

综合能源系统中多能源协同优化方法研究

武志宏¹, 杨永标², 李熙³, 李泽斌⁴, 张卫国⁵

(1. 国网山西省电力公司, 山西 太原 030000; 2. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096;
3. 国网山西省综合能源服务有限公司, 山西 太原 030000; 4. 国网太原供电公司,
山西 太原 030000; 5. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 针对当前多能源协同优化相关研究成果减排和可靠性待优化等问题, 提出基于混沌蛙跳算法的综合能源系统中多能源协同优化方法。以系统总费用最低、可靠性最强、减排率最高等为目标函数, 以可靠性、热量均衡、设备运行、储能、需求响应等方面为约束条件, 构建多能源协同优化模型。引入混沌蛙跳算法对目标模型进行求解, 利用混沌蛙跳算法具备的快速寻优性能逐渐向理论最优解逼近, 根据自适应网格密度法对最优解规模进行动态维护, 同时采用自适应混沌优化方式优化最优解集合多样性, 最后通过最优解选取方案为蛙群选取最佳的更新粒子, 当满足得到最优解或达到最大迭代次数条件时, 算法停止运行, 并输出最优解, 得到符合目标模型的多能源协同优化方案。实验表明, 该方法能够有效提高系统可靠性, 且在减排环保方面也有很强的鲁棒性。

关键词: 综合能源系统; 多能源; 协同优化

中图分类号: TK01 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22171

Research on Multi-energy Collaborative Optimization Method in Integrated Energy System

WU Zhihong¹, YANG Yongbiao², LI Xi³, LI Zebin⁴, ZHANG Weiguo⁵

(1. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030000, Shanxi, China; 2. School of Electrical and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. State Grid Shanxi Integrated Energy Service Co., Ltd., Taiyuan 030000, Shanxi, China; 4. State Grid Taiyuan Power Supply Company, Taiyuan 030000, Shanxi, China; 5. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210008, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the problems of current multi-energy collaborative optimization related research results reduction and reliability to be optimized, a multi-energy collaborative optimization method based on chaotic leapfrog algorithm for integrated energy systems was proposed. Taking the lowest total system cost, the strongest reliability and the highest emission reduction rate as the objective function, the multi-energy collaborative optimization model was constructed with the constraints of reliability, heat balance, equipment operation, energy storage and demand response. The chaotic frog leaping algorithm was introduced to solve the target model. The fast optimization performance of the chaotic frog leaping algorithm was gradually approached to the theoretical optimal solution. The optimal solution scale was dynamically maintained according to the adaptive mesh density method. The chaos optimization method optimized the optimal solution set diversity. Finally, the optimal update particle was selected for the frog group by the optimal solution selection scheme. When the optimal solution or the maximum number of iterations was satisfied, the algorithm stopped running and the output was optimal solution, a multi-energy collaborative optimization scheme that meets the target model was obtained. Experiments show that this method can effectively improved system reliability and has strong robustness in reducing environmental protection.

Key words: integrated energy system; multi-energy; collaborative optimization

能源作为人类社会进步的关键物质基础之一, 在经济发展与国民保障等方面均发挥着重要

作用。其中, 综合能源系统中多能源协同规划和调控方式的研究, 会对能源生产与能源生产范式

基金项目: 国家电网公司科技项目(2016YFB0901100)

作者简介: 武志宏(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, Email: benkexi4zi@163.com

