

# 计及等排性能系数的冷热电多联供 环境经济调度

冉晓洪<sup>1</sup>,周任军<sup>1</sup>,李湘华<sup>2</sup>,张斌<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院 “可再生能源电力技术”湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114;

2. 湖南省电力公司,湖南 长沙 410007)

**摘要:** 在供热当量基础上,从无能量品位的污染排放角度提出等排性能系数,以作为克服能量品位的热(冷)能与电能转化的依据,并构建其数学指标。为研究等排性能系数对系统运行经济性的影响,建立包括发电成本与环境成本的冷热电多联供(CCHP)系统的多目标优化调度模型,运用隶属函数将其转化为单目标模型,并利用非线性规划方法求解。仿真结果表明,等排性能系数能准确反映能量等值转化随供能生产状态的变化及不同生产供能状态下 CCHP 系统的实时能耗成本。

**关键词:** 冷热电多联供; 等排性能系数; 节能减排; 能量品位; 环境经济调度; 模型; 优化

**中图分类号:** TM 73

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.017

## 0 引言

冷热电多联供 CCHP(Combined Cool, Heat and Power)实质是按照能量品位高低对能量实行对口梯级利用,其品位随着能量梯级利用而逐级下降<sup>[1]</sup>。文献[2-3]在热力学基本原理基础上,结合不同能量转换过程中能量梯级利用的本质特征,提出了能量梯级利用率的新准则。文献[4]提出了能量梯级利用率的评价准则,该准则从发电、制冷及供热等过程来权衡不同能量转换利用过程的本质差异,并利用实际热电联产系统对该准则进行了分析。为了减少能量梯级利用过程中低品位能量的浪费,文献[5]阐述了利用先进技术将低品位的热能转化为电能,从而充分利用低品位能量。目前能量品味相关的文献基本是从能量品味本身研究能量梯级利用以及节能优势,很少涉及克服能量品位研究能量等值转化关系。

为了克服能量品味给能量等值转化带来的困难,需从无能量品味的污染排放角度出发,研究能量转化随生产供能状态变化的转化关系。CCHP 系统的污染排放在国内有一定研究,文献[6]考虑到微网中热能供应的不确定性,优化模型仅考虑了环境保护效益,没有涉及热能供应。文献[7]提出了一种微电网热电联合调度的优化模型,该模型以系统总运行费用最小为目标函数,同时把微电网和大电网连接点处的功率波动引入目标函数,使得在系统

总成本最小的同时减小风电出力波动性对电网的影响。文献[8]提出了一种以能耗与污染物排放最少为目标的发电侧节能减排新模式,通过可变成本排序和污染物排放量排序确定机组上网电量,以达到节能减排的目的。文献[9]从协调运行的角度讨论了互联区域的发电调度策略,将发电成本最小和污染气体排放最小同时作为目标函数,提出一种新的分区设置多目标权系数的方案。考虑大规模风电入网,构建含风电机组的电力系统环境经济调度静态随机优化模型,以尽可能实现系统总污染排放量最少化和运行成本最低化的综合优化目标<sup>[10]</sup>。以上文献基本是兼顾发电成本和环境效益成本最小的经济调度,对 CCHP 系统的环境经济调度也是仅将污染气体排放成本作为优化目标之一。

文献[11]已明确定义能量品位(单位能量所具有可用能的比例,即能量在某种状态下经过可逆过程变化到环境基态时火用的变化量与能量变化量的比值)与温度和压力有关,并可通过热电比反映系统的生产供能状态。因此,为了研究具有能量品味差异的 CCHP 系统在不同供能状态下的能量转化关系,以供热当量为基础,提出等排性能系数作为能量等值转化依据,并建立 CCHP 系统环境调度新模型,进一步研究等排性能系数对实时能耗成本以及调度的影响。由于将具有能量品味的热(冷)能与电能转化为无能量品味的污染排放,所以模型中没有涉及能量品味,虽然用户的多余电力利用储能装置存储,但模型暂时不计入储能成本。

## 1 热(冷)能与电能转化

### 1.1 转化关系

电能和热(冷)能属于二次能源,其传统转化关

收稿日期:2012-05-03;修回日期:2013-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277016);湖南省高校创新平台开放基金项目(12K074);湖南省研究生创新项目(CX-2011B359)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277016),the Innovation Platform Open Funds for Universities in Hunan Province(12K074) and Hunan Provincial Graduate Student Innovation Program(CX2011B359)

