

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201360

# 考虑源荷不确定性的 CCHP 型微网多目标优化调度

张靠社<sup>1</sup>, 冯培基<sup>1</sup>, 张刚<sup>2</sup>, 侯金旺<sup>1</sup>, 解佗<sup>2</sup>, 李萌<sup>3</sup>, 何欣<sup>4</sup>

(1. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 陕西燃气集团有限公司, 陕西 西安 710016; 4. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 为提高冷热电联供(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)型微网的综合运行效益, 建立了以运行费用最小和二氧化碳排放量最小为目标的优化模型。针对源荷的不确定性, 提出了基于误差场景整体生成与缩减的典型场景获得方法, 并引入伪 F-统计(Pseudo F-statistics, PFS)指标用于确定最佳场景缩减数目。实例计算表明, 与不考虑源荷不确定的确定性优化方法相比, 所提方法在应对源荷的不确定性上具有较好效果, 运行费用平均下降 0.31%, 二氧化碳排放量平均下降 4.85%。此外, 计算分析表明, 应用 PFS 指标确定最佳聚类数目可以找到模型应对源荷不确定的能力与计算时间之间的平衡点, 提高模型计算效率。

**关键词:** CCHP 型微网; 优化调度; 场景生成与缩减; 伪 F-统计; 源荷不确定性

## Multi-objective optimization scheduling of CCHP-type microgrids considering source-load uncertainty

ZHANG Kaoshe<sup>1</sup>, FENG Peiji<sup>1</sup>, ZHANG Gang<sup>2</sup>, HOU Jinwang<sup>1</sup>, XIE Tuo<sup>2</sup>, LI Meng<sup>3</sup>, HE Xin<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Shaanxi Provincial Natural Gas Co., Ltd., Xi'an 710016, China;

4. Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In order to improve the comprehensive operating benefits of the CCHP-type microgrid, an optimization model with minimum operating cost and CO<sub>2</sub> emissions is established. In order to deal with the uncertainty of source-load, a typical scene acquisition method based on the overall generation and reduction of error scenes is proposed. The Pseudo F-statistics (PFS) index is introduced to determine the optimal number of scene reductions. The example calculation shows that compared with the deterministic optimization method which does not consider the source-load uncertainty, the method proposed in this paper has a better effect in dealing with that uncertainty. The operating cost is reduced by 0.31%, and the CO<sub>2</sub> emissions are reduced by 4.85%. In addition, the calculation example shows that applying the PFS index to determine the optimal number of clusters can find the balance between the model's ability to deal with uncertainty and the calculation time, and improve the calculation efficiency of the model.

This work is supported the Key Research and Development Plan of Shaanxi Province (No. 2018ZDCXL-GY-10-04) and the Research Fund of the State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology (No. 2019KJCXTD-10).

**Key words:** CCHP-type microgrid; optimal scheduling; scenario generation and reduction; Pseudo F-statistics; source-load uncertainty

## 0 引言

CCHP 型微网是一种以联供设备为核心, 包含发电、负荷、储能等多个分布式单元, 存在冷、热、

**基金项目:** 陕西省重点研发计划项目资助(2018ZDCXL-GY-10-04); 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室自主研究课题项目资助(2019KJCXTD-10)

电多种能量形式的多能源综合供给系统, 其具有能源利用率高、环保性好以及提高新能源消纳等众多优点<sup>[1-2]</sup>。然而, CCHP 型微网运行性能的好坏与采取何种运行策略有很大的关系, 目前普遍应用的以电定热和以热定电运行策略均会造成电量或热量的浪费<sup>[3-4]</sup>。此外, 可再生能源的出力具有随机性、间歇性和波动性, 冷热电负荷的预测不可能实现绝对的无差。随着 CCHP 型微网中可再生能源占有率和

各类负荷规模的持续增加,有必要对 CCHP 型微网的源荷不确定性问题进行处理,以确保 CCHP 型微网可靠、经济运行<sup>[5-7]</sup>。

为应对 CCHP 型微网优化调度中的源荷不确定性问题,文献[8]提出了一种通用的 CCHP 系统建模方法,其以五类母线为中心,构建了灵活可扩展的微网经济优化模型,使用混合整数线性规划方法完成求解,并验证了所提模型的有效性和经济性。文献[9]提出了一种鲁棒的优化方法,以适应冷热电负荷以及光伏出力的不确定性,并验证了所提方法的优化结果优于确定性优化模型。然而鲁棒优化方法中最劣情况实际发生的概率极低,因此优化得到的调度计划存在一定保守性。文献[10]采用了基于机会约束的规划方法以应对源荷不确定性,该方法利用概率约束代替通常的确定性约束,允许较小概率下不满足约束,以避免为应对小概率的极端偏差而影响系统运行经济性的情况发生,然而置信度的选取具有主观性。文献[11]采用了滚动调度的方法以实现 CCHP 微网的经济运行,但该方法对计算速度有较高要求,较难与多目标问题结合。

在场景优化方法的研究方面,大量文献通过场景生成与缩减的方法来应对风电出力、光伏出力以及负荷等的不确定性。文献[12]指出对于优化调度问题,场景优化可以减小系统运行风险,并且优化结果的精度随场景精度的提高而提高;文献[13]为了模拟源荷不确定性,使用蒙特卡洛模拟生成光伏出力、电负荷与热负荷的场景;文献[14]分别生成了风电出力与负荷的场景,并将两者组合得到综合场景及其概率。文献[15]根据概率密度分布函数生成了光伏出力波动、风电出力波动以及热负荷波动的场景,并将各类场景进行了任意组合。文献[16]认为风电出力、光伏出力以及负荷的波动服从正态分布,并以此进行了场景生成。然而,上述文献均未提供客观的确定场景缩减数目的方法。

在上述文献的基础上,综合分析各类不确定性处理方法的优劣,本文提出了基于误差场景整体生成与缩减的典型场景获得方法,并引入 PFS 指标用于确定最佳场景缩减数目。案例计算验证了所提方法在应对源荷不确定性上的有效性与优越性。

## 1 CCHP 型微网

### 1.1 系统结构

图 1 为一典型的 CCHP 型微网结构图。图中,燃气内燃机以天然气为燃料向用户提供电力。同时,其产生的高温烟气与缸套水将余热输送至吸收式制冷机与换热装置中以满足用户的冷、热负荷需求。