重构等方面有创新的作用,并充分丰富综合能源系统的整体建设和能源互联网的覆盖,以此推动能源绿色生态化发展,为能源高效利用和节能减排提供支撑^[1-3]。

鉴于综合能源中多能源协同优化的现实意义,该领域相关人员提出了很多优秀成果。文献[4]指出综合能源系统中的各种设备日益丰富的现状,提出将区域能源的运营商当作主体,分别在系统侧与用户侧同时通过综合能源系统具备的多能互补性,设计并构建双侧系统运行模型,调整能源转换设备分配因素,实现系统多能源需求匹配度的有效提升,但该方法的可可靠性较低;文献[5]指出工业园区是一个比较典型的综合能源系统,将能量梯级应用至综合能源系统中进行多能源调节与优化,先简单介绍了工厂综合能源系统框架,然后针对能源系统中各种能量生产设备和能量转换设备等进行单独建模,但是该方法的实际应用成本较高;文献[6]指出将综合能源系统当作核心的综合能源互联网为生态环境污染治理的关键途径之一,将社区的综合能源系统当作研究目标对象,提出构建包括共享储能和热电联供等设备的用户协调模型,依据用户日消耗量科学再分配整体费用,但是该方法的减排率受到限制。

上述研究的减排性能和模型可靠性待优化,为了更好地实现综合能源协同优化,减少能源消耗成本,增强系统可靠性,提高减排率,本文提出基于混沌蛙跳算法的综合能源系统中多能源协同优化方法。利用混沌蛙跳算法具备的快速寻优性能逐渐向理论最优解逼近,根据自适应网格密度法动态维护最优解规模,通过最优解选取方案为蛙群选取最佳的更新粒子,当满足得到最优解或达到最大迭代次数条件时,获取最优解,得到符合目标模型的多能源协同优化方案,以缓解综合能源系统中多能源协同优化的问题,为该领域相关研究提供参考。

1 综合能源系统中多能源协同优化

1.1 目标函数

综合考虑多能源协同优化实际需求,依靠综合能源系统基本结构图构建多能源协同优化模型,结构图如图1所示。

综合能源系统是面向整个社会能源市场与供电市场的,针对目前用户所拥有电力、天然气、供热等能源,通过大数据的控制将其转换为用户

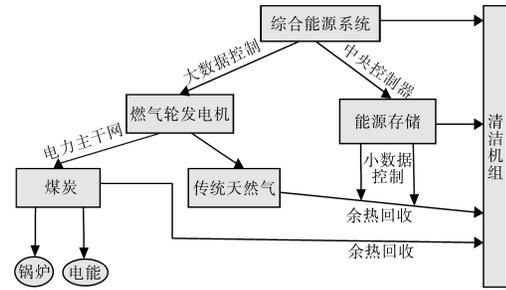


图1 综合能源系统基本结构图

Fig.1 Basic structure of integrated energy system

交互能源提供保障,其中煤炭和火力发电是具有波动性、间歇性和不确定性的不再生能源发电,风力就近消纳发电等为可再生能源发电。覆盖城镇范围的整体综合能源系统是自底而上的以用户为中心的结构,而用户侧除电能外,更是拥有气、冷、热等多种能源形式,因此需要多能综合响应。以下列几方面为主要目标函数进行构建。

1.1.1 系统总费用最低

在多能源系统优化过程中,能源调度周期的总时段数量 T 内,总费用 $C_{total,T}$ 由周期内生产运行维护成本和清洁机组补偿费以及向电网净购电费构成,即

$$C_{total,T} = \sum_{t=1}^T \sum_{u \in U} W_{u,t} c_u + \sum_{t=1}^T \sum_{a \in A} (\lambda_{a,t}^0 P_{a,t}^0 + \lambda_{a,t}^u P_{a,t}^u) + \sum_{t=1}^T (C_{pure,t} - D_{sale,t}) \quad (1)$$

式中: U 为综合能源系统中各设备集合; $W_{u,t}$ 为设备 u 在 t 时段内供能; c_u 为 u 单位供能成本; A 为清洁机组集合; $P_{a,t}^0$ 为机组 a 由于过度调度导致的缺电量,在固定的时间 t 内,表示可使用电量值与需求调度电量的和; $\lambda_{a,t}^0$ 为机组 a 过度调度过程中的补偿系数; $P_{a,t}^u$ 为机组 a 由于欠调度导致的窝电量,表示可使用电量值与需求调度电量的差; $\lambda_{a,t}^u$ 为机组 a 欠调度过程中的补偿系数; $C_{pure,t}$ 为 t 时段购电费; $D_{sale,t}$ 为 t 时段售电所得收入。