系是通过供热当量转化进行折算的,如图 1 所示。



图 1 热(冷)电转化关系

Fig.1 Conversion between heat/cool and power

自然界的能量不仅在数量上具有守恒性,而且在质量上具有品位性。这使得热(冷)能与电能转化和传递过程中存在着品位的差异,使得它们之间的转化关系不能完全按照数量相等进行,即电能或者机械能可以全部转化为热(冷)能,但热(冷)能却只能部分转化为机械能或者电能,即能量转化不等价可逆。

为进一步揭示机组的能耗本质及计算的简便,准确量化热(冷)能与电能转化关系是相当必要的。随着国家政策对环保及能源利用率的重视,并且考虑到供热当量转化未能完全表达能量直接等价转化不可逆的缺陷,需要提出新方法描述热(冷)能与电能的等值转化关系。

### 1.2 转化关系分类

目前,二次能源折算成标准煤有当量值和等价值 2 种方法。其中当量值系数是固定不变的,但随着能源转化效率的提高,电力折算成标准煤的等价值系数却会逐渐下降。

## 2 等排性能系数

### 2.1 基本定义

等排性能系数是在传统供热当量转化基础上从污染排放角度着手,通过机组生产不同二次能源(电能和热(冷)能)产生相同污染排放消耗一次能源的多少,研究不同二次能源之间的转化关系。

若将冷热电多联供机组生产的电能和热(冷)能视为商品使用价值,由马克思主义的商品价值理论可知,等排性能系数就相当于交换价值,能量品位性的高低相当于价值的大小,如图 2 所示。

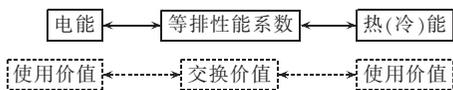


图 2 等排性能系数概念类比

Fig.2 Conceptual analogy of equal emission performance coefficient

### 2.2 与供热当量的关系

等排性能系数(等价值)与供热当量(当量值)从能量守恒角度是一致的,但从能量转化角度却有区别。因为热(冷)能是可部分转化能量,电能作为可全部转化能量,正是能量品位的高低给能量等值转化带来了困难。传统热(冷)能与电能的转化是通过供热当量实现,且在不同供能状态下供热当量系数是一常数,而等排性能系数是通过没有能量品位差

异的污染排放实现,但是其能量的等值转化与生产供能状态(温度和压力等)有关,等排性能系数关系如图 3 所示。

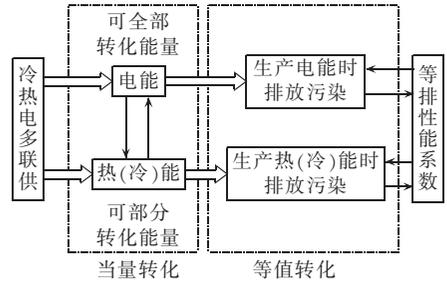


图 3 等排性能系数示意图

Fig.3 Schematic diagram of equal emission performance coefficient

### 2.3 等排性能系数

由供热当量系数计算方法<sup>[12]</sup>可知,设第  $i$  个冷热电多联供机组的供电量为  $W_n(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,供热(冷)量为  $Q_h(\text{MJ}\cdot\text{h})$ 时,产生的总污染排放量为  $m_i(\text{g})$ ,而由供电和供热(冷)产生的污染物排放量分别为  $m'_i(\text{g})$ 和  $m''_i(\text{g})$ ,并满足  $m'_i+m''_i=m_i$ 。

供电污染物的排放强度  $e_{j,i}(\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$ 为:

$$e_{j,i} = \frac{m_i}{W_n + S_{\text{EERC}}} = \frac{m_i}{W_{\text{EERC}}} \quad (1)$$

供热(冷)污染物的排放强度  $e'_{j,i}(\text{g}/(\text{MJ}\cdot\text{h}))$ 为:

$$e'_{j,i} = m_i \frac{S_{\text{EERC}}}{W_{\text{EERC}}} / Q_h \quad (2)$$

由式(1)有:

$$\frac{m_i}{W_{\text{EERC}}} = \frac{m'_i}{W_n} \quad (3)$$

由式(2)有:

$$m_i \frac{S_{\text{EERC}}}{W_{\text{EERC}}} / Q_h = \frac{m''_i}{Q_h} \quad (4)$$