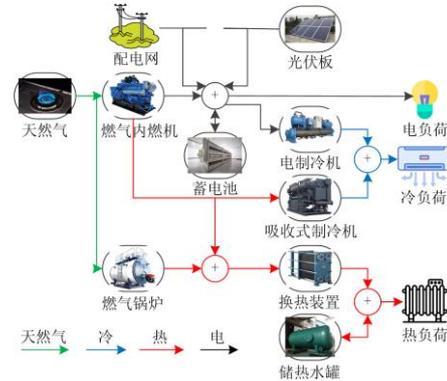


图 1 CCHP 型微网结构图

Fig. 1 CCHP-type microgrids structure

此外,光伏板、蓄电池以及城市电网也参与电能的供应。蓄热罐可根据需要进行储放热操作,燃气锅炉与电制冷机组可进行供热与供冷补充。

### 1.2 燃气内燃机

燃气内燃机作为系统的主体供能设备,其运行效率在不同负载率下变化较大,其数学模型<sup>[17]</sup>为

$$\begin{cases} V_{mt} = \sum_{t=1}^T \frac{P_{mt}(t)\Delta t}{\eta_{mtP}(t)L_{gas}} \\ Q_{mt}(t) = \frac{P_{mt}(t)\eta_{mtQ}(t)}{\eta_{mtP}(t)} \\ P_{mt}^{min} \leq P_{mt}(t) \leq P_{mt}^{max} \\ Q_{mt}^{min} \leq Q_{mt}(t) \leq Q_{mt}^{max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $V_{mt}$  为天然气消耗量,  $m^3$ ;  $P_{mt}$  为输出的电功率, kW;  $Q_{mt}$  为余热功率, kW;  $\eta_{mtP}$ 、 $\eta_{mtQ}$  分别为发电效率与余热效率;  $L_{gas}$  为天然气热值,本文中  $L_{gas}$  取天然气低热值  $9.7 \text{ kWh}/m^3$ ;  $\Delta t$  为调度时间尺度,本文取  $1 \text{ h}$ ;  $T$  为调度时段数。

以 MWM 公司的 TCG2016 V16C 型微型燃气轮机为例,根据实际测试数据,利用 Matlab 进行多项式曲线拟合可得发电效率、余热效率与负载率之间的函数关系为

$$\begin{cases} \eta_{mtP}(t) = -0.1040\left(\frac{P_{mt}(t)}{P_{mt0}}\right)^2 + 0.2260\left(\frac{P_{mt}(t)}{P_{mt0}}\right) + 0.2850 \\ \eta_{mtQ}(t) = 0.0960\left(\frac{P_{mt}(t)}{P_{mt0}}\right)^2 - 0.2480\left(\frac{P_{mt}(t)}{P_{mt0}}\right) + 0.6250 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $P_{mt0}$  为燃气内燃机额定发电功率, kW。

### 1.3 吸收式制冷机

吸收式制冷机数学模型为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} Q_{ac} = COP_{ac} Q_{ac\_in} \\ Q_{ac}^{min} \leq Q_{ac} \leq Q_{ac}^{max} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $Q_{ac}$  为制冷功率, kW;  $Q_{ac,in}$  为输入热量功率, kW;  $COP_{ac}$  为制冷系数。

#### 1.4 储能装置

蓄电池与储热罐等储能装置数学模型为<sup>[19]</sup>

$$\begin{cases} S_s(t) = (1 - \tau_s)S_s(t-1) + (P_{S,chr}(t)\eta_{S,chr} - \frac{P_{S,dis}(t)}{\eta_{S,dis}})\Delta t \\ P_{S,chr}^{\min} \leq P_{S,chr} \leq P_{S,chr}^{\max} \\ P_{S,dis}^{\min} \leq P_{S,dis} \leq P_{S,dis}^{\max} \\ S_s^{\min} \leq S_s \leq S_s^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $S_s(t)$  为  $t$  时段储能装置的剩余能量, kWh;  $P_{S,chr}(t)$  和  $P_{S,dis}(t)$  分别为  $t$  时段储能的输入和输出功率, kW;  $\tau_s$  为储能的损失系数;  $\eta_{S,chr}$  和  $\eta_{S,dis}$  分别为储能的能量输入和输出转换效率。

#### 1.5 燃气锅炉与换热装置

燃气锅炉与换热装置的数学模型为<sup>[19]</sup>

$$\begin{cases} Q_{ex} = \eta_{ex} Q_{ex,in} \\ V_{gb}(t) = Q_{gb}(t)\Delta t / (\eta_{gb} L_{gas}) \\ Q_{ex}^{\min} \leq Q_{ex} \leq Q_{ex}^{\max} \\ Q_{gb}^{\min} \leq Q_{gb} \leq Q_{gb}^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $Q_{ex,in}$  为换热器的输入热功率, kW;  $Q_{ex}$  为换热器的输出热功率, kW;  $Q_{gb}$  为燃气锅炉的制热功率, kW;  $V_{gb}$  为燃气锅炉耗气量,  $m^3$ ;  $\eta_{gb}$ 、 $\eta_{ex}$  分别为燃气锅炉与换热器的效率。

#### 1.6 电制冷机

电制冷机的制冷功率与所耗电功率的关系为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} Q_{ec} = COP_{ec} P_{ec} \\ Q_{ec}^{\min} \leq Q_{ec} \leq Q_{ec}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Q_{ec}$  为制冷功率, kW;  $P_{ec}$  为耗电功率, kW;  $COP_{ec}$  为能效比。

#### 1.7 能流计算模型

根据微网结构与各设备数学模型, 构建能流计算模型如式(7)所示。

$$\begin{cases} Q_{ac} = P_{mt} \cdot (\eta_{mtQ} / \eta_{mtP}) \cdot k_{mt} COP_{ac} \\ Q_{ec} = Q_{load,c} - Q_{ac} \\ Q_{ex} = P_{mt} \cdot (\eta_{mtQ} / \eta_{mtP}) \cdot (1 - k_{mt}) \eta_{ex} \\ Q_{gb} = Q_{load,h} - Q_{ex} - Q_{hs} \\ P_{ec} = Q_{ec} / COP_{ec} \\ P_{op} = k_{op} P_{mt} \\ P_{grid} = P_{load} + P_{ec} + P_{op} - P_{mt} - P_{es} - P_{pv} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k_{mt}$  为燃气内燃机余热分配到吸收式制冷机

