

文章编号: 1001-0920(2016)05-0913-06

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2015.0393

## 多可再生能源冷热电联供微网系统环境经济优化调度

王鲁浩, 李歧强, 王桂荣, 郭庆强

(山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061)

**摘要:** 针对含多种可再生能源的冷热电联供微网系统调度优化问题, 提出微网系统最小运行费用和二氧化碳排放的多目标调度优化模型, 并结合启发式调度规则, 采用改进多目标交叉熵算法获取 Pareto 最优解集. 为了提高算法的收敛速度和求解精度, 依据重要抽样理论将多目标优化定义为小概率事件, 并引入样本分段生成策略和参数更新机制. 算例仿真表明, 所提出的多目标模型及其优化算法能够使微网系统获取较好的经济和环境效益, 满足用户多样性的优化需求.

**关键词:** 冷热电联供; 微网; 多目标优化; 交叉熵

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

## Optimal environmental economic scheduling of combined cooling heating and power microgrid system with multi-renewable energy

WANG Lu-hao, LI Qi-qiang, WANG Gui-rong, GUO Qing-qiang

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China. Correspondent: LI Qi-qiang, E-mail: qqli@sdu.edu.cn)

**Abstract:** In view of the scheduling optimization problem of the combined cooling heating and power microgrid system with multi-renewable energy, a multi-objective scheduling optimization model is established, which includes minimum operation cost and minimum carbon dioxide emission. The Pareto optimal solution set is obtained through heuristic scheduling rules and the improved multi-objective cross entropy(MOCE) algorithm. The multi-objective optimization is defined as a small probability event based on the important sampling theory, and the sample section generation strategy and parameter updating mechanism are introduced to improve the convergence speed and accuracy of the algorithm. Simulation results show that the proposed multi-objective model and algorithm can ensure the better economic and environmental benefits of the system, and also meet the diversified optimization requirements of users.

**Keywords:** combined cooling heating and power; microgrid; multi-objective optimization; cross entropy

### 0 引言

近年来, 以天然气高效利用为背景的冷热电微网受到国内外学者广泛的关注和研究<sup>[1]</sup>. 随着可再生能源供能技术的发展, 将化石燃料、可再生能源等多种一次能源互补利用, 同时满足冷热电负荷需求的生产方式逐步兴起. 然而, 传统能源系统调度优化问题多以经济性为目标. 由于能源危机和环境压力增加, 节能减排受到越来越多的关注, 且可再生能源在系统中的渗透率不断提高, 充分利用可再生能源, 降低化石能源污染物排放显得尤为重要. 因此, 多目标优化被引入到可再生能源冷热电联供微网运行优化问题中<sup>[2]</sup>.

考虑到多数情况下系统中各目标可能存在相互

冲突, 难以同时实现最优, 国内外学者对多目标问题进行了广泛研究. 线性加权和<sup>[3]</sup>、分层优化<sup>[4]</sup>、目标规划<sup>[5]</sup>等多目标处理方法被运用到冷热电联供微网配置与运行优化中, 然而这些方法在将多目标转化为单目标优化问题求解时, 大都需要决策者依据先验知识设置一系列反映各个目标偏好程度的参数或优先级, 而现实中这些先验知识往往是未知的. 部分学者将模糊优化理论引入到多目标优化问题中<sup>[6]</sup>, 通过定义目标隶属度函数将确定问题模糊化, 利用最大满意度将多目标问题转化为单目标优化问题, 获得了良好的效果, 但需要对多个目标依次求解, 增加了计算维度. 近年来, Pareto 前沿方法结合智能算法被引入多目标优化问题中, 求取多目标之间的折中解, 为微网系统调

**收稿日期:** 2015-03-31; **修回日期:** 2015-06-26.

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目(ZR2014FM036).

**作者简介:** 王鲁浩(1987—), 男, 博士生, 从事复杂系统建模与优化的研究; 李歧强(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与优化、节能优化技术等研究.

度问题开辟了新的优化途径<sup>[7]</sup>. 其中, 交叉熵算法以构造简单、参数少和运行速度快等优点被广泛应用于电力机组组合、生产调度等优化问题中<sup>[8]</sup>, 且该算法对 Pareto 最优前端的形状和连续性不敏感, 能够更好地逼近 Pareto 前沿. 基于此, 本文采用多目标交叉熵求解多可再生能源冷热电联供系统的运行优化问题.