1.1.2 系统可靠性最强

综合能源系统缺电率(loss of power supply probability, LPSP)为额定周期范围内系统缺供电量在该周期系统总需电量中占据的比例。LPSP为供电的可靠性因素,引入综合能源系统所包含的电源类型,LPSP的计算式为

$$LPSP(t) = [\sum_{t=1}^T W_{load,t} - (\sum_{t=1}^T W_{gas,t} + \sum_{t=1}^T W_{PV,t} + \sum_{t=1}^T W_{wind,t} + \sum_{t=1}^T W_{grid,t} - \sum_{t=1}^T W_{sell,t})] / \sum_{t=1}^T W_{load,t} \quad (2)$$

式中: $W_{load,t}$ 为 t 时段综合能源系统中电量需求;

$W_{gas,t}$, $W_{PV,t}$, $W_{wind,t}$, $W_{grid,t}$ 分别为 t 时段燃气机组、光伏、风机发电量以及向主网购买的电量; $W_{sell,t}$ 为 t 时段向主网售电总量。

1.1.3 系统减排率最高

综合能源系统中减排率是系统与传统天然气联供发电相比的污染减排率,其表达式为

$$E_T = \frac{L_{S,T} - \sum_{t=1}^T \sum_{u \in U} P_{u,t} \lambda_u - \sum_{t=1}^T P_{i,t} \lambda_g}{L_{S,T}} \quad (3)$$

式中: E_T 为在时段 T 内减排率; $L_{S,T}$ 为传统天然气联供发电污染排放量; $P_{u,t}$ 为设备 u 在 t 时段等效发电总量; λ_u 为设备 u 等效污染排放系数; $P_{i,t}$ 为 t 时段和电网之间交换电量; λ_g 为电网侧供电过程中污染排放系数。

1.2 约束条件

1.2.1 可靠性约束

当供电整体可靠程度为一定时,想进一步提高可靠性要以增加成本与提高能耗为代价。融合当前宏观的发展趋势,单纯追求系统供电程度最高并不是最好的选择。综上,在综合考虑电量均衡性过程中,不一定要求机组出力与主网购电相加结果必须不小于负荷,而是以可靠程度当作目标实行优化。然而依据国家有关规定^[7],要为供电可靠程度设计一个下限值,融合相关指标, $LPSP$ 不可高于上限,则有:

$$LPSP(t) \leq \overline{LPSP} \quad (4)$$

式中: \overline{LPSP} 为 $LPSP$ 上限值。

1.2.2 热量均衡约束

该约束中包含冷、热均衡两部分,其物理概念为:由各热源得到的热量在考量了设备效率与有关损耗之后,分别全部转换成冷、热负荷。

热均衡约束表达式为

$$Q_i^{\text{heat}} = Q_{\text{recl},t}^{\text{heat}} \eta_{\text{recl}} + Q_{\text{gas},t}^{\text{heat}} \eta_{\text{gas}} + Q_{\text{solar},t}^{\text{heat}} \eta_{\text{solar}} \quad (5)$$

式中: Q_i^{heat} 为 t 时段热负荷; $Q_{\text{recl},t}^{\text{heat}}$, $Q_{\text{gas},t}^{\text{heat}}$, $Q_{\text{solar},t}^{\text{heat}}$ 分别为 t 时段的余热回收热量、燃气燃烧热量以及太阳能采集热量; η_{recl} , η_{gas} , η_{solar} 分别为余热和燃气以及太阳能热量利用率。

冷均衡约束条件表达式为

$$Q_i^{\text{cool}} = Q_{\text{absor},t}^{\text{cool}} \eta_{\text{absor}} + W_{\text{elec},t}^{\text{cool}} \eta_{\text{elec}} \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{absor},t}^{\text{cool}}$ 为 t 时段吸收形式的制冷机采集到的光热; $W_{\text{elec},t}^{\text{cool}}$ 为 t 时段电制冷机总耗电量; η_{absor} , η_{elec} 为两种制冷机效率。

