息, 增强旗鱼种群的差异度, 帮助算法跳出局部最优解。

ISFO 算法的工作流程框图如图 3 所示。

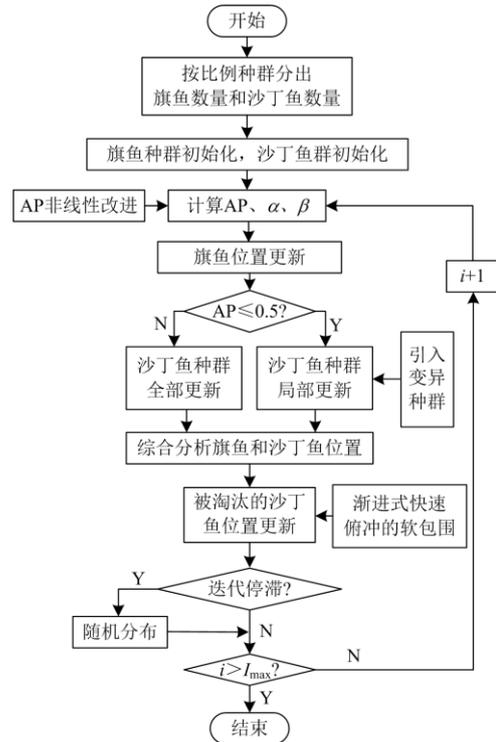


图 3 ISFO 算法运算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart of ISFO algorithm

4 算例分析

本文选取某地区夏季和冬季典型日时的负荷数据对能量管理模型进行测试。综合能源系统中各设备参数如表 1 所示, 且储能系统的最大、最小剩余容量分别为额定容量的 10% 和 90%, 蓄电池的充放电效率均取 90%, 设备折旧系数均为 0.08, 其余设备参数和电能价格参考文献[28]。各污染物处理单价分别为 0.210、0.014、0.063 元/g, 排放系数如表 2 所示, 配电网的分时电价表如表 3 所示。

表 1 综合能源系统性能参数

Table 1 Performance parameters of CCHP system

名称	运维成本/(元/kW)	额定容量/kW	寿命/年
BIO	0.021	100	20
PV	0.025	350	25
MT	0.029	500	30
HE	0.026	600	13.5
GB	0.026	400	20
CO	0.014	200	20
ER	0.014	200	20
BAT	0.0018	800	20
HSK	0.0018	400	20

表 2 污染物排放系数

Table 2 Pollutant emission coefficient

类别	g/kWh			
	MT	GB	AC	主电网
O ₂	724	254	171	922
NO	0.2	0.54	0.06	2.295
SO ₂	0.0036	0.764	0.0008	3.583

表 3 分时电价

Table 3 Time of use

时段	购电/(元/kWh)	售电/(元/kWh)	购气/(元/m ³)
00:00—06:00	0.42	0.36	2.05
06:00—16:00	0.88	0.75	
16:00—22:00	1.35	1.16	
22:00—24:00	0.42	0.36	

4.1 柔性负荷响应调度

两种典型日时 3 种负荷功率曲线以及柔性负荷相应调度结果分别如图 4 和图 5 所示, 图中标注含义参考式(16)。

如图 4 和图 5 所示, 虚线代表柔性负荷未参与调度时的负荷曲线。实线代表柔性负荷参与调度之后的负荷曲线。由表 3 可知, 00:00—06:00 和 22:00—24:00 为低谷电价, 16:00—22:00 为峰值电价, 柔性电负荷将峰值电价时刻的部分电负荷转移到低谷电价时刻, 热负荷和冷负荷的削减在各个时刻均可发生。