针对系统中太阳能、地热能、电能和天然气的多能源互补供能方式, 为调高可再生能源利用率, 降低化石能源污染, 建立系统最小运行费用和二氧化碳排放的多目标调度优化模型. 定义多目标优化为小概率事件, 依据启发式调度规则缩减可行域, 同时为保障样本多样性和提高 Pareto 前沿分布特性, 引入样本分段生成策略和参数更新机制, 以改进多目标交叉熵算法优化系统运行. 最后通过算例仿真验证了所提模型及算法的有效性.

## 1 系统描述与多目标优化调度模型建立

可再生能源冷热电联供微网由光伏组件、蓄电池、地源热泵、天然气辅助供热制冷设备和负荷构成, 系统结构示意图如图 1 所示.

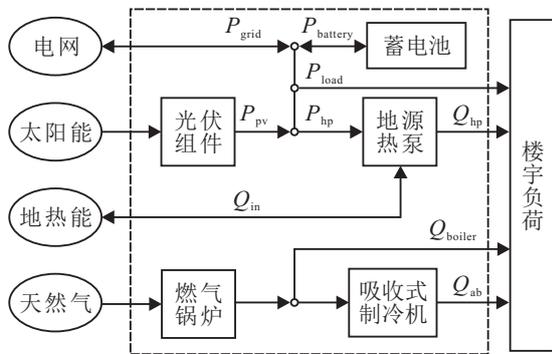


图 1 冷热电联供微网结构

地源热泵作为主力供热供冷设备, 满足楼宇的冷热负荷需求, 当冷热需求出现剧烈波动和负荷峰值时, 辅助设备实施补给和调峰出力; 作为系统的主力供电单元, 光伏发电运行于最大功率输出工况下, 向地源热泵和楼宇电负荷供电; 依据光伏出力状况和昼夜更替, 蓄电池通过充放电实现功率供求平衡; 考虑到光伏发电的间歇性和蓄电池容量限度, 系统与城市电网相连以增加运行可靠性, 并可在分时电价下实现对大电网削峰填谷. 因此, 本文的优化问题是, 通过实时调度系统中分布式单元出力, 在满足负载需求的前提下, 最大限度地减少二氧化碳的排放, 并获取较高的经济效益.

### 1.1 分布式单元建模

#### 1.1.1 地源热泵模型

地源热泵利用注入少量电能, 实现热能由低品位向高品位转移. 其输出功率主要受负荷率和随季节变化的机组能效比影响, 其数学模型为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} P_{hp}(t) = \frac{Q_{hp}(t)}{\text{plr}(t)\text{COP}_{hp}}, \\ Q_{hp}(t) = Q_{in}(t) + P_{hp}(t)\varphi_{hp}, \\ \text{plr}(t) = a_0 + a_1 \left[ \frac{Q_{hp}(t)}{Q_r} \right]^1 + a_2 \left[ \frac{Q_{hp}(t)}{Q_r} \right]^2. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $t$  为调度周期里的时刻, 其间隔取为 1 小时;  $P_{hp}(t)$  为地源热泵的电能消耗;  $Q_{hp}(t)$  为地源热泵的输出功率;  $Q_{in}(t)$  为地热换热器的交换功率;  $\varphi_{hp}$  为电热转换率; 依据设备铭牌, 地源热泵冬季平均能效比  $\text{COP}_{hp}$  约为 4.2;  $\text{plr}(t)$  为地源热泵负荷率;  $Q_r$  为地源热泵额定功率输出; 依据模型参数辨识, 载荷系数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  分别取为 0.404、0.318、0.278.

#### 1.1.2 辅助供冷供热设备模型

天然气供冷供热辅助设备主要由燃气锅炉和吸收式制冷机组成, 其天然气消耗量为

$$\begin{cases} Q_{ab}(t) = Q_{boiler, ab}(t)\text{COP}_{ab}, \\ Q_{boiler}(t) = Q_{boiler, ab}(t) + Q_{boiler, h}(t), \\ F_{boiler}(t) = \frac{Q_{boiler}(t)}{H_f\varphi_{boiler}}. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $Q_{ab}(t)$  是吸收式制冷机的冷量输出;  $\text{COP}_{ab}$  是制冷机的能效比;  $Q_{boiler}(t)$  是锅炉的热功率输出, 其包含制冷机功率消耗  $Q_{boiler, ab}(t)$  和部分热负荷功率消耗  $Q_{boiler, h}(t)$ ;  $F_{boiler}(t)$  是天然气消耗量;  $\varphi_{boiler}$  是锅炉制热效率;  $H_f$  是单位体积天然气的热值.