则等排性能系数  $\lambda$  为:

$$\lambda = \frac{m'_i}{m''_i} = \frac{m_i W_n}{W_n + S_{\text{EERC}}} \frac{W_{\text{EERC}}}{m_i S_{\text{EERC}}} = \frac{W_n}{S_{\text{EERC}}} \quad (5)$$

根据等排性能系数的模型,可得出等排性能系数与供热当量系数关系为:

$$\lambda = \frac{W_n}{S_{\text{EERC}}} = \frac{Q_h}{S_{\text{EERC}}} \frac{W_n}{Q_h} = \rho \frac{W_n}{Q_h} \quad (6)$$

其中,  $S_{\text{EERC}}(\text{kW}\cdot\text{h})$ 为供热(冷) $Q_h$ 当量电量消耗。

## 3 计及等排性能系数环境经济调度

### 3.1 发电成本

电源包括仅发电、仅供热和冷热电多联供 3 种,其各自燃料成本不同,运行成本也有差异。

#### 3.1.1 燃料成本

a. 仅发电的燃料成本:

$$C_i(P_i(t)) = \alpha_i + \beta_i P_i(t) + \gamma_i P_i^2(t) \quad i = 1, 2, \dots, N_p \quad (7)$$

b. 仅供热(冷)的燃料成本:

$$C_k(H_k(t)) = \alpha_k + \delta_k H_k(t) + \theta_k H_k^2(t) \quad k=1, 2, \dots, N_h \quad (8)$$

c. 冷热电多联供的燃料成本:

$$C_j(P_j(t), H_j(t)) = \alpha_j + \beta_j P_j(t) + \gamma_j P_j^2(t) + \delta_j H_j(t) + \theta_j H_j^2(t) + \varepsilon_j P_j(t) H_j(t) \quad j=1, 2, \dots, N_c \quad (9)$$

则调度周期内所有机组的燃料成本模型为:

$$f_{11} = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{i=1}^{N_p} C_i(P_i(t)) + \sum_{j=1}^{N_c} C_j(P_j(t), H_j(t)) + \sum_{k=1}^{N_h} C_k(H_k(t)) \right] \quad (10)$$

其中,  $C_i(P_i(t))$  为电功率为  $P_i$  时第  $i$  个仅发电燃料成本,  $C_k(H_k(t))$  为热(冷)功率达到  $H_k$  时第  $k$  个仅发电(冷)的燃料成本,  $C_j(P_j(t), H_j(t))$  为电、热(冷)功率分别达到  $P_j, H_j$  时第  $j$  个冷热电多联供燃料成本,  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \theta, \varepsilon$  为燃料成本模型的系数,  $N_p, N_c, N_h$  分别为仅发电、冷热电多联供和仅供热(冷)发电电源的数量,  $T$  为调度周期总时段数。

### 3.1.2 计及等排性能系数的管理运行成本

电厂除燃料成本外,还包括人员管理、机组启停等,可用功率运行成本<sup>[13]</sup>定量描述。

则计及等排性能系数的运行成本模型为:

$$f_{12} = K_{OM} \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_p} P_i(t) + \sum_{j=1}^{N_c} [P_j(t) + H_j(t)/\lambda] + \sum_{k=1}^{N_h} H_k(t)/\lambda \right\} \quad (11)$$

其中,  $K_{OM}$  为功率运行常数。

则冷热电多联供的发电成本模型为:

$$f_1 = f_{11} + f_{12} \quad (12)$$

## 3.2 计及等排性能系数的环境成本

### 3.2.1 污染气体排放

可得仅发电的  $\text{CO}_2$  排放模型为:

$$F_{\text{CO}_2,i}(P_t) = (a_{c,i} + b_{c,i} P_t + c_{c,i} P_t^2) \quad (\text{t/h}) \quad (13)$$

由等排性能系数可得冷热电多联供和仅供热(冷)的  $\text{CO}_2$  排放  $F'_{\text{CO}_2,i}(P_t)$  和  $F''_{\text{CO}_2,i}(P_t)$  模型分别为:

$$F'_{\text{CO}_2,i}(P_t) = (1 + 1/\lambda) (a_{c,i} + b_{c,i} P_t + c_{c,i} P_t^2) \quad (\text{t/h}) \quad (14)$$

$$F''_{\text{CO}_2,i}(P_t) = (a_{c,i} + b_{c,i} P_t + c_{c,i} P_t^2) / \lambda \quad (\text{t/h}) \quad (15)$$