用于制冷的比例;  $Q_{load,c}$ 、 $Q_{load,h}$  分别为冷、热负荷大小, kW;  $P_{load}$  为除电制冷机耗电功率以外的电负荷大小, kW;  $P_{op}$  为系统自用电功率, kW;  $k_{op}$  为系统自用电率;  $P_{grid}$  为电网购电功率, kW;  $Q_{hs}$  为储热罐放热功率, kW;  $P_{es}$  为蓄电池放电功率, kW;  $P_{pv}$  为光伏板输出功率, kW。

## 2 源荷不确定性模型

### 2.1 场景生成

光伏出力与冷、热、电负荷的日前预测存在误差, 本文将光伏出力与负荷的实际值看作预测值与预测误差之和, 表达式为

$$\begin{cases} P_{PV,j,t} = P_{PVfo,j,t} + \xi_{PV,j,t} \\ P_{L,j,t} = P_{Lfo,j,t} + \xi_{L,j,t} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P_{PV,j,t}$ 、 $P_{PVfo,j,t}$  为第  $j$  个场景下  $t$  时段光伏的实际出力与预测出力, kW;  $\xi_{PV,j,t}$  为光伏预测误差, kW;  $P_{L,j,t}$ 、 $P_{Lfo,j,t}$  为场景  $j$  下  $t$  时段负荷的实际值与预测值, kW;  $\xi_{L,j,t}$  为负荷预测误差, kW。

假设光伏和负荷预测误差服从均值为 0 的正态分布<sup>[20]</sup>, 取光伏、负荷预测误差的标准差分别为<sup>[21]</sup>

$$\begin{cases} \sigma_{PV,j,t} = \frac{1}{5} P_{PVfo,j,t} + \frac{1}{50} P_{PVN} \\ \sigma_{L,j,t} = \frac{3}{100} P_{Lfo,j,t} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\sigma_{PV,j,t}$ 、 $\sigma_{L,j,t}$  分别为第  $j$  个场景下  $t$  时段的光伏出力误差与负荷预测误差的标准差;  $P_{PVN}$  为光伏额定容量, kW。

针对光伏出力与负荷的不确定性, 可以根据其误差概率分布通过随机抽样产生相应样本。本文采用拉丁超立方抽样进行场景生成, 以确保样本覆盖随机变量的整个样本空间, 具体步骤见文献[22]。

### 2.2 场景缩减

场景缩减的目的在于用较少的典型场景体现大量场景的特征, 本文采用  $k$ -means 聚类算法对生成的场景进行缩减, 实现减小运算繁琐度的目的, 该算法计算步骤如下:

- 1) 设置聚类数  $k$ 。
- 2) 随机初始化  $k$  个聚类中心。
- 3) 计算每个场景分别到  $k$  个聚类中心的距离, 按照距离最小原则将每个场景划分到最靠近自己的聚类中心, 形成  $k$  簇。
- 4) 重新计算每簇的质心(均值)。
- 5) 重复步骤 1)–4), 直至质心位置不再变化,

各簇最终质心位置即为聚类所得场景。

6) 根据每簇包含的场景数, 计算第  $i$  个聚类中心所代表的概率, 表达式为

$$q_i = \frac{m_i}{s_0} \quad (10)$$

式中:  $m_i$  为第  $i$  簇包含的场景数;  $s_0$  为总的场景数。

可以看到,  $k$ -means 聚类算法的聚类数  $k$  需事先给定, 为找到最优的场景缩减数目, 本文引入了 PFS 指标。考虑到计算速度, 最大场景缩减数目通常不超过  $\sqrt{s_0}$ 。通过依次计算各个场景缩减数目所对应的 PFS 值, 来确定最佳场景缩减数目。

### 2.3 多维 PFS 判别函数

伪 F-统计(Pseudo F-statistics, PFS)是来自方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)领域的一个统计量<sup>[23]</sup>。对于  $P(P \geq 1)$  维变量的样本, 定义一个“伪 F 统计比率”, 如式(11)所示。

$$PFS = \frac{\text{tr}(S_B^P)(m-k)}{\text{tr}(S_W^P)(k-1)} \quad (11)$$

式中:  $\text{tr}(S_B^P)$ 、 $\text{tr}(S_W^P)$  分别为矩阵  $S_B^P$ 、 $S_W^P$  的迹;  $m$  为样本数;  $k$  为类数;  $S_B^P$ 、 $S_W^P$  分别为  $P$  维变量样本的类间和类内散布矩阵, 表达式如式(12)所示。

$$\begin{cases} S_B^P = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \mu_{ij} v_i v_i^T \\ S_W^P = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \mu_{ij} (x_j - v_i)(x_j - v_i)^T \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $x_j$  为第  $j$  个样本向量;  $v_i$  为第  $i$  类  $C_i$  的聚类中心;  $\mu_{ij}$  的表达式为

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 0 & x_j \in C_i \\ 1 & x_j \notin C_i \end{cases} \quad (13)$$

$\text{tr}(S_B^P)$  和  $\text{tr}(S_W^P)$  的关系为

$$S_T^P = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \mu_{ij} x_j x_j^T \quad (14)$$

$$\text{tr}(S_B^P) + \text{tr}(S_W^P) = \text{tr}(S_T^P) \quad (15)$$

式中,  $S_T^P$  为  $P$  维变量样本的混合散布矩阵。

对于式(11),  $\text{tr}(S_B^P)$  表征了类内距离,  $\text{tr}(S_W^P)$  表征了类间距离。一般而言, 随着聚类数目  $k$  的增加, 类内的距离将减小, 类间的距离将增大。此外,  $(m-k)/(k-1)$  随着  $k$  的增加而减小。因此, 文献[24]指出随着  $k$  的增大, PFS 值先上升而后不断下降, 即 PFS 可能在某一个  $k$  值处达到最大值, 而该值即为最佳聚类数目。即寻找最佳的聚类数  $k$  等同于寻找最大的 PFS 值。文献[25]对比了 30 个聚类有效性

指标, 其中 PFS 指标性能最优。

## 3 CCHP 型微网优化模型

### 3.1 目标函数

目标 1 为调度周期内系统运行成本最小, 表达式为

$$\min f_1 = \sum_{s=1}^k (P_s \sum_{t=1}^T [F_{\text{gas}}(t,s) + F_{\text{grid}}(t,s) + F_{\text{op}}(t,s)]) \quad (16)$$