#### 1.1.3 蓄电池模型

作为系统电功率的调度核心, 蓄电池的合理充放电至关重要. 考虑到蓄电池容量在时段间的关联性, 充放电功率和荷电状态关系如下.

充电时,  $P_{battery}(t) \geq 0$ ,  $P_{battery}(t) = P_{ch}(t)$ ,  $t$  时刻的荷电状态为

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1)(1-\delta) + \frac{\Delta T P_{ch}(t)\varphi_{ch}}{E}. \quad (3)$$

放电时,  $P_{battery}(t) < 0$ ,  $P_{battery}(t) = P_{dis}(t)$ ,  $t$  时刻的荷电状态为

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1)(1-\delta) + \frac{\Delta T P_{dis}(t)\varphi_{dis}}{E}. \quad (4)$$

其中:  $\text{SOC}(t)$  和  $\text{SOC}(t-1)$  分别为蓄电池  $t$  时刻和  $t-1$  时刻的荷电状态;  $\delta$  为蓄电池自放电率;  $\Delta T$  为蓄电池充放电时间;  $\varphi_{ch}$ 、 $\varphi_{dis}$  分别为蓄电池充放电效率;  $E$  为蓄电池总容量.

#### 1.1.4 光伏发电模型

光伏发电作为不可调度单元, 运行在最大功率输出状态下, 其功率输出为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} I_{pv}(t) = I_e(t) - I_h \left[ \exp\left(\frac{qU_{pv}(t)}{AKT}\right) - 1 \right], \\ P_{pv}(t) = I_{pv}(t)U_{pv}(t). \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $I_{pv}(t)$  是光伏电池的工作电流,  $U_{pv}(t)$  是光伏电池的工作电压,  $P_{pv}(t)$  是光伏发电系统功率输出,  $I_e(t)$  是光生电流,  $I_h$  是二极管反向饱和电流,  $q$  是电

子电荷,  $A$  是二极管品质因子,  $K$  是玻尔兹曼常数,  $T$  是绝对温度.

## 1.2 目标函数

### 1.2.1 运行费用

最小运行费用如下式所示, 其主要由燃料成本  $C_f$ 、维护费用  $C_m$ 、系统与主电网间能量交互成本  $C_g$ 、启停成本  $C_{su}$  和蓄电池折旧成本  $C_b$  构成.

$$\min F_1(x) = \sum_{t=1}^{t_c} [C_f(x) + C_m(x) + C_g(x) + C_{su}(x) + C_b(x)]; \quad (6)$$

$$\begin{cases} C_f(x) = S_f F_{boiler}(t); \\ C_m(x) = \sum_{i=1}^5 K_i P_i(t); \\ C_g(x) = \begin{cases} C_{buy} P_{grid}(t), & P_{grid}(t) \geq 0; \\ C_{sell} P_{grid}(t), & P_{grid}(t) < 0; \end{cases} \\ C_{su}(x) = S_{hp} |u_{hp}(t) - u_{hp}(t-1)| + S_{au} |u_{au}(t) - u_{au}(t-1)|; \\ C_b(x) = S_b P_{battery}(t). \end{cases} \quad (7)$$

其中: 决策变量  $x$  为系统中可调度分布式单元出力;  $S_f$  为天然气价格;  $K_i$  为各分布式单元单位输出功率的维护成本;  $P_i(t)$  为各个分布式单元的输出功率;  $C_{buy}$  和  $C_{sell}$  为购电电价与卖电电价;  $P_{grid}(t)$  为系统与电网交互功率;  $S_{hp}$  和  $S_{au}$  为地源热泵和辅助供能设备的启停惩罚费用;  $u(t)$  为设备在  $t$  时刻的启停状态, 取 1 时为设备开启, 取 0 时为设备关闭;  $S_b$  为蓄电池折旧成本;  $t_c$  为一个调度周期.

### 1.2.2 二氧化碳排放

考虑到中国电力多为燃煤发电, 系统中二氧化碳排放主要由电力燃煤排放和天然气燃烧排放构成, 如下所示<sup>[11]</sup>:

$$\min F_2(x) = \sum_{t=1}^{t_c} [\mu_e P_{grid}(t) + \mu_f F_{boiler}(t)]. \quad (8)$$

其中:  $\mu_e$  为单位电功率下二氧化碳的排放系数, 取值  $872 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ;  $\mu_f$  为单位体积天然气的二氧化碳排放系数, 取值  $1.96 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

## 1.3 约束条件

联供系统调度优化是一个连续运行的过程, 分布式供能单元不能出现频繁启停机现象. 因此, 除系统相关的功率限制外, 一些硬性启停限制也被考虑. 功率限制又包括等式形式的功率平衡约束和不等式形式的功率上下限约束.