1.2.3 设备运行约束条件

1) 光伏机组运行。综合能源系统中光伏机

组出力上限值为某时段当地太阳能光伏机组额定装机容量值、太阳能板的总面积以及太阳能转化效率乘积值,即机组运行电功率,其小于机组额定功率值^[8-10]。调度过程中一旦有需要,则利用弃光实现光伏机组出力低化,然而一定要保障其出力高于最小限额。综上有:

$$P_{PV}(t) = S_{PV} \times P_{\text{capa}} \times \eta_{PV} \quad (7)$$

$$P_{PV} \leq P_{PV}(t) < \bar{P}_{PV}(t) \quad (8)$$

式中: $P_{PV}(t)$ 为 t 时段光伏机组运行电功率; P_{capa} 为光伏机组额定装机容量值; η_{PV} 为太阳能转化效率; S_{PV} 为太阳能板面积; P_{PV} , $\bar{P}_{PV}(t)$ 为光伏机组最小与最大的发电功率值。

2) 天然气的内燃机组。机组出力过程中应该在上、下限中间,且机组功率变化率会受到爬坡率约束,则有:

$$\begin{cases} P_{\text{gas}} \leq P_{\text{gas}}(t) < \bar{P}_{\text{gas}}(t) \\ P_{\text{gas}}(t) - P_{\text{gas}}(t-1) \leq U_{\text{pgas}} \Delta t \\ P_{\text{gas}}(t) - P_{\text{gas}}(t-1) \geq -D_{\text{ngas}} \Delta t \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{gas}}(t)$ 为 t 时段燃气机发电功率值; P_{gas} , $\bar{P}_{\text{gas}}(t)$ 分别为燃气机最小、最大的发电功率值; U_{pgas} , D_{ngas} 分别为燃气机向上、向下的爬坡速率。

3) 风力发电机组。该机组约束物理定义和光伏雷同,但是处理的上限和气象条件存在分段函数相关性^[11-13],则有:

$$P_{\text{wind}}(t) \leq P_{\text{wind}}(t) < \bar{P}_{\text{wind}}(t) \quad (10)$$

$$\bar{P}_{\text{wind}}(t) = \begin{cases} 0 & v_{\text{out}} < v(t) \\ \frac{v(t) - v_{\text{in}}}{v_{\text{rate}} - v_{\text{in}}} P_{\text{rate}} & v_{\text{in}} \leq v(t) < v_{\text{rate}} \\ P_{\text{rate}} & v_{\text{rate}} < v(t) \leq v_{\text{out}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{wind}}(t)$ 为 t 时段风电机组总发电功率; P_{wind} , \bar{P}_{wind} 分别为风电机组最小、最大发电功率; P_{rate} 为机组额定输出功率; $v(t)$ 为风速函数; v_{in} , v_{out} 分别为切入、切出风速; v_{rate} 为额定风速。

4) 制冷机组。吸收形式的制冷机器与电制冷机功率值一定要为正,同时不可超过功率上限值,则有:

$$0 \leq P_{\text{cold}}^{\text{inso}}(t) < \bar{P}_{\text{cold}}^{\text{inso}} \quad (12)$$

$$0 \leq P_{\text{cold}}^{\text{elec}}(t) < \bar{P}_{\text{cold}}^{\text{elec}} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{cold}}^{\text{inso}}(t)$, $\bar{P}_{\text{cold}}^{\text{inso}}$ 和 $P_{\text{cold}}^{\text{elec}}(t)$, $\bar{P}_{\text{cold}}^{\text{elec}}$ 分别为吸收式的制冷机和电制冷机 t 时段总制冷功率值与最大功率值。

1.3 基于混沌蛙跳算法的多能源协同优化

为了在约束条件下对目标函数进行求解,引

入混沌蛙跳算法,详细过程如下。

1.3.1 自适应网格密度

假设 *Pareto* 代表最优解的存储器,将其记作 *Archive* 集,混沌蛙跳算法每次进化所得粒子当作 *Archive* 集候选解,在候选解满足下列条件之一即能够进入 *Archive* 集:

条件 1: *Archive* 集是空集;

条件 2: *Archive* 集是非空集合,同时候选解不被 *Archive* 集中任何一个粒子所支配;

条件 3: 候选解支配 *Archive* 集中的所有粒子^[14-16]。

假设不对 *Archive* 集规模进行控制,会在很大程度上提高计算复杂度,综上,将 *Archive* 集规模定义为 N' ,同时根据自适应网格密度法对 *Archive* 集规模进行动态维护^[17]。自适应网格密度法详细运行流程图如图 2 所示。

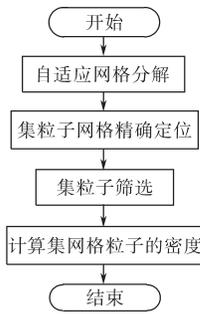


图 2 适应网格密度法详细运行流程图

Fig.2 Detailed operation flow chart of adaptive grid density method

根据以下步骤进行自适应网格密度分析:

步骤 1: 自适应网格分解。将 m' 维目标空间分解成 $K'_1 \times K'_2 \times \dots \times K'_m$ 同样的网格^[18-19],其中,网格 i 维宽度值 d'_i 表达式为

$$d'_i = \frac{f'_i{}^{\max} - f'_i{}^{\min}}{K'_i} \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} f'_i{}^{\max} = \max_{i=1}^{m'} f'_i(x) \\ f'_i{}^{\min} = \min_{i=1}^{m'} f'_i(x) \end{cases} \quad (15)$$

步骤 2: *Archive* 集粒子网格精确定位。假设第 t' 代 *Archive* 集为 $A'_{t'} = \{a'_1, \dots, a'_j, \dots, a'_h\}$, $h \leq N'$, 针对 a'_j , 其第 i 维网格编码 w'_i 表达式为

$$w'_i = \text{int}[(f'_i(a'_j) - f'_i{}^{\min})/d'_i] + 1 \quad (16)$$

根据式 (16) 能够确定 a'_j 在目标范围内位置。

步骤 3: 对 *Archive* 集网格粒子的密度进行计算。设定网格 G_k 粒子密度值是 D'_k , 同时将 D'_k 设置成网格内 *Pareto* 最优解的数量,假设网格内部

不存在粒子,则 $D'_k=0$ 。

步骤 4: *Archive* 集粒子筛选。当候选解加入至 *Archive* 集之后,可能会导致 *Archive* 集规模比 N' 大,由此要对 *Archive* 集中的粒子进行筛选:针对网格 G_k ,假设 $D'_k > 1$,那么依据下式对粒子进行筛选。

$$G_{d'} = \text{int}[D'_k \times (|A'_{t'+1}| - N') / |A'_{t'+1}| + 0.5] \quad (17)$$

式中: $G_{d'}$ 为 G_k 要淘汰的粒子数量; $|A'_{t'+1}|$ 为 *Archive* 集添加候选解之后的规模。

当确定 $G_{d'}$ 之后,依据下式对 G_k 中粒子和理论 *Pareto* 前端之间的距离进行计算^[20-21],同时将距离 *Pareto* 前端比较远的粒子依次淘汰掉。

$$D'_{G_{v,i}} = \|P'_{G_{v,i}} - P'_{T_j}\| \quad (18)$$

式中: $D'_{G_{v,i}}$ 为 G_k 中粒子和理论 *Pareto* 前端之间的最短距离; $P'_{G_{v,i}}$ 为 G_k 的 *Pareto* 前端; P'_{T_j} 为 T' 的 *Pareto* 前端。