污染排放包括  $\text{CO}_2, \text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ , 其中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的排放模型与  $\text{CO}_2$  相同,但其系数各异。

### 3.2.2 环境成本模型

环境成本主要包括消耗的环境资源和由于排放污染物所受到的罚款<sup>[14]</sup>。

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_p} [F_{\text{CO}_2,i}(P_t) V_{\text{CO}_2} + F_{\text{SO}_2,i}(P_t) V_{\text{SO}_2} + F_{\text{NO}_x,i}(P_t) V_{\text{NO}_x}] + \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \sum_{j=1}^{N_c} [F_{\text{CO}_2,j}(P_t) V_{\text{CO}_2} + F_{\text{SO}_2,j}(P_t) V_{\text{SO}_2} + F_{\text{NO}_x,j}(P_t) V_{\text{NO}_x}] + \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^{N_h} [F_{\text{CO}_2,k}(P_t) V_{\text{CO}_2} + F_{\text{SO}_2,k}(P_t) V_{\text{SO}_2} + F_{\text{NO}_x,k}(P_t) V_{\text{NO}_x}] \right\} \quad (16)$$

其中,  $V_{\text{CO}_2}, V_{\text{SO}_2}, V_{\text{NO}_x}$  分别为  $\text{CO}_2, \text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的环境价值价格和由于排污受到的罚款价格之和( $\$/\text{t}$ )<sup>[12]</sup>。模型前半部分表示仅发电和冷热电多联供机组供电部分的环境成本,后半部分表示仅供热(冷)和冷热电多联供机组供热(冷)的环境成本。

## 3.3 多目标优化模型

### 3.3.1 目标函数

$$\min(f_1, f_2) \quad (17)$$

其中,  $f_1, f_2$  分别为冷热电多联供系统的发电成本和环境成本。

### 3.3.2 约束条件

a. 功率平衡约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_p} P_{it} + \sum_{j=1}^{N_c} P_{jt} = P_{Dt} \\ \sum_{i=1}^{N_p} H_{it} + \sum_{j=1}^{N_h} H_{jt} = H_{Dt} \end{cases} \quad (18)$$

b. 出力约束:

$$\begin{cases} P_{it}^{\min} \leq P_{it} \leq P_{it}^{\max} & i=1, 2, \dots, N_p \\ P_{jt}^{\min}(H_j) \leq P_{jt} \leq P_{jt}^{\max}(H_j) & j=1, 2, \dots, N_c \\ H_{jt}^{\min}(P_j) \leq H_{jt} \leq H_{jt}^{\max}(P_j) & j=1, 2, \dots, N_c \\ H_{kt}^{\min} \leq H_{kt} \leq H_{kt}^{\max} & k=1, 2, \dots, N_h \end{cases} \quad (19)$$

c. 气体排放约束:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N F_{\text{CO}_2,i}(P_t) \leq F_{\text{CO}_2z} & i=1, 2, \dots, N \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N F_{\text{NO}_x,i}(P_t) \leq F_{\text{NO}_xz} & i=1, 2, \dots, N \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N F_{\text{SO}_2,i}(P_t) \leq F_{\text{SO}_2z} & i=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (20)$$

d. 机组爬坡约束:

$$\begin{cases} \xi_{1\text{down},i,t} \leq P_{it} - P_{i(t-1)} \leq \xi_{1\text{up},i,t} & i=1, 2, \dots, N_p \\ \xi_{2\text{down},j,t} \leq P_{jt} - P_{j(t-1)} \leq \xi_{2\text{up},j,t} & j=1, 2, \dots, N_c \\ \xi_{3\text{down},j,t} \leq H_{jt} - H_{j(t-1)} \leq \xi_{3\text{up},j,t} & j=1, 2, \dots, N_c \\ \xi_{4\text{down},k,t} \leq H_{kt} - H_{k(t-1)} \leq \xi_{4\text{up},k,t} & k=1, 2, \dots, N_h \end{cases} \quad (21)$$