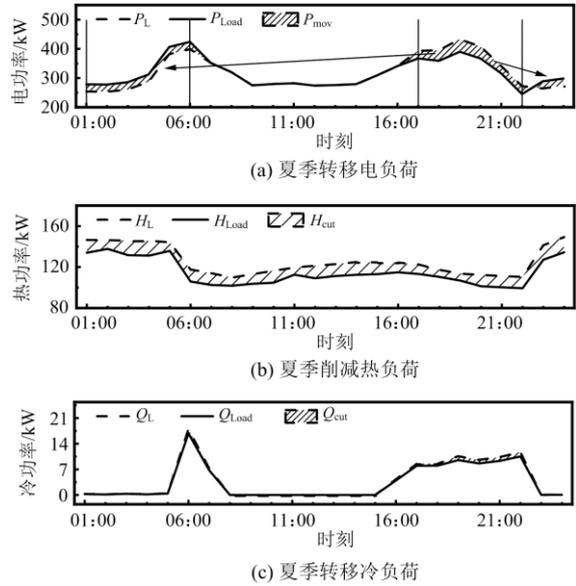


图 4 夏季柔性负荷调度响应

Fig. 4 Flexible load dispatch response in summer

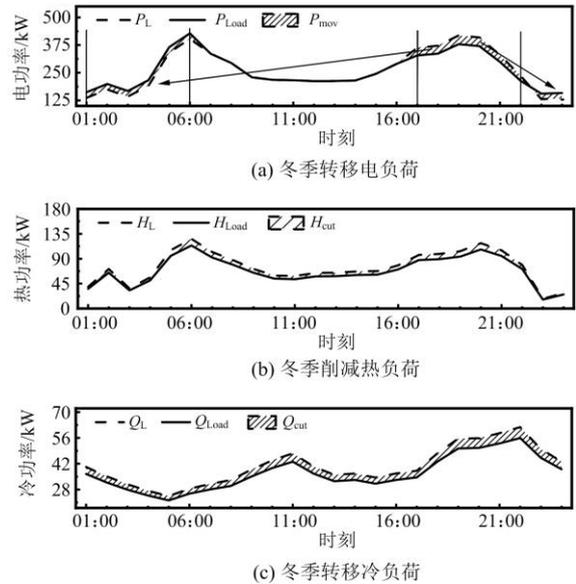


图 5 冬季柔性负荷调度响应

Fig. 5 Flexible load dispatch response in winter

4.2 综合能源系统优化结果分析

采用哈里斯鹰优化算法(HHO)、旗鱼优化算法(SFO)、改进旗鱼优化算法(ISFO)对能量管理模型进行求解, 并将典型日的交互及燃料费用(f_1)、惩罚费用(f_2)、设备投资及运行费用(f_3)以及单日综合成本(F)进行对比, 3 种算法的计算结果如表 4 所示, 同时分析系统在最优解时的综合用能满意度(s)、新能源利用率(u)以及电能自治率(z), 各种指标如表 5 所示。

表 4 综合能源系统的目标函数优化结果

Table 4 Objective function optimization of IES system

元					
类别	f_1	f_2	f_3	F	
夏季	HHO	5215.7	7262.5	24.1	5200.6
	SFO	6105.3	5998.5	48.2	5443.4
	ISFO	4279.3	4697.8	102.4	3950.0
冬季	HHO	3323.0	4941.3	38.8	3388.1
	SFO	4397.4	4451.5	93.1	3960.6
	ISFO	3085.1	3411.4	101.7	2857.0

表 5 综合能源系统的性能指标评价

Table 5 Performance index evaluation of IES system

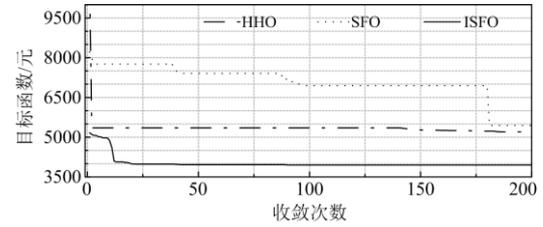
类别	s	u	z	
夏季	HHO	0.98	0.12	0.34
	SFO	0.94	0.05	0.17
	ISFO	0.95	0.33	0.32
冬季	HHO	0.97	0.26	0.50
	SFO	0.96	0.17	0.28
	ISFO	0.94	0.39	0.47

从表 4 可以看出, ISFO 算法在两种典型日时均得到综合成本最优解。在夏季时, ISFO 算法得到的综合成本比 HHO 算法和 SFO 算法分别节省了 31.67% 和 37.8%, 在冬季时, ISFO 算法得到的综合成本比 HHO 算法和 SFO 算法分别节省了 18.59% 和 38.62%, 其中两种典型日时 ISGO 算法的交互及燃料费用和惩罚费用明显下降, 设备投资及运行费用略有上升。如表 5 所示, 在两种典型日时, ISFO 算法得到结果的负荷用户综合用能满意度分别为 0.95 和 0.94, 与其他两种算法相比较低, 但是综合用能满意度大于 0.9 即可; 新能源的利用率远高于 HHO 和 SFO 算法; 电能自治率为 0.32 和 0.47, 因此主电网承担电力供应的主要任务。