1.3.2 自适应混沌优化

部分理论 *Pareto* 最优解并没有在 *Archive* 集中进行存储,则之后再找 *Pareto* 最优解将会非常难。引入自适应的混沌优化方法,整体思路为:随机选取 *Archive* 集中的一部分粒子实行混沌优化,假设粒子 i 在整个混沌优化过程中的第 $k'-1, k', k'+1$ 代位置为 $C'_{k'-1,i}, C'_{k',i}, C'_{k'+1,i}, P'_{k'-1,i}, P'_{k',i}, P'_{k'+1,i}$ 代表 $C'_{k'-1,i}, C'_{k',i}, C'_{k'+1,i}$ 的 *Pareto* 前端,那么第 $k'-1, k', k'+1$ 代间 *Pareto* 前端距离 $D'_{k',k'-1}$, $D'_{k',k'+1}$ 可表示为

$$\begin{cases} D'_{k',k'-1} = \|P'_{k',i} - P'_{k'-1,i}\| \\ D'_{k',k'+1} = \|P'_{k'+1,i} - P'_{k',i}\| \end{cases} \quad (19)$$

假设混沌迭代控制阈值 $\text{diff}_{D'}$ 是 $D'_{k',k'-1}$ 和 $D'_{k',k'+1}$ 的差值,即

$$\text{diff}_{D'} = D'_{k',k'+1} - D'_{k',k'-1} \quad (20)$$

当 $\text{diff}_{D'} > 0$, 则代表算法处在进化的状态,能够减少总迭代次数,进而提升算法运行效率;当 $\text{diff}_{D'} < 0$, 则代表进化性能比较低,要增加迭代次数。混沌优化迭代的数量 K'_{\max} 自适应方案可表示为

$$K'_{\max}(k'+1) = \begin{cases} K'_{\max}(k')/2 & \text{diff}_{D'} > 0 \\ K'_{\max}(k') & \text{diff}_{D'} = 0 \\ 2K'_{\max}(k') & \text{diff}_{D'} < 0 \end{cases} \quad (21)$$

在混沌优化之后,对 K'_{\max} 进行自适应调整,直到新解比原解优越,或是达到最大的迭代次数。

1.3.3 *Pareto* 最优解选取

混沌蛙群算法基于网格粒子的密度值,在 *Archive* 集合中给每只青蛙选取 1 个 *Pareto* 最优解实行更新操作。针对 G_k ,假设 $D'_k > 0$, 那么其网格的适应度值 $f'(G_k)$ 能够表示为 D'_k 的倒数,则有:

$$f'(G_k) = 1/D'_k \quad (22)$$

混沌蛙群算法基于网格 $f'(G_k)$,通过轮盘赌方式给蛙群中的每只青蛙选取一个网格,同时从网格中任意选取1个个体当作最优解并进行更新。所得 Pareto 最优解选取方案使 Archive 集合中 D'_k 越小的网格当选的概率就越大,以此保障 Pareto 最优解具备多样性。

2 实验结果与分析

为验证基于混沌蛙跳算法的综合能源系统中多能源协同优化方法有效性,进行一次相关性测试。实验对象选择在某市的某工业园区中综合能源系统的一个示范性工程试点,园区内部一共设置了15个下层用户工厂与1个上层具有综合性的能源提供商。基本数据为:燃气轮机2台,风电机组4台,光伏机组2台,太阳能热水锅炉5台,吸收式的制冷机3台,电制冷机2台。将测试所得数据传输至 Matlab 软件中进行模拟,主要为风电机组发电功率、储能等机组约束物理量。

根据电量均衡性要求,供电可靠程度设计一个下限值,其必须不大于负荷,也就是说可靠性约束目标实行优化中,需要以电负荷来作为衡量指标。经过测试得到的原始电负荷与优化之后的电负荷差别如图3所示。

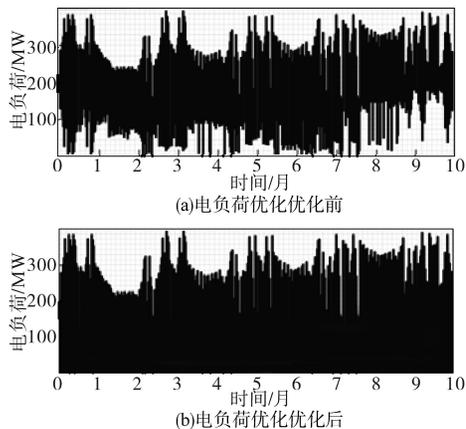


图3 电负荷优化前后对比

Fig.3 Comparison before and after electric load optimization

分析图3可知,电负荷在优化前、后有显著改变。与优化之后的电负荷相比,原始负荷有明显降低趋势,电负荷的均衡性更强,在不同实验次数下,系统的减排率均在20%以上,表现出了良好的减排性能。