其中,  $P_{it}$  与  $P_{jt}$  分别为第  $i$  台仅供电机组与第  $j$  台冷热电联供机组在  $t$  时刻的电功率输出;  $H_{it}$  与  $H_{jt}$  分别为第  $i$  台仅供热机组与第  $j$  台冷热电联供机组在  $t$  时刻的热能输出;  $P_{Dt}$  与  $H_{Dt}$  分别为  $t$  时刻系统对电能与热能的需求;  $P_{jt}^{\min}(H_j)$  与  $P_{jt}^{\max}(H_j)$  分别为冷热电联供机组在供热为  $H_j$  时电功率的最小与最大值;  $H_{jt}^{\min}(P_j)$  与  $H_{jt}^{\max}(P_j)$  为冷热电联供机组在供电为  $P_j$  时热能的最小与最大值;  $N$  为所有电源的个数;  $F_{\text{CO}_2z}, F_{\text{NO}_xz}$  和  $F_{\text{SO}_2z}$  为所有电源各种污染物的排放总量(t);  $\xi_{1\text{down},i,t}$  与  $\xi_{1\text{up},i,t}$  分别为各台机组的爬坡速度的下限和上限约束,其他类似。

### 3.4 目标函数的模糊化处理

a. 首先求解发电成本和环境成本目标函数值

$C_{01}$  和  $C_{02}$  以及各单目标优化时对应的其他目标函数值,发电成本最小时对应的环境成本为  $C'_{02}$ ,环境成本最小时对应的发电成本为  $C'_{01}$ 。

b. 定义隶属函数,将各单目标函数模糊化。其中成本伸缩原则为:

$$\delta_{01} \leq \max \{ C'_{01}, C''_{01} \} - C_{01}$$

$$\delta_{02} \leq \max \{ C'_{02}, C''_{02} \} - C_{02}$$

其中,  $\delta_{01}, \delta_{02}$  分别为发电成本与环境成本的最大耗量节约。文中采用降半直线形作为 2 个目标函数的隶属函数<sup>[15-16]</sup>,如图 4 所示。

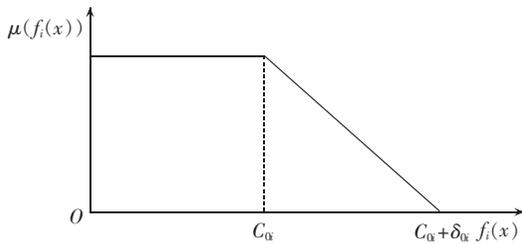


图 4 优化目标对应的隶属度函数

Fig.4 Membership function corresponding optimal objective

$$\mu(f_i(x)) = \begin{cases} 1 & f_i(x) \leq C_{0i} \\ \frac{C_{0i} + \delta_{0i} - f_i(x)}{\delta_{0i}} & C_{0i} < f_i(x) \leq C_{0i} + \delta_{0i} \\ 0 & f_i(x) > C_{0i} + \delta_{0i} \end{cases} \quad (22)$$

其中,  $C_{0i}$  为以第  $i$  个目标函数最小时的目标函数值,  $C_{0i} + \delta_{0i}$  为第  $i$  个目标函数值可接受的最大延伸区间,  $\delta_{0i}$  的选取应结合各专家对各单一目标的认识和倾向性。

c. 采用最大隶属度原理将多目标问题转化为下述单目标非线性优化问题:

$$\min f_4(x) = -\mu \quad (23)$$

$$\text{s.t. } f_1(x) + \delta_{01}\mu - \max \{ C'_{01}, C''_{01} \} \leq 0 \quad (24)$$

$$f_2(x) + \delta_{02}\mu - \max \{ C'_{02}, C''_{02} \} \leq 0 \quad (25)$$

$$0 \leq \mu \leq 1 \quad (26)$$

约束条件还包括式(18)——(21)。

d. 求解步骤 c 构造的单目标优化模型,从而得到模型的最优解。

### 4 算例仿真及结果分析

#### 4.1 算例及参数

采用某医院负荷进行分析,其中热负荷包括采暖负荷、热水负荷和制冷负荷,系统基本参数<sup>[12,17-18]</sup>中的污染气体排放系数见表 1,其中  $a_{c,i}, b_{c,i}, c_{c,i}, a_{s,i}, b_{s,i}, c_{s,i}, a_{n,i}, b_{n,i}, c_{n,i}$  分别为  $\text{CO}_2, \text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的排放系数。