式中:  $f_1$  为系统总的运行成本, 元;  $P_s$  为场景  $s$  的概率;  $k$  为场景数;  $F_{\text{gas}}(t,s)$ 、 $F_{\text{grid}}(t,s)$ 、 $F_{\text{op}}(t,s)$  分别为  $s$  场景下,  $t$  时段的系统燃料成本、电网购电成本和运行维护成本, 元。对于某一确定场景其具体表达式为

$$\begin{cases} F_{\text{gas}}(t) = C_{\text{gas}} [V_{\text{mt}}(t) + V_{\text{gb}}(t)] \\ F_{\text{grid}}(t) = C_{\text{grid}}(t) P_{\text{grid}}(t) \Delta t \\ F_{\text{op}}(t) = C_{\text{mt}} P_{\text{mt}}(t) + C_{\text{pv}} P_{\text{pv}}(t) + C_{\text{ac}} Q_{\text{ac}}(t) + C_{\text{ex}} Q_{\text{ex}}(t) + \\ C_{\text{ec}} Q_{\text{ec}}(t) + C_{\text{es}} |P_{\text{es}}(t)| + C_{\text{hs}} |Q_{\text{hs}}(t)| \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $C_{\text{gas}}$  为天然气价格, 元/ $\text{m}^3$ ;  $C_{\text{grid}}$  为市电价格, 元/ $\text{kWh}$ ;  $C_{\text{mt}}$ 、 $C_{\text{pv}}$ 、 $C_{\text{ac}}$ 、 $C_{\text{ec}}$ 、 $C_{\text{ex}}$ 、 $C_{\text{es}}$ 、 $C_{\text{hs}}$  分别为燃气内燃机、光伏板、吸收式制冷机、电制冷机、换热器、蓄电池以及储热罐的运行维护成本, 元/ $\text{kW}$ 。

目标 2 为系统总的二氧化碳排放量最小, 其表达式为

$$\min f_2 = \sum_{s=1}^k (P_s \sum_{t=1}^T [F_{\text{co}_2, \text{gas}}(t,s) + F_{\text{co}_2, \text{grid}}(t,s)]) \quad (18)$$

式中:  $f_2$  为系统总的二氧化碳排放量,  $\text{kg}$ ;  $F_{\text{co}_2, \text{gas}}(t,s)$ 、 $F_{\text{co}_2, \text{grid}}(t,s)$  分别为燃气所产生的二氧化碳排量与电网所购电量的等效二氧化碳排放量,  $\text{kg}$ , 对于某一场景, 其计算公式为

$$\begin{cases} F_{\text{co}_2, \text{gas}}(t) = K_{\text{co}_2, \text{gas}} V_{\text{gas}}(t) \\ F_{\text{co}_2, \text{grid}}(t) = K_{\text{co}_2, \text{grid}} P_{\text{grid}}(t) \Delta t \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $K_{\text{co}_2, \text{gas}}$ 、 $K_{\text{co}_2, \text{grid}}$  分别为天然气与市电的二氧化碳折算系数, 单位分别为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $\text{kg}/\text{kWh}$ 。

### 3.2 约束条件

为了保证 CCHP 型微网运行的安全与稳定, 还需要考虑系统能量平衡约束与各设备的运行约束。其中, 各设备的运行约束已在第 1 节作了阐述, 在任一场景下系统冷、热、电三种能量的平衡约束表达式为

$$\begin{cases} P_{mt}(t) + P_{grid}(t) + P_{pv}(t) + P_{es}(t) = P_{load}(t) + P_{ec}(t) + P_{op}(t) \\ Q_{ex}(t) + Q_{gb}(t) + Q_{hs}(t) \geq Q_{load,h}(t) \\ Q_{ac}(t) + Q_{ec}(t) \geq Q_{load,c}(t) \end{cases} \quad (20)$$

### 3.3 模型求解

对本文所建立优化模型的求解为一多目标非线性规划问题，其标准形式为

$$\begin{cases} \min f_i(x) \quad i=1,2,\dots,m \\ \text{s.t.} \quad g_j(x)=0 \quad j=1,2,\dots,p \\ \quad \quad h_k(x) \leq 0 \quad k=1,2,\dots,q \end{cases} \quad (21)$$

式中： $f_i(x)$ 为第*i*个目标函数； $x$ 为*n*维的决策变量，包括调度周期内各时段的燃气内燃机发电功率、余热分配比、蓄电池的充放电功率以及储热罐的储放热功率； $g_j(x)$ 为等式约束函数； $h_k(x)$ 为系统不等式约束函数。

基于分解的多目标进化算法(Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition, MOEA/D)每一代的计算复杂度比NSGA-II要低<sup>[26]</sup>。对于本文所构建的模型，由于决策变量较多(24×4=96个)，采用MOEA/D算法可提高计算速度与计算收敛性，MOEA/D算法详见文献[27]。

在得到Pareto后，本文采用TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)法与信息熵法从Pareto最优集中选取最优解，TOPSIS法与信息熵法具体步骤见文献[28]。

### 3.4 模型流程

综上，本文所提出的针对CCHP型微网的优化调度模型计算流程如下：首先，输入冷热电负荷以及光伏出力的日前预测值，通过拉丁超立方抽样生成大量符合相应概率分布的误差场景，并将预测值与典型误差场景相叠加得到叠加场景集；其次，依据PFS指标确定所得叠加场景集的最佳场景缩减数目，并利用*k*-means聚类算法进行场景缩减得到少量具有代表性的典型场景及其概率；之后，根据系统设备参数与系统结构构建CCHP型微网优化运行模型，并将典型场景代入模型中；最后，使用MOEA/D算法进行求解，得到Pareto最优解集，并利用TOPSIS法与信息熵法从Pareto解集中选择出最佳解。

## 4 算例分析

### 4.1 实例描述

以装有CCHP型微网的西安威斯汀酒店为研究对象进行算例分析。该酒店的CCHP型微网结构如图1所示，系统各设备的参数见表1，燃气内燃机为MWM公司的TCG2016 V16C型微型燃气轮机。