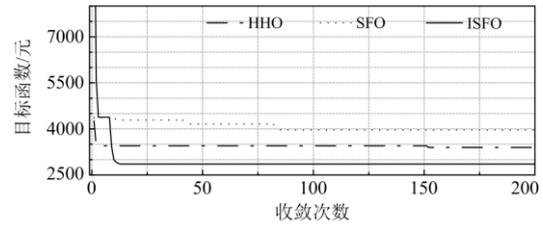
4.3 算法求解过程分析

在相同的运行条件下, 同时采用 3 种算法对综合能源系统在两个典型日时进行优化求解, 算法中最大迭代次数为 200, 搜索种群为 30。如图 6 所示。

由图 6 可知, 在夏季和冬季时 ISFO 算法的计算结果比 HHO 算法和 SFO 算法更少, 并且收敛于最优解的速度所用的迭代次数最少。其中, 在夏季时, ISFO 算法在第 48 次迭代时取得最优解, HHO 算法和 SFO 算法在整个过程中只求得了局部最优解; 在冬季时, ISFO 算法在第 14 次迭代时取得最优解, SFO 算法在第 6 代时陷入局部最优解直至求解过程结束, HHO 算法不断从局部解跳到更优的局部解, 但未求得最优解。ISFO 算法的收敛结果精度、求解速度及全局搜索能力均表现出明显的优越性。



(a) 夏季最优求解过程



(b) 冬季最优求解过程

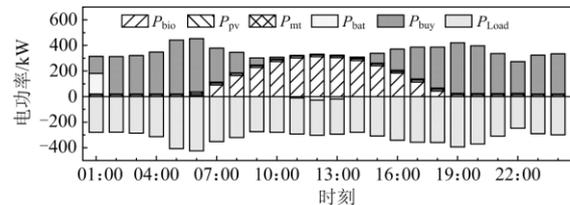
图 6 3 种算法的收敛比较曲线

Fig. 6 Convergence comparison curves of three algorithms

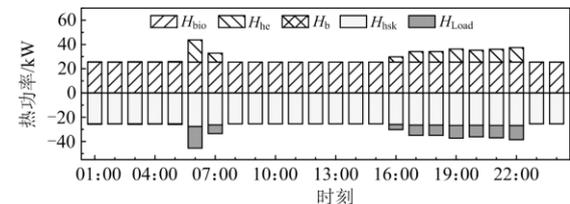
4.4 设备出力

在夏季和冬季时, 综合能源系统的各种设备在每时刻的出力情况如图 7 和图 8 所示, 图中注释符号含义参照式(16)、式(17)解释。

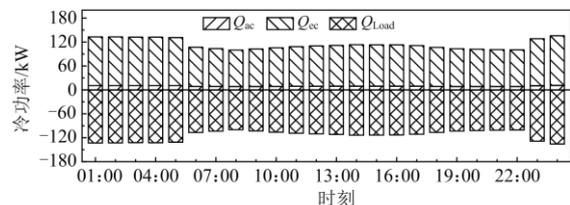
从图 7 和图 8 中可知, 在电平衡过程中, 沼气发电系统出力恒定但输出较少, 其原因主要在于沼气制取周期性长, 提纯技术较为复杂, 因此无法作为主出力设备。在 07:00—17:00 时段, 光伏作为