#### 4.2 计算结果

等排性能系数与供热当量系数关系如图 5 所示,表 2 为多目标模糊优化与单目标优化结果,图 6

表 1 污染气体排放参数

Tab.1 Parameters of pollution emission

发电机	$a_{c,i}$	$b_{c,i}$	$c_{c,i}$	$a_{s,i}$	$b_{s,i}$	$c_{s,i}$	$a_{n,i}$	$b_{n,i}$	$c_{n,i}$
1	0.1432	-0.1951	0.2291	0.012	-0.017	0.019	0.040	-0.055	0.065
2	0.0895	-0.2117	0.1996	0.007	-0.019	0.017	0.025	-0.061	0.056
3	0.1516	-0.1803	0.1614	0.013	-0.016	0.015	0.043	-0.051	0.046
4	0.1811	-0.1220	0.1217	0.017	-0.011	0.011	0.053	-0.036	0.034
5	0.1490	-0.1850	-0.1594	0.013	-0.016	0.015	0.043	-0.051	0.046
6	0.2080	-0.1980	0.1751	0.020	-0.019	0.018	0.061	-0.056	0.052
7	0.1810	-0.1980	0.1809	0.016	-0.021	0.019	0.050	-0.060	0.057

为多目标模糊优化成本变化,表 3 给出了等排性能系数的引入对成本造成的影响,表中“↑”表示升高了,“↓”表示下降了。

由表 2 可知,在满足所有约束条件下,与多目标模糊决策优化相比较,单纯以发电成本最小为目标

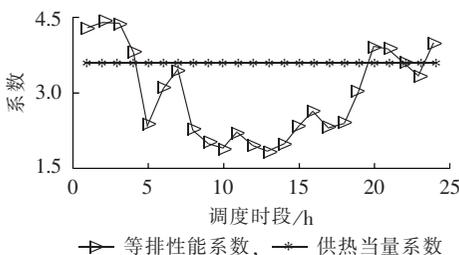


图 5 等排性能系数与供热当量系数关系

Fig.5 Relationship between equal emission performance coefficient and heating equivalent

表 2 多目标模糊优化与单目标优化结果

Tab.2 Results by multi-objective optimization and single-objective optimization

优化目标	参数	$f_1/\$$	$f_2/\$$	$(f_1+f_2)/\$$
多目标模糊优化	目标函数值	695830.479	557.221	696387.7
发电成本最小	目标函数值	651390.27	769.054	652159.32
	模糊优化对比	↓6.39%	↑38.01%	↓6.35%
环境成本最小	目标函数值	699125.2	522.338	699647.54
	模糊优化对比	↑0.047%	↓6.26%	↑0.046%

时,环境成本有所增加,因为用户多余电力可利用储能装置存储。单纯以环境成本最小为目标时,发电成本也会减少,因为用户不足的电力可向主网购买。综上,与单目标优化比较可知,多目标模糊优化能达到更为综合满意的结果。

由图 5 可知,在不同供能状态下,供热当量性能

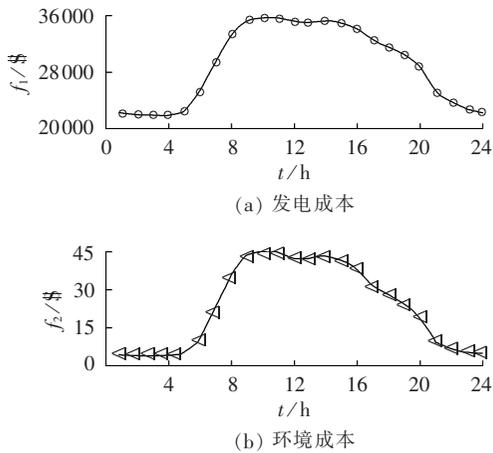


图 6 多目标模糊优化机组的成本曲线

Fig.6 Cost curves of unit with multi-objective fuzzy optimization

表 3 等排性能系数与供热当量系数成本的对比分析

Tab.3 Comparison of cost between equal emission performance coefficient and heating equivalent coefficient