将日前调度周期分为24个时段，调度的时间尺度为1h。该酒店过渡季(春季与秋季)的典型日冷热电负荷曲线与光伏出力数据如图2所示。

表1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	数值	参数	数值
$P_{mt0}$	800 kW	$Q_{ec}^{max}$	349 kW×3+180 kW×1
$Q_{ac}^{max}$	872 kW	$COP_{ec}$	5.54&5.6
$COP_{ac}$	1.2	$Q_{gb}^{max}$	2 462 kW
$Q_{ex}^{max}$	780 kW	$\eta_{gb}$	0.9
$\eta_{ex}$	0.8	$k_{op}$	0.067
$P_{PVN}$	300 kW	$C_{gas}$	2.3 元/m <sup>3</sup>
$\eta_{es,chr} \& \eta_{es,dis}$	0.97	$C_{mt}$	0.03 元/kWh
$\tau_{es}$	0.02	$C_{ac}$	0.025 元/kWh
$P_{es,chr,max} \& P_{es,dis,max}$	100 kW	$C_{ec}$	0.01 元/kWh
$Q_{es}^{max}$	500 kWh×0.9	$C_{ex}$	0.025 元/kWh
$Q_{es}^{min}$	500 kWh×0.2	$C_{gb}$	0.02 元/kWh
$\eta_{hs,chr} \& \eta_{hs,dis}$	0.88	$C_{pv}$	0.08 元/kWh
$\tau_{hs}$	0.01	$C_{es}$	0.02 元/kWh
$P_{hs,chr,max}$	150 kW	$C_{hs}$	0.016 元/kWh
$P_{hs,dis,max}$	200 kW	$K_{co_2,gas}$	0.23 kg/m <sup>3</sup>
$Q_{hs}^{max}$	500 kWh×0.95	$K_{co_2,grid}$	0.972 kg/kWh
$Q_{hs}^{min}$	500 kWh×0	$L_{gas}$	9.7 kWh/m <sup>3</sup>
$C_{grid}$	1.109 8 元/kWh (07:00—11:00,19:00—23:00); 0.750 4 元/kWh (11:00—19:00); 0.391 1 元/kWh (23:00—07:00)		

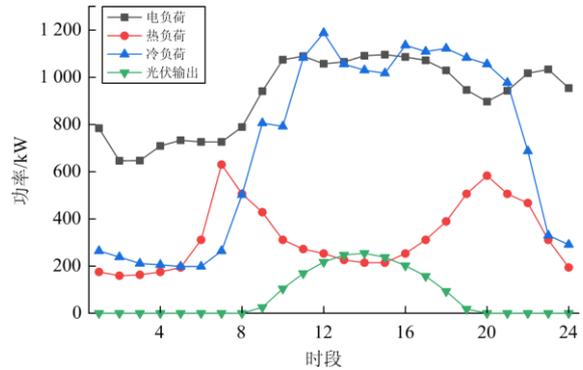


图2 负荷与光伏出力

Fig. 2 Load and PV output

### 4.2 场景生成与缩减

根据2.1节所述方法生成1000个误差场景，将误差场景与预测值相叠加得到场景集如图3所示。

图3场景集共包含1000个场景曲线。每个场景包括96个数值，依次表示每一小时光伏出力与冷、热、电负荷大小。

为确定最佳缩减场景数，将得到的场景集代入

式(11)一式(13)中, 计算聚类数  $k$  从 1 到 10 取值下所生成场景集的 PFS 指标, 结果如图 4 所示。

可以看到,  $k$  为 8 时 PFS 达到峰值, 因此本文将场景缩减为 8 个。利用前述  $k$ -means 聚类方法对得到的 1000 个场景进行缩减, 得到的 8 个典型场景以及各场景出现的概率如图 5 所示。

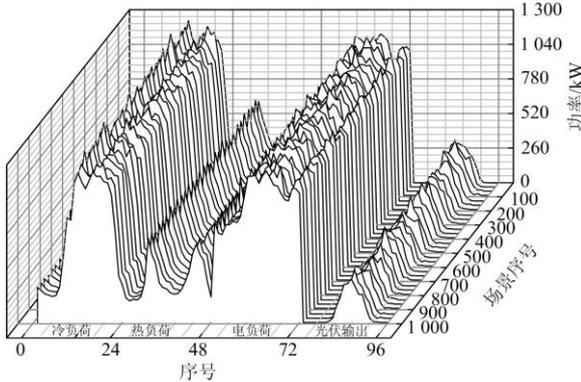


图 3 场景集

Fig. 3 Scene set

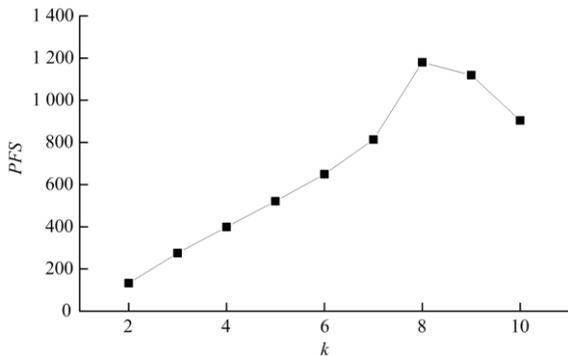
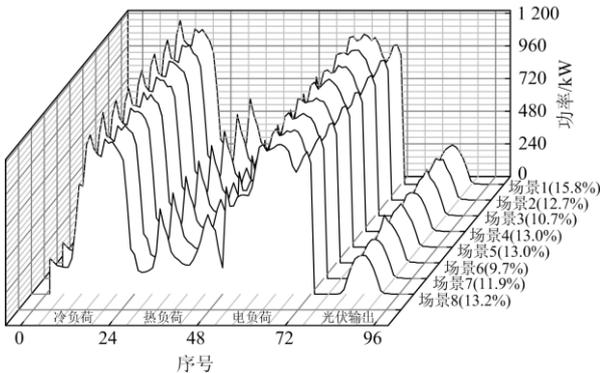
图 4 不同  $k$  值时场景集的 PFS 指标Fig. 4 PFS index of scene set at different  $k$  values

图 5 典型场景集

Fig. 5 Set of typical scenes

#### 4.3 Pareto 前沿与多属性决策

在得到典型场景集的基础上利用 MOEA/D 算

法可求 Pareto 解集如图 6 所示。

对得到的 Pareto 解集, 利用信息熵法得到运行费用和二氧化碳排放量的属性权值分别为 0.48 与 0.52, 运用 TOPSIS 方法, 对 Pareto 解集进行排序, 选择出的最佳方案已用红点在图 6 中标出。