混沌蛙跳算法每次进化会生成新 Pareto 最优解粒子,然而,假设部分理论 Pareto 最优解并没有在 Archive 集中进行存储时,那么,对 Archive 集中

的粒子进行筛选时,为了匹配 Pareto 最优解就需要引入自适应的混沌优化方法。而设备燃料消耗和定期维护成本费用是生产运行维护成本费用的主要来源,其中,清洁机组补偿费需要根据不同时段的机电组调整过度调度情况和欠调度情况,在这个过程中的优化模型参数需要自适应,以符合时段要求,因此进行自适应能力的测试。将本文方法与文献[4]~文献[6]的自适应能力对比,对比结果如图4所示。

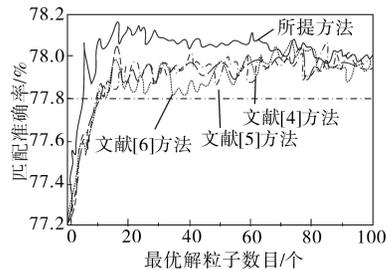


图4 各个方法自适应能力对比结果

Fig.4 Comparison results of adaptive ability of each method

由图4可知,假设有100个最优解粒子没有被集中储存,则这100个粒子将会被自适应优化,在本文方法与文献[4]~文献[6]的自适应能力对比结果中,各个方法的自适应准确率皆随粒子数目的增多而不同程度地波动,其中波动最小的曲线为本文方法测试所得曲线,说明本文方法自适应准确率最高,可以根据不同时段的机电组调整过度调度情况和欠调度情况,实现机电组的能耗和成本控制,其协同优化方案的可靠性得到证明。

基于混沌蛙跳算法的综合能源系统中多能源协同优化方法中提出的目标模型中包含了最优解选取等指标,且约束条件与目标函数也具有相符合的特性,在混沌蛙跳算法运行中,引入了子群划分方案,网格密度机制可以在一定程度上调整集粒子均匀性,以下进行本文方法与文献[4]~文献[6]方法的网格密度机制测试,测试结果如图5所示。

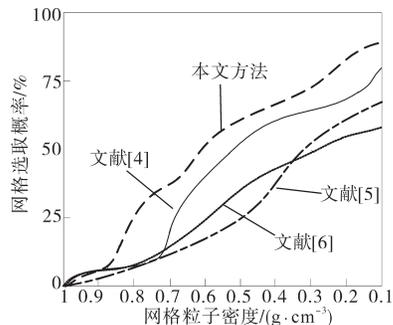


图5 各个方法网格密度机制测试结果

Fig.5 Grid density mechanism test results of each method

Pareto 最优解选取方案使 Archive 集合中 D'_k 越小的网格当选的概率就越大,能够解决多目标优化问题。由图 5 可知,本文方法通过自适应混沌法选取的网格密度对最优解集合多样性进行了优化,使得到的多能源协同优化方案更加贴合实际需求,提高了所提方法的可靠性。

3 结论

面向多能源协同优化,提出基于混沌蛙跳算法的综合能源系统中多能源协同优化方法。以总费用最低和系统可靠性最强等为目标函数,引入混沌蛙跳算法对目标函数进行求解,得到多能源协同优化最佳方案。经测试,与传统方法相比,本文所提出的方法可有效解决能源负荷和系统减排等问题,可靠性很强,对成本和能耗的控制能力较高,但是要在控制之前根据系统动态模型分析系统运行状态呈现出的动态特征,因此未来研究中应考虑该方法的简便算法,为该领域的相关研究提供实际参考价值。