(a) 夏季电设备运行出力图



(b) 夏季热设备运行出力图



(c) 夏季冷设备运行出力图

图 7 夏季日功率调度结果

Fig. 7 Daily power scheduling results in summer

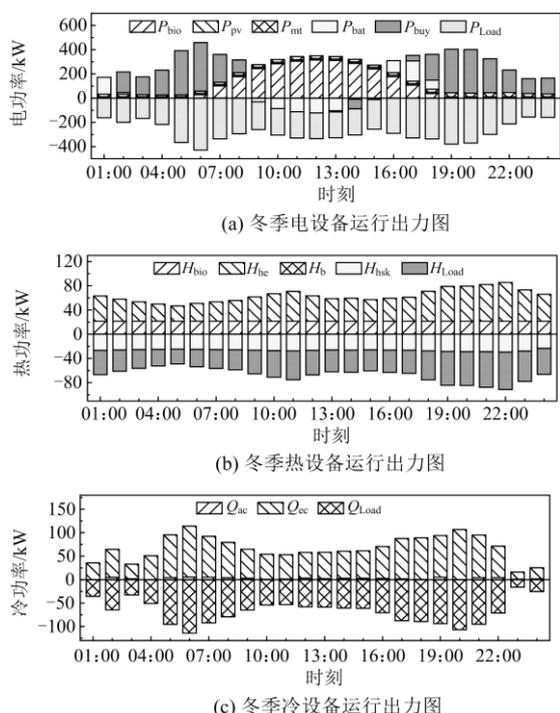


图 8 冬季日功率调度结果

Fig. 8 Daily power scheduling results in winter

主要电能出力设备, 其他时刻的电负荷主要通过主电网提供, 燃料轮机是多种能量相互耦合的设备, 在电平衡过程中出力较少, 蓄电池主要起到削峰填谷的作用。在冷平衡过程中, 电制冷机提供大部分的冷能, 吸收式制冷机的冷能占比较低。在热平衡过程中, 夏季的热负荷较小, 各种产热设备的出力均较小, 沼气系统的产热恒定且需通过蓄热槽平衡, 剩余热负荷由燃气轮机补充; 冬季的热负荷主要通过沼气系统和余热锅炉产热满足, 多余热量储存在蓄热槽。

4.5 综合能源系统的经济效益

沼气生产的主要来源是农作物秸秆和人畜粪便等, 然而在冬季农作物秸秆数量锐减, 且人畜粪便处理难度提高, 因此沼气发电系统的电功率和热功率输出有限。在与生物质能结合的综合能源系统 (BIO-IES) 中, 可以获得相应的经济和环保效益。本文将综合能源系统在不安装沼气系统和安装沼气系统时的运行情况进行了对比分析, 结果如表 6 所示。

表 6 BIO-IES 系统的经济效益

Table 6 Economic benefits of BIO-IES system

类别		$F/\text{元}$	s	u	z
夏季	IES	3990.9	0.94	0.34	0.30
	BIO-IES	3950.0	0.95	0.33	0.32
冬季	IES	2870.7	0.94	0.39	0.46
	BIO-IES	2857.0	0.94	0.39	0.47

从表 6 可知, 在两种典型日时, 含生物质能的综合能源系统的经济成本相比较于传统的单一综合能源系统节约了 1.04% 和 0.5%, 用户的综合用能满意度、新能源利用率和电能自治率几乎保持不变, 由此可知, 生物质能在保障综合能源系统的各项性能的基础上有效地优化经济结构且节约经济成本。

5 结论

1) 构建了一种综合能源系统的能量管理模型, 以交互及燃料费用、惩罚费用和设备投资及运行费用作为优化的多目标, 以负荷用户的综合用能满意度、新能源利用率及电能自治率作为评价指标, 考虑了设备容量限制和出力约束, 利用改进的 ISFO 算法对多目标优化模型进行求解。选取夏季、冬季典型日分别进行分析, 由结果可知, 本文所构建的能量管理模型提高了系统性能指标且有效降低综合经济成本, 对综合能源系统的优化调度和运行策略具有一定的参考价值。

2) 针对 3 种负荷的运行特性, 本文将柔性负荷纳入运行调度范围, 合理安排各个时间段的柔性负荷采用综合能源系统运行调度, 使负荷用户根据负荷特性主动响应系统能量调度。

3) 采用非线性攻击力度表达式, 并引入差分变异和 HHO 算法中的求解策略, 最后增设跳出停滞策略对 SFO 算法进行改进, 提高了算法的全局搜索能力, 并用于多目标优化模型的求解。与 HHO 算法和 SFO 算法对比, ISFO 算法在收敛精度和求解速度及全局搜索能力等方面具有明显的优越性。

4) 通过对综合能源系统是否将生物质能纳入调度过程对比分析可以得到: 含生物质能的综合能源系统在不同季节时的经济效益均低于传统的综合能源系统。由此说明, 生物质能可以在一定程度上改善了综合能源系统的经济和环保结构, 为创造经济电网提供新的能源保障。

参考文献

- [1] 李坚, 吴亮红, 张红强, 等. 基于排序交叉优化算法的冷热电联供微电网经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 137-145.
LI Jian, WU Lianghong, ZHANG Hongqiang, et al. Microgrid economic dispatch of combined cooling, heating and power based on a rank pair learning crisscross optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 137-145.
- [2] ZHU Mengting, XU Chengsi, DONG Shufeng, et al. An integrated multi-energy flow calculation method for electricity-gas-thermal integrated energy systems[J].

- Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 65-76.
- [3] 闫梦阳, 李华强, 王俊翔, 等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 163-175.
YAN Mengyang, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Optimal operation model of a park integrated energy system considering uncertainty of integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 163-175.
- [4] 戴璐平, 陈佩莉, 钱毅慧. 冷热电微电网分布式电源的区间优化模型[J]. 电测与仪表, 2018, 55(22): 64-71.
DAI Luping, CHEN Peili, QIAN Yihui. Optimal planning and operation of distributed generators in a multi-energy microgrid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(22): 64-71.
- [5] LI J C, YING Y L, LOU X D, et al. Integrated energy system optimization based on standardized matrix modeling method[J]. Applied Sciences-Basel, 2018, 8(12).
- [6] ZUO X, DONG M Y, GAO F K, et al. The modeling of the electric heating and cooling system of the integrated energy system in the coastal area[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 10: 1022-1029.
- [7] 屈小云, 吴鸣, 李奇, 等. 多能互补综合能源系统综合评价研究进展综述[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 153-163.
QU Xiaoyun, WU Ming, LI Qi, et al. Review on comprehensive evaluation of multi-energy complementary integrated energy systems[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 153-163.
- [8] 张峰, 杨志鹏, 张利, 等. 计及多类型需求响应的孤岛型微能源网经济运行[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 547-557.
ZHANG Feng, YANG Zhipeng, ZHANG Li, et al. Optimal operation of islanded micro energy grid with multi-type demand responses[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 547-557.
- [9] 蒋润花, 李洪强, 尹辉斌, 等. 冷热电联供系统多目标评估与运行策略研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(5): 1016-1024.
JIANG Runhua, LI Hongqiang, YIN Huibin, et al. Research on multi-objective evaluation and operation strategies of combined cooling, heating and power system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(5): 1016-1024.
- [10] 张敏, 王金浩, 常潇, 等. 考虑可再生能源不确定性的热-电耦合微能源系统多目标鲁棒规划方法[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 119-129, 140.
ZHANG Min, WANG Jinhao, CHANG Xiao, et al. A multi-objective robust planning method for thermal-electrical coupling micro-energy system considering the uncertainty of renewable energy[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 119-129, 140.
- [11] 刘维康, 王丹, 余晓丹, 等. 考虑电气转换储能和可再生能源集成的微能源网多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 11-20.
LIU Weikang, WANG Dan, YU Xiaodan, et al. Multi-objective planning of micro energy network considering P2G-based storage system and renewable energy integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 11-20.
- [12] 沈海平, 陈铭, 钱磊, 等. 计及电转气耦合的电-气互联系统机组组合线性模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 34-41.
SHEN Haiping, CHEN Ming, QIAN Lei, et al. Linear model research of unit commitment for integrated electricity and natural-gas systems considering power-to-gas coupling[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 34-41.
- [13] 林亭君, 董坤, 赵剑锋, 等. 综合能源系统内外协同优化调度技术研究现状及展望[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 1-8.
LIN Tingjun, DONG Kun, ZHAO Jianfeng, et al. Research status and prospects of internal and external collaborative optimization scheduling technology for integrated energy system[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 1-8.
- [14] 龚晓琴, 王进, 王珑, 等. 含电转气的电—气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 76-83.
GONG Xiaoqin, WANG Jin, WANG Long, et al. Low-carbon economic operation for integrated electricity and natural-gas energy system with power-to-gas[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 76-83.
- [15] 陈伟, 路源, 何欣, 等. 计及风光就地消纳的设施农业产业园区综合能源系统多目标优化调度方法[J]. 电力建设, 2021, 42(7): 20-27.
CHEN Wei, LU Yuan, HE Xin, et al. A multi-objective optimal scheduling method for integrated energy system of protected agricultural industrial park considering local consumption rate of wind and solar energy[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(7): 20-27.
- [16] 韩中合, 祁超, 丁敬, 等. 基于太阳能和生物质能的农村分布式供能系统研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(11): 3164-3171.