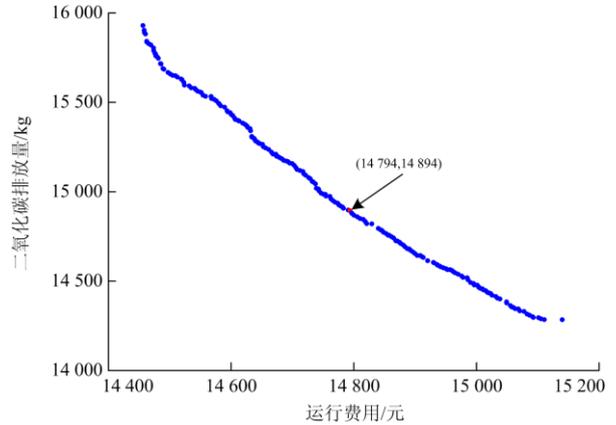


图 6 Pareto 解集

Fig. 6 Pareto solution set

本文还使用 NSGA-II 对模型进行了求解, 在设置相同的计算时间内, 两种算法得到的 Pareto 解集如图 7 所示。

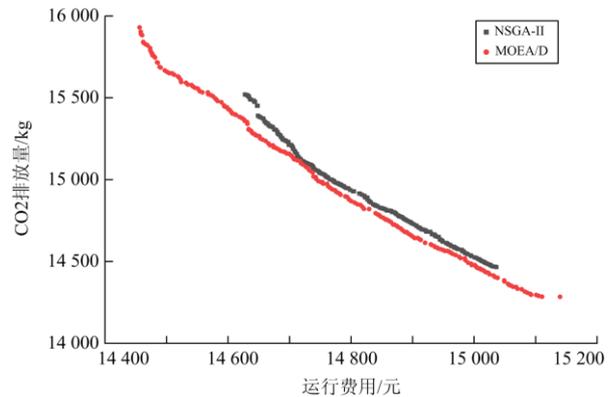


图 7 两种优化算法对比

Fig. 7 Comparison between MOEA/D and NSGA-II

从图 7 可以看出, MOEA/D 算法更适宜于本文所涉及的具有较多决策变量的优化模型求解。

#### 4.4 系统运行状态分析

得到的优化运行方案如图 8—图 10 所示。其中各时段内燃机出力以及余热分配比如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 当市电价格处于峰、平值时, 内燃机几乎处于满发状态。市电价格处于谷值时, 内燃机的发电功率大小需要综合考虑冷热电负荷以及储能装置的情况。此外, 折线为内燃机的余热分配比, 余热分配比的取值需要综合比较供冷与

供热的成本，并尽可能实现与系统储能的配合。

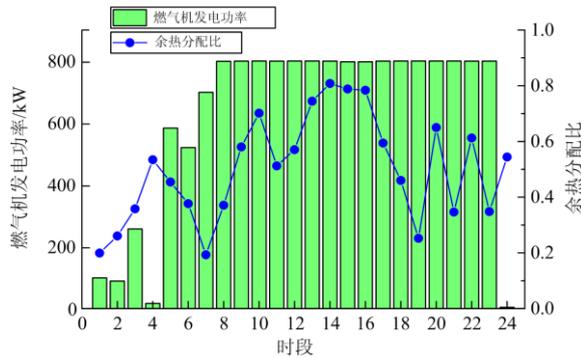


图 8 内燃机出力与余热分配比优化结果图

Fig. 8 GE output and waste heat distribution ratio

各时段蓄电池与储热罐的状态变化以及各时段出力优化结果如图 9 和图 10 所示。

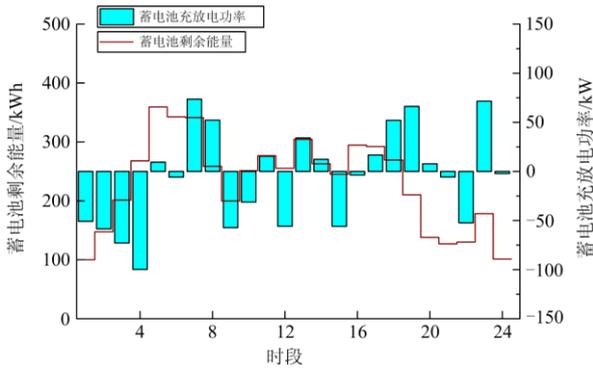


图 9 蓄电池状态变化与各时段出力调度

Fig. 9 Changes in battery status and output during each hour

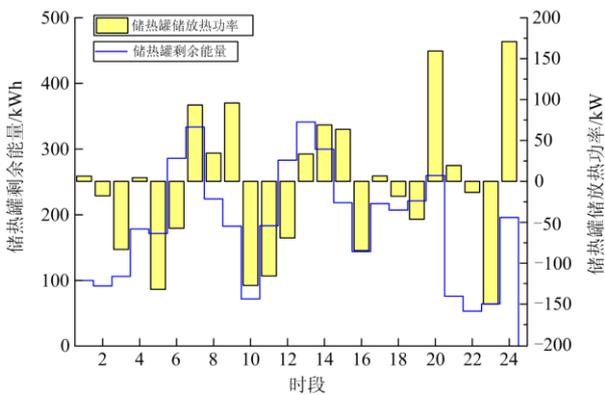


图 10 储热罐状态变化与各时段出力调度

Fig. 10 Thermal storage tank state change and output in each hour

可以看出，受到蓄电池与储热罐容量以及最大充放功率的限制，蓄电池与储热罐的充能与放能交替出现。但蓄电池基本上是在市电价格为峰值时输

出电能，在市电价格为谷值时储存电能。而储热罐则基本是在余热分配比较低或热负荷较小时储热，其他时段放热。储能装置的加入起到了调峰填谷作用，有效地降低了整个调度周期的运行成本。