参考文献

- [1] 孙可,何德,李春筱,等.考虑冰蓄冷空调多模式的工厂综合能源系统多能协同优化模型[J].电力建设,2017,38(12):12-19.
Sun Ke, He De, Li Chunxiao, et al. Multi-energy cooperative optimization model of factory IES considering multi-model of ice storage[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(12): 12-19.
- [2] 王琪鑫,刘涤尘,吴军,等.计及用户行为分析的多能协同综合能源系统供需双侧综合优化[J].电力自动化设备,2017,37(6):179-185.
Wang Qixin, Liu Dichen, Wu Jun, et al. Comprehensive optimization including user behavior analysis for supply and demand sides of IES-MEC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 179-185.
- [3] 王珺,顾伟,陆帅,等.结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J].电力系统自动化,2016,40(15):17-24.
Wang Jun, Gu Wei, Lu Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 17-24.
- [4] 魏纯晓,陈晔,王燕敏,等.考虑系统与用户双侧协同的区域多能源系统运行优化[J].现代电力,2019,36(1):65-74.
Wei Chunxiao, Chen Ye, Wang Yanmin, et al. Optimization of regional multi-energy system operation considering bilateral cooperation between system and uses[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(1): 65-74.
- [5] 徐航,董树锋,何仲潇,等.考虑能量梯级利用的工厂综合能源系统多能协同优化[J].电力系统自动化,2018,42(14):123-130.
Xu Hang, Dong Shufeng, He Zhongxiao, et al. Multi-energy cooperative optimization of integrated energy system in plant considering stepped utilization of energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 123-130.
- [6] 王仕俊,平常,薛国斌.考虑共享储能的社区综合能源系统协同优化研究[J].中国电力,2018,51(8):77-84.
Wang Shijun, Ping Chang, Xue Guobin. Synergic optimization of community energy internet considering the shared energy storage[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 77-84.
- [7] 周勳,张波,刘日亮,等.基于数据驱动的线路保护定值自适应整定方法研究[J].电力系统保护与控制,2017(24):50-56.
Zhou Meng, Zhang Bo, Liu Riliang, et al. An adaptive adjustment method of line protection setting based on data-driven[J]. Power System Protection and Control, 2017(24): 50-56.
- [8] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等.综合能源系统与能源互联网简述[J].电工技术学报,2016,31(1):1-13.
Yu Xiaodan, Xu Xiandong, Chen Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [9] 于波,吴亮,卢欣,等.区域综合能源系统优化调度方法[J].电力建设,2016,37(1):70-76.
Yu Bo, Wu Liang, Lu Xin, et al. Optimal dispatching method of integrated community energy system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(1): 70-76.
- [10] 白宏坤,尹硕,李虎军,等.计及碳交易成本的多能源站综合能源系统规划[J].电力科学与技术学报,2019,34(1):11-19.
Bai Hongkun, Yin Shuo, Li Hujun, et al. Optimal planning of multi-energy stations considering carbon-trading cost[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 11-19.
- [11] 赵娜,李翔宇,朱永强,等.能源互联网需求侧气电协同优化策略[J].电力建设,2017,38(12):60-67.
Zhao Na, Li Xiangyu, Zhu Yongqiang, et al. Gas and electric collaborative optimization strategy for demand side of micro energy internet[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(12): 60-67.
- [12] 任洪波,邓冬冬,吴琼,等.基于热电共融的区域分布式能源互联网协同优化研究[J].中国电机工程学报,2018,38(14):4023-4034.
Ren Hongbo, Deng Dongdong, Wu Qiong, et al. Collaborative optimization of distributed energy network based on electricity and heat interchanges[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4023-4034.
- [13] 李阳,郇嘉嘉,曹华珍,等.基于综合能源协同优化的配电网规划策略[J].电网技术,2018,42(5):1393-1400.
Li Yang, Xun Jiajia, Cao Zhenhua, et al. Distribution network planning strategy based on integrated energy collaborative optimization[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1393-1400.
- [14] 黄武靖,张宁,董瑞彪,等.多能源网络与能量枢纽联合规划方法[J].中国电机工程学报,2018,38(18):12-16.