1) 功率平衡约束.

$$\begin{cases} P_{pv}(t) + P_{grid}(t) = P_{load}(t) + P_{hp}(t) + P_{battery}(t), \\ Q_{boiler}(t) + Q_{hp}(t) = Q_{load,h}(t), \\ Q_{ab}(t) + Q_{hp}(t) = Q_{load,l}(t), \end{cases} \quad (9)$$

其中  $Q_{load,l}(t)$  和  $Q_{load,h}(t)$  分别为系统的冷负荷和热

负荷需求.

2) 启停约束.

$$\begin{cases} 0 \leq n_{hp} \leq n_{hp, \max}, \\ t_{hp, \min} \leq \Delta t_{hp, ss}; \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} 0 \leq n_{au} \leq n_{au, \max}, \\ t_{au, \min} \leq \Delta t_{au, ss}. \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $n$  和  $n_{\max}$  为地源热泵和天然气辅助供能设备的启停次数和最大启停次数,  $\Delta t_{ss}$  和  $t_{\min}$  为启停时间间隔和最小时间间隔.

3) 功率约束.

$$\begin{cases} Q_{in, \min} \leq Q_{in}(t) \leq Q_{in, \max}, \\ P_{hp, \min} \leq P_{hp}(t) \leq P_{hp, \max}, \\ Q_{boiler, \min} \leq Q_{boiler}(t) \leq P_{boiler, \max}, \\ Q_{ab, \min} \leq Q_{ab}(t) \leq P_{ab, \max}, \\ SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max}, \\ P_{ch, \min} \leq P_{ch}(t) \leq P_{ch, \max}, \\ P_{dis, \max} \leq P_{dis}(t) \leq 0, \\ SOC(0) = SOC(t_c), \\ P_{grid, \min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid, \max}. \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $Q_{in, \min}$  和  $Q_{in, \max}$  为地热换热器换热功率最小和最大值,  $P_{hp, \min}$  和  $P_{hp, \max}$  为地源热泵消耗功率最小和最大值,  $Q_{boiler, \min}$  和  $Q_{boiler, \max}$  为燃气锅炉热工率输出最小和最大值,  $Q_{ab, \min}$  和  $Q_{ab, \max}$  为制冷机功率输出最小和最大值,  $SOC_{\min}$  和  $SOC_{\max}$  为蓄电池荷电状态最小和最大值,  $P_{ch, \min}$  和  $P_{ch, \max}$  为蓄电池充电功率最小和最大值,  $P_{dis, \max}$  为蓄电池最大放电功率,  $SOC(0)$  和  $SOC(t_c)$  为蓄电池始末荷电状态,  $P_{grid, \min}$  和  $P_{grid, \max}$  为系统与电网交互的最小和最大功率.

## 2 系统多目标优化调度模型求解

### 2.1 改进多目标交叉熵算法

交叉熵算法(CE)是将信息熵运用于模拟小概率事件发生的自适应算法, 并结合重要抽样技术, 实现对小概率事件发生的高效估计. 算法的基本思想是, 将可行域中最优解的选取作为一个小概率事件, 通过不断更新决策变量的概率分布, 增大小概率事件发生几率, 从而获得最优目标值. 多目标交叉熵算法采用非支配解排序和拥挤距离获取多个目标之间的折中解集, 结合重要抽样技术更新概率分布, 实现向 Pareto 前沿的逼近<sup>[12]</sup>.

原始交叉熵算法中, 样本分位参数  $\rho$  和平滑参数  $\alpha$  被选为定值, 从而造成样本信息量单一和算法收敛性较差的问题, 因此加入分位点和平滑参数更新机制如下所示, 使得参数能随算法迭代而平滑改变.

$$\rho = \begin{cases} \rho_1 + \frac{(\rho_2 - \rho_1)(k_1 - k)}{k_c}, & k < k_1; \\ \rho_2 + \frac{(\rho_3 - \rho_2)(k - k_1)}{k_c}, & k \geq k_1; \end{cases} \quad (13)$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1 + \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)(k'_1 - k')}{k_c}, & k' < k'_1; \\ \alpha_2 + \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)(k' - k'_1)}{k_c}, & k' \geq k'_1. \end{cases} \quad (14)$$

其中:  $k_1$  和  $k'_1$  分别为设定的  $\rho$  和  $\alpha$  更新迭代时间点,  $k_c$  为经过 10 次算法运行后的平均迭代次数.