根据上述优化结果绘制电、热、冷负荷平衡图，如图 11—图 13 所示。

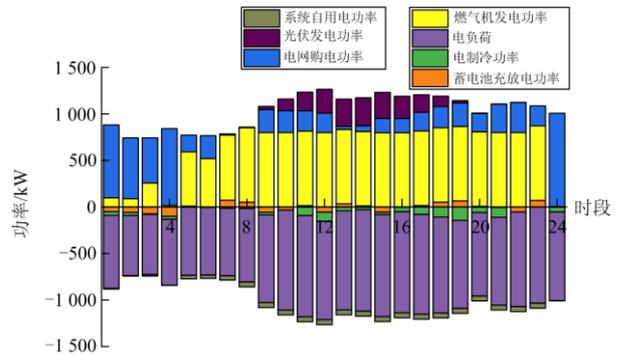


图 11 电负荷平衡图

Fig. 11 Electric load balance chart

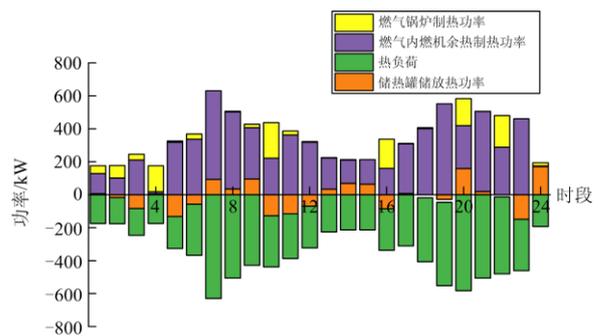


图 12 热负荷平衡图

Fig. 12 Heat load balance diagram

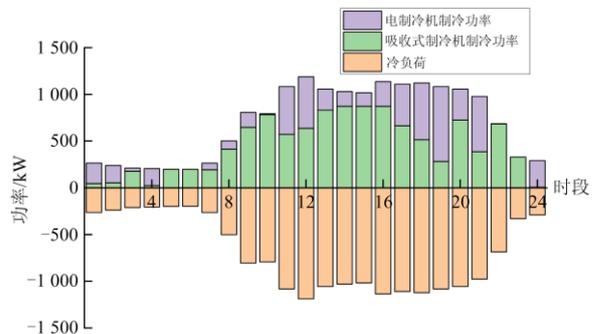


图 13 冷负荷平衡图

Fig. 13 Cold load balance chart

### 4.5 运行方式对比

为验证所提优化模型的有效性，本文还计算了在相同 CCHP 型微网结构和参数下，按以电定热、以热定电以及传统分供系统三种供能方式运行的系

统运行费用与二氧化碳排放量。四种运行方式下的优化运行费用与二氧化碳排放量如表 2 所示。

从表 2 中可以看到, 优化运行模式下 CCHP 型微网的运行费用与二氧化碳排放量均明显小于其他三种模式。以电定热模式下, 运行费用下降 8.40%, 二氧化碳排放量下降 0.15%。以热定电模式下, 运行费用下降 6.56%, 二氧化碳排放量下降 10.80%。

表 2 四种运行方式下系统的运行费用与二氧化碳排量

Table 2 Operating costs and CO<sub>2</sub> emissions in four operating modes

项目	运行方式	数值
运行费用/元	优化运行	14 794
	以电定热	16 151
	以热定电	15 833
	分供系统	23 150
二氧化碳排放量/kg	优化运行	14 894
	以电定热	14 917
	以热定电	16 698
	分供系统	27 139

#### 4.6 场景优化方法有效性检验

为检验场景优化方法在应对源荷不确定性上的效果, 按照 2.1 节所述生成 100 组随机场景, 并将确定性优化方法与本文所述方法的优化结果进行对比, 对比结果如图 14 和图 15 所示。

从图 14 和图 15 中可以看到, 对于生成的 100 个随机场景, 场景优化方法所得运行方案的运行费用均小于确定性优化方法所得运行方案的运行费用, 平均下降比例为 0.31%。场景优化方法所得运行方案的二氧化碳排放量均小于确定性优化方法得到的运行方案的二氧化碳排放量, 平均下降比例为 4.85%。这说明本文所提的场景优化方法在应对源荷的不确定性上是有效的。

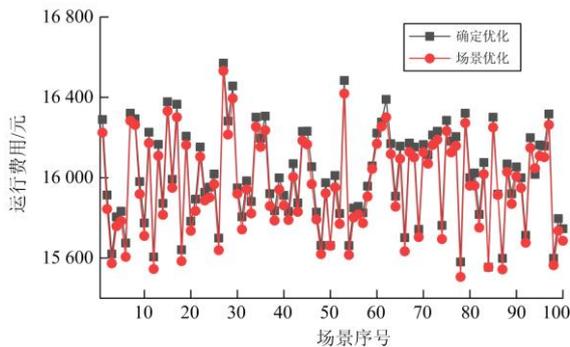


图 14 不同场景下运行费用

Fig. 14 Operating cost for each scenario

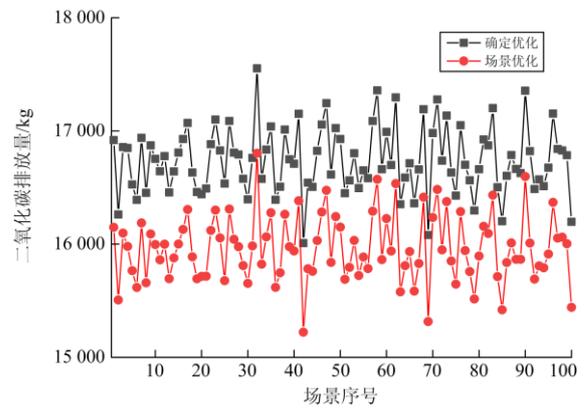


图 15 不同场景下的二氧化碳排量

Fig. 15 CO<sub>2</sub> emissions for each scenario

#### 4.7 PFS 指标有效性检验

为验证 PFS 指标的有效性, 首先, 分别设置聚类数目为 2~10, 对图 3 所示的场景集进行聚类, 得到各聚类数目下的典型场景及其概率。其次, 根据第 3 节所述, 求解各聚类数目下的优化运行方案, 优化求解时间如表 3 所示。最后, 计算各优化运行方案在 4.6 节生成的 100 组随机场景下的运行费用和二氧化碳排放量, 与确定性优化方案相比两者的下降率如表 3 所示。

表 3 不同聚类数目下所得优化运行方案的求解时间、运行费用与二氧化碳排放量下降率

Table 3 Calculation time, operating cost and CO<sub>2</sub> emission reduction rate of the optimized operation plan obtained under different cluster numbers

k	优化模型	运行费用	二氧化碳排放量
	求解时间/s	下降率/%	下降率/%
2	5.43	0.05	1.16
3	5.96	0.11	1.99
4	6.72	0.15	2.67
5	7.64	0.21	3.25
6	8.40	0.25	3.68
7	9.09	0.28	4.05
8	10.47	0.31	4.85
9	15.05	0.33	5.22
10	21.40	0.34	5.39

从表 3 中可以看出, 随着聚类数目的增加, 优化模型的求解时间、运行费用下降率以及二氧化碳排放量下降率均在增加。这说明了聚类数目越多, 模型所得优化方案应对不确定性的能力越强, 但同时模型的求解难度也在增大。具体来看, 随着聚类数目的增加, 求解时间增加的幅度越来越大, 而运行费用与二氧化碳下降率的增速则在放缓。将下降