- HAN Zhonghe, QI Chao, DING Jing, et al. Research on distributed energy supply system based on solar energy and biomass energy in rural area[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(11): 3164-3171.
- [17] 戚艳, 尚学军, 聂靖宇, 等. 基于改进多目标灰狼算法的冷热电联供型微电网运行优化[J/OL]. *电测与仪表*: 1-9[2022-03-11]. DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2022.06.002.
- QI Yan, SHANG Xuejun, NIE Jingyu, et al. Optimization of CCHP micro-grid operation based on improved multi-objective grey wolf algorithm[J/OL]. *Electrical Measurement & Instrumentation*: 1-9[2022-03-11]. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2022.06.002.
- [18] 陈宇, 刘会兰, 栗然, 等. 基于可能度的冷热电联供微电网区间优化调度模型[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(10): 47-55.
- CHEN Yu, LIU Huilan, LI Ran, et al. Interval optimal dispatch model of CCHP microgrid based on possibility degree[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(10): 47-55.
- [19] 汪洋子, 陈茜. 计及冷、热、电联产的气电互联网络最优调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(3): 168-175.
- WANG Yangzi, CHEN Qian. Optimal dispatch for the integrated electrical and natural gas network with combined cooling, heat and power plant[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(3): 168-175.
- [20] 李云鹭, 刘吉臻, 马素玲, 等. 基于变工况模型的综合能源系统源-荷互动多目标优化调度[J]. *电网技术*: 1-12[2022-03-16]. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1407.
- LI Yunzhi, LIU Jizhen, MA Suling, et al. Source-load interactive multi-objective optimal dispatching of integrated energy system based on off-design model[J]. *Power System Technology*: 1-12[2022-03-16]. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1407.
- [21] 李政洁, 撒奥洋, 周生奇, 等. 计及综合需求响应的综合能源系统优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(21): 36-42.
- LI Zhengjie, HAN Aoyang, ZHOU Shengqi, et al. Optimization of an integrated energy system considering integrated demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(21): 36-42.
- [22] LI Peng, WANG Zixuan, WANG Jiahao, et al. Two-stage optimal operation of integrated energy system considering multiple uncertainties and integrated demand response[J]. *Energy*, 2021, 225.
- [23] 肖峻, 李思岑, 王丹. 计及用户分级与互动的配电网最大供电能力模型[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(17): 19-25, 41.
- XIAO Jun, LI Sicen, WANG Dan. Model of total supply capability for distribution network considering customer classification and interaction[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(17): 19-25, 41.
- [24] HE Liangce, LU Zhigang, GENG Lijun, et al. Environmental economic dispatch of integrated regional energy system considering integrated demand response[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 116.
- [25] JIANG P, DONG J, HUANG H. Optimal integrated demand response scheduling in regional integrated energy system with concentrating solar power[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 166.
- [26] 陈柏翰, 冯伟, 孙凯, 等. 冷热电联供系统多元储能及孤岛运行优化调度方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(15): 3231-3243.
- CHEN Bohan, FENG Wei, SUN Kai, et al. Multi-energy storage system and islanded optimal dispatch method of CCHP[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(15): 3231-3243.
- [27] 谢姿, 张惠娟, 刘琪, 等. 考虑蓄电池寿命的分布式电源容量优化配置[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(10): 424-430.
- XIE Zi, ZHANG Huijuan, LIU Qi, et al. Optimal configuration of distributed power supply capacity considering battery life[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(10): 424-430.
- [28] 贲保记, 白森珂, 张国. 基于混沌自适应粒子群算法的冷热电联供系统优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(10): 123-130.
- YUN Baoji, BAI Senke, ZHANG Guo. Optimization of CCHP system based on a chaos adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(10): 123-130.

收稿日期: 2022-01-01; 修回日期: 2022-05-11

作者简介:

张政林(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及智能电网; E-mail: zhangzhenglin0814@163.com

张惠娟(1963—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析。E-mail: zhanghuijuan@hebut.edu.cn

(编辑 魏小丽)