在算法初期, 样本信息量纷杂, 为防止陷入局部最优, 应选取较大的  $\rho$  和  $\alpha$  涵盖样本和上一次迭代的信息. 随着重要抽样技术运用和迭代次数的增多, 样本质量逐渐提高, 为提高收敛速度, 应逐步减小  $\rho$  和  $\alpha$  的取值. 本文运用仿真分析方法, 通过对比在不同参数取值下算法的性能, 依次确定  $\rho_1 = 0.2, \rho_2 = 0.1, \rho_3 = 0.02, \alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.3, \alpha_3 = 0.15$ .

针对由精英解集生成概率分布过程中出现的样本信息缺失问题, 采用精英解集分段生成样本方式, 以保证样本信息的多样性和完整性, 并加入精英解集保留策略, 提高精英解集的生成质量. 样本分段生成和精英保留策略如图 2 所示.

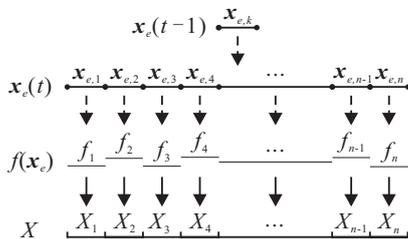


图 2 样本分段生成和精英保留策略示意图

图 2 中:  $x_e(t)$  和  $x_e(t-1)$  分别为当前时刻与上一时刻的精英解集;  $f(x_e)$  为精英解集的概率分布;  $X$  为服从概率分布的随机变量;  $x_{e,k}$  为  $t-1$  时刻保留至  $t$  时刻的精英解集;  $x_e(t)$  被依次划分为  $n$  段, 由精英解集的各段  $[x_{e,1}, x_{e,2}, \dots, x_{e,n}]$  生成各自的概率分布  $[f_1, f_2, \dots, f_n]$ , 并依据每段精英解集在样本中所占比例, 逐一生成服从概率分布的随机变量  $[X_1, X_2, \dots, X_n]$ .

## 2.2 改进多目标交叉熵算法

依据所研究的问题, 在优化过程中加入启发式调度规则可大幅度缩减可行域, 提高算法的求解速度. 采用蓄电池在谷期电价充电和尖峰期电价放电的调度策略, 实现系统对大电网的削峰填谷, 即当  $t$  在谷期时,  $P_{\text{battery}} > 0$ ; 当  $t$  在尖峰期时,  $P_{\text{battery}} < 0$ . 为提高地源热泵经济效益和地热循环的换热效率, 依据冷热负荷值设定地源热泵最小功率限额, 即当  $Q_{\text{load,h}} < 0.1Q_r$  时,  $Q_{\text{hp,min}} = 0.05Q_r$ ; 当  $Q_{\text{load,h}} \geq 0.1Q_r$  时,  $Q_{\text{hp,min}} = Q_{\text{in,min}} + P_{\text{hp,min}}\varphi_{\text{hp}}$ .

## 2.3 算法求解

基于改进多目标交叉熵算法思想, 并结合启发式调度规则, 系统调度优化求解流程如下.

Step 1: 依据分布式单元功率输出约束, 结合启

发式调度规则缩减可行域  $\Omega \rightarrow \Omega_0$ ; 初始化决策变量的概率分布参数  $\mu_0$  和  $\sigma_0^2$ , 生成  $N$  个调度计划  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ .

Step 2: 计算系统多个目标的函数值, 定义多目标优化为小概率事件; 依据目标值对  $N$  个调度计划进行非支配排序, 确定非支配和支配解的层次排序  $F = (F_1, F_2, \dots)$ .

Step 3: 引入分位参数  $\rho$ , 设定  $x_{\rho \cdot N}$  为空集, 执行  $x_{\rho \cdot N} = x_{\rho \cdot N} \cup F_i$ , 直到  $|x_{\rho \cdot N}| \leq \rho \cdot N$  &  $|x_{\rho \cdot N}| + |F_i| \geq \rho \cdot N$ .

Step 4: 对  $F_i$  进行拥挤距离排序, 依次选择其中  $(\rho \cdot N - |x_{\rho \cdot N}|)$  个解, 即  $x_{\rho \cdot N} = x_{\rho \cdot N} \cup F_i(1 : (\rho \cdot N - |x_{\rho \cdot N}|))$ , 由  $x_{\rho \cdot N}$  构成精英解集  $x_e$ .