优化目标	参数	$f_1/\$$	$f_2/\$$	$(f_1+f_2)/\$$
发电成本最小	等排性能系数	651390.27	769.054	652159.32
	供热当量系数	651398.60	769.06	652167.66
	变化情况	↓0.0013%	↓0.0008%	↓0.00128%
环境成本最小	等排性能系数	699125.20	522.338	699647.54
	供热当量系数	699105.57	522.437	699628.01
	变化情况	↑0.0028%	↓0.0189%	↑0.0027%
多目标模糊优化	等排性能系数	695830.479	557.221	696387.70
	供热当量系数	695829.745	555.100	696384.85
	变化情况	↑0.0001%	↑0.3821%	↑0.0004%

系数为一常数。然而冷热电多联供系统提供的不同能量具有品位的差异,并与能量的生产供能的状态(温度和压力)有关,从而得到动态变化的等排性能系数。

由表 3 可知,若以发电成本最小为目标,采用等排性能系数后发电成本和环境成本要比采用供热当量时小,因为等排性能系数不断变化,且大部分时段都要比供热当量性能系数要小。多目标模糊优化时,采用等排性能系数的总发电成本与采用供热当量的几乎相等,但总的环境成本却略偏高,因为在不同供电与供热(冷)状态下,系统提供不同能量时能耗不可能一样,而与系统此时的供能状态有关,所以等排性能系数能更详细反映各时刻发电成本和环境成本的变化。

在现代电力系统中,随着多种随机性因素对系统的影响,加之不同生产供能状态其能量之间的转化各异以及微网中设备启停的状态变化较快,故系统调度部门在前一天做好的 24 h 计划不完全精确。在此情况下,对系统备用容量以及机组调峰调频能力要求更高,故针对含有微电网的系统则需要增加

小容量的储能蓄热装置,以提高系统的备用容量,填补由于调度计划不完全精确所产生的差额。

## 5 结论

a. 在供热当量基础上,从污染排放角度提出了等排性能系数,进一步深化了供热当量转化关系。等排性能系数的提出不仅能更精确反映能量等值转化关系随生产供能状态的变化而不同,而且对 CCHP 系统在供应不同能量时所消耗的各种成本计算带来了方便。

b. 为了研究等排性能系数潜在特性,建立了 CCHP 系统环境经济调度模型。计算结果表明,该模型与方法不仅对环境经济调度与节能减排有重要意义,为不同供能状态下系统的实时能耗成本计算带来方便,还能定量反映环境效益,更准确地计算在不同供能状态下系统所消耗的实时发电成本与环境成本以及相应变化。

## 参考文献:

- [1] 王锐,顾伟,吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化,2011,35(8):22-23.  
WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 22-23.
- [2] 林汝谋,金红光,蔡睿贤. 燃气轮机总能系统及其能的梯级利用原理[J]. 燃气轮机技术,2008,21(1):2-10.  
LIN Rumou, JIN Hongguang, CAI Ruixian. Integrated energy system of gas turbine and cascade utilization of thermal energy[J]. Gas Turbine Technology, 2008, 21(1): 2-10.
- [3] 林汝谋,郭栋,金红光,等. 分布式冷热电联产系统的能量梯级利用率新准则[J]. 燃气轮机技术,2010,23(1):3-4.  
LIN Rumou, GUO Dong, JIN Hongguang, et al. A new evaluation criterion of distributed energy systems for CCHP the energy cascade utilization efficiency[J]. Gas Turbine Technology, 2010, 23(1): 3-4.
- [4] ZHANG Na, CAI Ruixian. Analytical solutions and part-load performances of single shaft gas turbine and its cogeneration[J]. Analytical Conversion and Management, 2002, 43: 1328-1336.
- [5] BERTRAND F T, LAMBRINOS G, FRANGOUDAKIS A, et al. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles—a review of various applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(8): 3963-3979.
- [6] 杨佩佩,艾欣,崔明勇,等. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析[J]. 电网技术,2009,33(20):39-40.  
YANG Peipei, AI Xin, CUI Mingyong, et al. Particle swarm optimization based economic operation analysis of microgrid containing multi energy supply system[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 39-40.
- [7] XU Lizhong, YANG Guangya, XU Zhao, et al. Combined scheduling of electricity and heat in a microgrid with volatile wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 53-60.
- [8] 苗增强,谢宇翔,姚建刚,等. 兼顾能耗与排放的发电侧节能减排