率之和与求解时间相除作为评判指标,可以得到,聚类数目为 8 时该比值最大,这正是由 PFS 指标确定的最佳聚类数目。

综上,应用 PFS 指标确定最佳聚类数目可以找到模型应对源荷不确定性的能力与计算时间之间的平衡点,尤其是当该模型应用到调度时间尺度更小,调度时段更多的场合时,PFS 指标将发挥更为显著的作用。

## 5 结论

本文对一含有光伏与储能装置的 CCHP 型微网进行了研究,建立了多目标优化运行模型。针对光伏出力与冷、热、电负荷的不确定性,提出了基于误差场景整体生成与缩减的典型场景获得方法,并引入 PFS 指标用于确定最佳场景缩减数目。仿真算例表明本文所提优化方法在应对源荷的不确定性上具有较好的效果,PFS 指标有助于找到模型应对源荷不确定性的能力与计算时间的平衡点,提高了模型的计算效率。

## 参考文献

- [1] WANG J, ZHONG H, XIA Q, et al. Optimal joint-dispatch of energy and reserve for CCHP-based microgrids[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(3): 785-794.
- [2] 胡荣, 马杰, 李振坤, 等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适用性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 418-425. HU Rong, MA Jie, LI Zhenkun, et al. Optimal allocation and applicability analysis of distributed combined cooling-heating-power system[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 418-425.
- [3] FENG L, DAI X, MO J, et al. Analysis of energy matching performance between CCHP systems and users based on different operation strategies[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182: 60-71.
- [4] 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.
- [5] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52-61. ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52-61.
- [6] 谭碧飞, 陈皓勇, 梁子鹏, 等. 基于 CoPSO-BAS 的冷热电联供型微网经济调度[J]. 广东电力, 2019, 32(9): 85-93. TAN Bifei, CHEN Haoyong, LIANG Zipeng, et al. Economic dispatch of cchp micro-grid based on CoPSO-BAS[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(9): 85-93.
- [7] 朱翰超, 马蕊. 考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 139-146. ZHU Hanchao, MA Rui. Optimal configuration method of CCHP microgrid considering demand side management[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 139-146.
- [8] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33. WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33.
- [9] LUO Z, GU W, WU Z, et al. A robust optimization method for energy management of CCHP microgrid[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1): 132-144.
- [10] 杨永标, 于建成, 李奕杰, 等. 含光伏和蓄能的冷热电联供系统调峰调蓄优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 6-12. YANG Yongbiao, YU Jiancheng, LI Yijie, et al. Optimal load leveling dispatch of CCHP incorporating photovoltaic and storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 6-12.
- [11] 吴鸣, 骆钊, 季宇, 等. 基于模型预测控制的冷热电联供型微网动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7174-7184. WU Ming, LUO Zhao, JI Yu, et al. Optimal dynamic dispatch for combined cooling heating and power microgrid based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7174-7184.
- [12] PAPPALA V S, ERLICH I, ROHRIG K, et al. A stochastic model for the optimal operation of a wind-thermal power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 940-950.
- [13] DI S M, GRADITI G, HEYDARIAN F E, et al. Stochastic optimal scheduling of distributed energy resources with renewables considering economic and environmental aspects[J]. Renewable Energy, 2018, 116(1): 272-287.
- [14] 杨明, 罗隆福. 计及风电与负荷不确定性的电力系统

- 无功随机优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 134-141.
- YANG Ming, LUO Longfu. Stochastic optimal reactive power dispatch in a power system considering wind power and load uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 134-141.
- [15] A M S, B M E, A N M. Stochastic multi-objective energy management in residential microgrids with combined cooling, heating, and power units considering battery energy storage systems and plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 301-317.
- [16] MAKAROV Y V, LOUTAN C, MA J, et al. Operational impacts of wind generation on california power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 1039-1050.
- [17] WEI D, CHEN A, SUN B, et al. Multi-objective optimal operation and energy coupling analysis of combined cooling and heating system[J]. Energy, 2016, 98(1): 296-307.
- [18] LIU S, ZHOU C, GUO H, et al. Operational optimization of a building-level integrated energy system considering additional potential benefits of energy storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 55-64. DOI: 10.1186/s41601-021-00184-0.
- [19] CAO Y, WANG Q, DU J, et al. Optimal operation of CCHP and renewable generation-based energy hub considering environmental perspective: an epsilon constraint and fuzzy methods[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2019, 20(1): 100274-100288.
- [20] DOLATABADI A, JADIDBONAB M, MOHAMMADI-IVATLOO B. Short-term scheduling strategy for wind-based energy hub: a hybrid stochastic/IGDT approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 438-448.
- [21] 马燕峰, 范振亚, 刘伟东, 等. 考虑碳权交易和风荷预测误差随机性的环境经济调度[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 412-418.
- MA Yanfeng, FAN Zhenya, LIU Weidong, et al. Environmental and economic dispatch considering carbon trading credit and randomness of wind power and load forecast error[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 412-418.
- [22] 高亚静, 李瑞环, 梁海峰, 等. 考虑间歇性电源与负荷不确定性情况下基于多场景技术的主动配电系统两步优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1657-1665.
- GAO Yajing, LI Ruihuan, LIANG Haifeng, et al. Two step optimal dispatch based on multiple scenarios technique considering uncertainties of intermittent distributed generations and loads in the active distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1657-1665.
- [23] 刘文远, 李建飞, 王宝文, 等. 基于伪 F 统计 FAMC 算法的基因表达数据分析[J]. 计算机科学, 2009, 36(3): 153-155.
- LIU Wenyuan, LI Jianfei, WANG Baowen, et al. Gene expression data analysis of FAMC algorithm based on pseudo F-statistics[J]. Computer Science, 2009, 36(3): 153-155.
- [24] VOGEL M A, WONG A K C. PFS clustering method[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1979, 1(3): 237-245.
- [25] MILLIGAN G, COOPER M. An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set[J]. Psychometrika, 1985, 50(2): 159-179.
- [26] LI H, ZHANG Q. Multiobjective optimization problems with complicated Pareto sets, MOEA/D and NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(2): 284-302.
- [27] ZHANG Q, LI H. MOEA/D: a multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(6): 712-731.
- [28] WANG J, JING Y, ZHANG C, et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2263-2278.

收稿日期: 2020-11-06; 修回日期: 2021-03-06

作者简介:

张靠社(1965—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为微电网优化调度; E-mail: zhangks@263.net

张刚(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为微电网优化调度。E-mail: zhanggang3463003@163.com

(编辑 魏小丽)