Step 5: 依据样本数量, 将精英解集  $x_e$  均匀划分为  $n$  段, 运用样本分段生成和精英保留策略生成概率分布参数  $\mu_t$  和  $\sigma_t^2$ . 由于经过多次迭代后概率密度函数的方差逐渐减小, 为防止优化陷入局部最优, 引入平滑参数  $\alpha$ , 其更新公式如下:

$$\begin{cases} \mu_t = \frac{\alpha \sum_{i=1}^{\rho \cdot N} x_i}{\rho \cdot N} + (1 - \alpha)\mu_{t-1}, \\ \sigma_t^2 = \frac{\alpha \sum_{i=1}^{\rho \cdot N} (x_i - \mu_t)^2}{\rho \cdot N} + (1 - \alpha)\sigma_{t-1}^2. \end{cases} \quad (15)$$

Step 6: 由  $\mu_t$  和  $\sigma_t^2$  构建截尾正态分布概率密度函数  $h_t(x)$  更新调度计划,  $x \in [l, u]$ .  $H_t(x)$  为  $x \in (-\infty, \infty)$  的正态分布概率密度函数.

$$h_t(x) = \begin{cases} 0, & x < l \text{ 或 } x > u; \\ \frac{H_t(x)}{\int_l^u H_t(x) dx}, & l \leq x \leq u. \end{cases} \quad (16)$$

Step 7: 设定标准差最小额度  $\sigma_e$ , 如果对于任意  $t \geq 1, k \geq 5$ , 存在  $\sigma_t \leq \sigma_e$  和  $\sigma_{t+k} \leq \sigma_e$ , 或迭代次数等于最大迭代次数, 则停止, 否则重复 Step 2 ~ Step 6.

## 3 算例仿真

### 3.1 算例数据

为了验证所提多目标调度模型与优化算法的有效性, 在 Matlab 中进行仿真验证. 本文采用某公司楼宇冷热电联供一体化系统的基本参数进行分析, 系统主要由光储发电系统、法凯涑玛地源热泵及其天然气辅助供能设备构成, 结合当地分时电价政策对系统运行进行优化. 系统中光伏装机容量为 300 kWp, 蓄电池组额定存储容量为 250 kW·h, 蓄电池最大、最小荷电状态和初始容量分别为 100%、20%、60% 额定容量, 其充放电效率均为 0.9, 自放电率为 0.001. 考虑到功率传输中的损耗问题, 设定逆变器和电力线路损耗为 5%, 热力线路和空调管线损耗为 10%. 分布式单

元相关参数如表1所示,购电电价参照某省商用电价政策,具体数据如表2所示,售电电价结合中国分布式光伏并网补贴政策,取1.12元/kW·h.

表1 分布式单元参数

设备类型	功率上限/kW	功率下限/kW	启停次数	启停间隔时间/h
地源热泵	450	15	3	0.7
辅助锅炉	200	5	10	0.5
蓄电池	50	-50	—	—
电网	400	200	—	—

表2 分时电价

时段	电价期	购电价格/(元/kW·h)
[1,7), [23,24)	谷期	0.307
[7,8), [11,18)	平期	0.702
[8,10), [18,19), [21,23)	高峰期	1.053
[10,11), [19,21)	尖峰期	1.218

该省气候属于温带季风气候,四季分明,楼宇冷热负荷交替需求.本文只选取冬季某天作为系统的运行工况,忽略地源热泵供冷和供热的时差性.系统的光伏出力 and 日负荷曲线如图3所示.

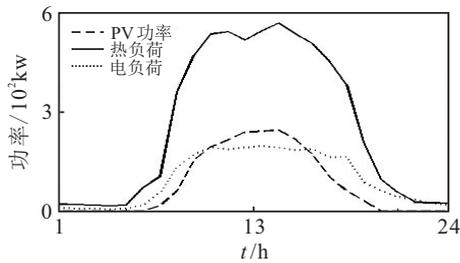


图3 工况数据

### 3.2 仿真优化结果

考虑到多目标交叉熵算法中小概率事件发生的指向性,样本规模取为200,最大迭代次数为100.针对启发式算法具有随机性的特点,文中给出的结果为算法连续运行10次后的平均值.

采用改进多目标交叉熵算法并结合启发式调度规则求解算例,在相同终止条件下与标准多目标交叉熵算法进行对比.其中:标准多目标交叉熵的分位点取0.1,平滑参数取0.7.算法运行相关参数对比如表3所示,所获得的Pareto沿对比如图4所示.