- 调度新模式[J]. 电力系统自动化,2009,33(24):16-17.
- MIAO Zengqiang,XIE Yuxiang,YAO Jiangang,et al. A new energy saving and emission reducing dispatching mode considering energy consumption and emissions for generation market[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(24):16-17.
- [9] 喻洁,李扬,夏安邦. 兼顾环境保护与经济效益的发电调度分布式优化策略[J]. 中国电机工程学报,2009,29(16):63-64.
- YU Jie,LI Yang,XIA Anbang. Distributed optimization of generation dispatch schedule considering environmental protection and economic profits[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(16):63-64.
- [10] 孙惠娟,彭春华,易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):123-128.
- SUN Huijuan,PENG Chunhua,YI Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):123-128.
- [11] 戈志华,胡学伟,杨志平. 能量梯级利用在热电联产中的应用[J]. 华北电力大学学报,2010,37(1):66-67.
- GE Zhihua,HU Xuewei,YANG Zhiping. The application of energy step utilize in cogeneration[J]. Journal of North China Electric Power University,2010,37(1):66-67.
- [12] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):13-14.
- QIAN Kejun,YUAN Yue,SHI Xiaodan,et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(29):13-14.
- [13] MOHAMED F A,KOIVO H N. Online management of micro-grid with battery storage using multiobjective optimization[C]// International Conference on Power Engineering,Energy and Electrical Drives,2007. POWERENG 2007. Setubal,Portugal; [s.n.],2007:231-236.
- [14] 周任军,冉晓洪,毛发龙,等. 分布式冷热电三联供系统节能协调优化调度[J]. 电网技术,2012,36(6):8-14.
- ZHOU Renjun,RAN Xiaohong,MAO Falong,et al. Energy-saving coordinated optimal dispatch of distributed combined cool,heat and power supply[J]. Power System Technology,2012,36(6):8-14.
- [15] 胡国强,贺仁睦. 梯级水电站长期多目标模糊优化调度新模式[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):23-24.
- HU Guoqiang,HE Renmu. Long-term multi-objective fuzzy optimization scheduling model of cascaded hydroelectric stations[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(4):23-24.
- [16] 艾琳,华栋. 基于模糊优化和内点法的水火电力系统短期经济调度[J]. 电力自动化设备,2008,28(8):46-50.
- AI Lin,HUA Dong. Short term economic dispatch of hydro-thermal coordinated system based on fuzzy optimization and interior point method[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(8):46-50.
- [17] 何吉民. 天然气热电联产项目模拟分析及评价方法的研究[D]. 上海:上海交通大学,2006.
- HE Jimin. The research of simulation analysis and assessing method to the small-scale gas combined heat and power project[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2006.
- [18] WANG Lingfeng,SINGH Chanan. Stochastic combined heat and power dispatch based on multi-objective particle swarm optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2008,30(3):226-234.

#### 作者简介:

冉晓洪(1984-),男,重庆人,硕士研究生,主要从事电力系统运行与规划、新能源发电方面的研究(E-mail:ranxhcust@126.com);

周任军(1964-),女,山西太原人,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化、电网规划与运行、新能源接入系统、风险及条件风险、分布式电源规划(E-mail:zrj0731@163.com)。

## Environmental economic dispatch considering equal emission performance coefficient for CCHP

RAN Xiaohong<sup>1</sup>,ZHOU Renjun<sup>1</sup>,LI Xianghua<sup>2</sup>,ZHANG Bin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Power Technology of Renewable Energy Sources,School of Electrical and Information Engineering,Changsha University of Science and Technology,Changsha 410114,China;

2. Electric Power Company of Hunan,Changsha 410007,China)

**Abstract:** Based on the heat equivalent and from the perspective of pollution emission without energy grade, a coefficient of equal emission performance is proposed as the basis of energy conversion between heat/cool and electricity to overcome the energy grade, and its mathematical index is constructed. In order to study the effect of equal emission performance coefficient on economic operation of power system, a multi-objective optimization model, including generation cost, environmental cost and equal emission performance coefficient, is built for the dispatch of CCHP (Combined Cool, Heat and Power) supply system, which is then converted to a single-objective optimization model by the membership function and solved by the nonlinear planning method. Simulative result shows that, the equal emission performance coefficient can correctly reflect the variation of energy equivalent conversion along with the energy production state and the real-time energy consumption cost of CCHP under different energy production states.

**Key words:** combined cool, heat and power; equal emission performance coefficient; energy saving and emission reduction; energy grade; environmental economic dispatch; models; optimization