表3 多目标优化结果对比

算法	迭代次数	Pareto 前沿解个数
MOCE	68	77
改进MOCE	89	134
启发式规则+改进MOCE	53	98

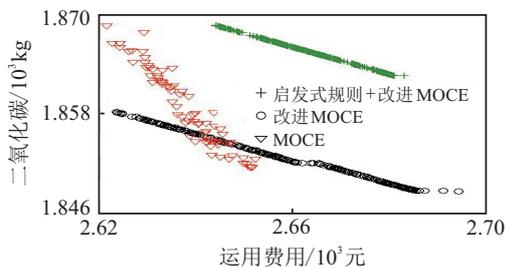


图4 Pareto 前沿结果对比

由表3可知,在相同的算法结束条件下,由于参数变化更新和样本信息量增大,改进的MOCE收敛速

度相对于MOCE略微缓慢,其迭代次数明显高于原始算法的次数.此外,改进算法的Pareto前沿解的个数明显增多,说明样本丰富性的增加可以显著提高优化解的个数.最后,加入启发式调度规则加快了算法收敛速度,算法迭代次数大幅度下降,由于人为地缩小了可行解域,Pareto前沿解的个数也大幅下降.

由图4可知,MOCE的Pareto前沿解分布松散且不均匀,而后两种改进算法的结果均为直线状紧密的分布,说明解的分布特性得到显著改进.此外,改进MOCE的结果在二氧化碳排放方面是降低的,在运行费用方面则有所升高,其最优解的分布区域被改变,但非支配解集的数量和分布特性显著提升,说明由于样本信息量的增大,改进MOCE的求解精度有所提高.这是因为多目标与单目标不同,在求解精度上不是单纯对目标值大小的比较,而是在一个最优区域内针对非支配解集信息完整性的搜索.可以看到,加入启发式规则的优化结果在收敛性和分布特征上与改进MOCE类似,但是在二氧化碳排放和运行费用方面却明显增大,说明启发式调度规则人为地改变了最优解集的分布区域.

依次以最小运行费用和最小二氧化碳排放为优化目标,采用改进交叉熵算法对系统运行进行单目标调度优化,其最优调度方案如图5和图6所示.

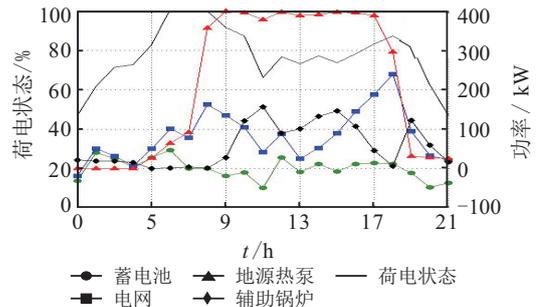


图5 最小运行费用优化调度结果

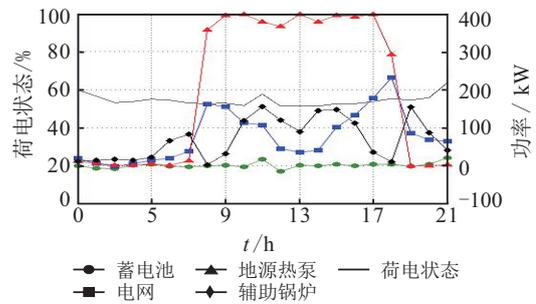


图6 最小二氧化碳优化调度结果

由图5可知:在电力调度方面,1时段~7时段内电负荷较小,蓄电池在谷期持续充电,电负荷由电网供给;在7时段~8时段内,蓄电池处于满电状态,在尖峰时段和高峰时段优先调度蓄电池放电,实现了对大电网的削峰填谷.然而,在调度周期内光伏发电和蓄电池出力不能满足负荷需求,系统需向电网大量购电来满足功率缺额.在系统供热方面,地源热泵在1

时段~4时段内的低负荷时段处于停机状态,辅助锅炉在5时段~7时段内处于停机状态.可以看到,在调度周期内地源热泵起到主力供热作用,当出现热负荷峰值和热功率不足时则调用辅助锅炉来满足.考虑到最小二氧化碳排放需要降低电网购电和天然气消耗来满足.与图5相比,图6中蓄电池荷电状态变化较小,没有依据电价变化适时充放电.为减少系统从电网购电,地源热泵出力紧跟光伏发电的变化,其在19时段~21时段出现停机现象,夜间热负荷主要由辅助锅炉满足.由图6可知,地源热泵消耗电量部分来自于电网,在最小二氧化碳排放目标下,减小天然气消耗和降低电网购电存在一定矛盾.

单目标与多目标优化结果对比见表4.由表4可知,多目标优化被定义为小概率事件,为增大小概率事件发生机率,改进交叉熵算法运行过程中舍弃了单目标最优解,只保留最严谨的非支配解,从而获得的Pareto前沿范围远小于由单目标最优解划定的范围.表4中运行费用和二氧化碳排放存在矛盾,因此单目标优化很难兼顾系统其他需求,难以实现同时最优.而多目标优化可有效权衡经济与环境之间的效益,为系统运行优化提供客观依据,且决策者可以在Pareto最优解集中依据自身需求选择系统调度优化方案.

表4 单目标与多目标对比

目标	运行费用/元	二氧化碳排放/kg
最小运行费用	2 530	1 903
最小二氧化碳排放	2 742	1 798
多目标优化	(2 620,2 700)	(1 845,1 870)

## 4 结 论

为了提高系统的可再生能源利用率和经济效益,实现节能减排,本文建立了包含最小运行费用和二氧化碳排放的多目标调度优化模型,并采用启发式调度规则和改进多目标交叉熵算法对模型进行求解.在模型建立中,加入了设备启停约束,以有效防止设备频繁启停,保障系统稳定运行.考虑到标准多目标交叉熵算法求解过程中易出现样本缺失和解的分布特性较差问题,引入样本分段生成策略和参数更新机制有效改进算法.通过加入启发式调度规则,虽然实现了系统削峰填谷和提高地源热泵换热效率的需求,并提高了算法的收敛速度,但却人为降低了系统经济效益.算例仿真表明,所提多目标模型和算法能够有效兼顾系统的经济和环境效益,满足用户多样性优化需求,对实际生产具有指导意义.文中忽略了可再生能源随机性以及其渗透率大小对系统运行的影响.因此,可再生能源随机性和在微网中渗透率大小对系统优化运行的影响可作为进一步研究的内容.

## 参考文献(References)

[1] 王成山,武震,李鹏.微电网关键技术[J].电工技术学报,2014,29(2):1-12.

(Wang C S, Wu Z, Li P. Research on key technologies of microgrid[J]. Trans on China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.)

[2] Mao M Q, Ji M H, Dong W, et al. Multi-objective economic dispatch model for a microgrid considering reliability[C]. IEEE Int Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei: IEEE, 2010: 993-998.

[3] 荆有印,白鹤,张建良.太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J].中国电机工程学报,2012,32(20):82-87.  
(Jing Y Y, Bai H, Zhang J L. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power System[J]. Proc of the CSEE, 2012, 32(20): 82-87.)

[4] Wu J Y, Wang J L, Li S. Multi-objective optimal operation strategy study of micro-CCHP system[J]. Energy, 2012, 48(1): 472-483.

[5] Munoz M L, Ramos A. Goal programming approach to maintenance scheduling of generating units in large scale power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1021-1028.

[6] 陈洁,杨秀,朱兰,等.微网多目标经济调度优化[J].中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.  
(Chen J, Yang X, Zhu L, et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization[J]. Proc of the CSEE, 2013, 33(19): 57-66.)

[7] Burer M, Tanaka K, Favrat D. Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycle, heat pumps and chillers[J]. Energy, 2003, 28(6): 497-518.

[8] 杨凡,李歧强,王桂荣.柔性宽度遗传计划编制的一种混合改进算法[J].控制与决策,2015,30(2):348-352.  
(Yang F, Li Q Q, Wang G R. Hybrid improved algorithm for cast planning problem with flexible width[J]. Control and Decision, 2015, 30(2): 348-352.)

[9] Sayyaadi H, Amlashi E H, Amidpour M. Multi-objective optimization of a vertical ground source heat pump using evolutionary algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(8): 2035-2046.

[10] David B R, Harvey L D D. Strategies for correlating solar PV array production with electricity demand[J]. Renewable Energy, 2015, 76: 432-440.

[11] Hu M Q, Cho H J. A probability constrained multi-objective optimization model for CCHP system operation decision support[J]. Applied Energy, 2014, 116: 230-242.

[12] Karim S, Abdelhalim T, Mounir B, et al. Multiobjective optimization using cross-entropy approach[J]. J of Optimization, 2013: 1-9.

(责任编辑:齐 霁)