

# 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

王琪鑫<sup>1</sup>,刘涤尘<sup>1</sup>,吴军<sup>1</sup>,朱学栋<sup>1</sup>,罗金山<sup>1</sup>,陈懿<sup>1</sup>,  
陈炜<sup>1</sup>,赵红生<sup>2</sup>,孙勇<sup>3</sup>,蔡宏毅<sup>3</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院,湖北武汉 430072;2. 国网湖北省电力公司经济技术研究院,湖北武汉 430077;  
3. 国网吉林省电力公司,吉林长春 130000)

**摘要:**以多能协同综合能源系统的供暖用暖体系为研究对象,计及需求侧用户行为分析,提出综合供应侧与需求侧的优化方法。结合效用函数对需求侧用户用暖行为进行分析;根据不同能源的制暖特点建立供应侧经济性模型,根据不同能源的供暖机制建立需求侧经济性模型;以供应侧电厂运行效率最大、需求侧居民用电成本最低为目标进行双目标优化。将该优化方法在热电联产系统与电热气综合能源系统2种算例中进行分析并对比结果,证明了天然气系统的加入对综合能源系统具有协同优化作用,也验证了所提方法的有效性与可行性。

**关键词:**多能协同;综合能源系统;用户行为分析;供需综合优化;双目标优化

**中图分类号:** TM 761

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.024

## 0 引言

为有效利用清洁能源,提升能源供应的安全性及可持续发展能力,我国电力“十三五”规划将多元化能源协同高效利用提升到了相当重要的高度。为适应此发展趋势,充分考虑多种能源特性及其平衡与协同供应策略建立的多能协同系统<sup>[1]</sup>成为业内研究和关注的热点。现有针对多能协同综合能源系统优化的研究中,文献[2]提出优化生物质气化条件,进而提升经济评价与环境效益;文献[3]提出调节热电联产 CHP(Combined Heat and Power generation) 热电比与用广义弹性负荷参与响应,实现区域综合能源系统的高效经济运行;文献[4]以降低燃气锅炉配置容量、最小化热能传输损耗而降低运行费用为目的提出优化策略;文献[5]以电-气混联综合能源系统的投资运行成本与表征可靠性的能量短缺成本之和最小为规划目标提出优化方式。

现有研究主要关注多能协同能源系统供应侧的稳定性与经济性的优化,而未考虑需求侧与供应侧的双向作用。与此同时,未施行集中供暖的地区气象条件的不确定导致用户行为相对集中供暖地区更为复杂,因此在研究多能协同能源系统的供暖用暖过程中,考虑需求侧用户行为对供应侧的影响非常必要。

本文提出了一种综合考虑供需两侧的多能协同

能源系统的优化方法。在分析需求侧用户用暖行为上运用了效用函数方法;在供需两侧经济性建模上考虑了多能协同对供应侧进行经济性优化;在优化过程中以热电联产电厂运行效率最大、居民用暖用电成本最低为双目标,利用自适应罚函数与遗传算法进行优化。该方法在热电联产系统与电热气综合能源系统2种算例中实际优化运用,不仅证明了电热气综合能源系统相对热电联产系统的多能协同优越性,也验证了该优化方法的有效性与可行性。

## 1 多能协同系统供应侧用户行为分析

### 1.1 用户选择决策前提

讨论用户对供暖方式选择时可作以下假设。

(1)在冬季需要供暖的情况下,对于用户 $i$ ,存在一个最适温度 $A_i$ ,当气温高于 $A_i$ 时,用户 $i$ 的舒适度均相等且为最高。设舒适的温度带来的效用最高且为0,温度越低,效用越小且为负值。

(2)当用户 $i$ 不论选择何种方式供暖时,每种供暖方式都将房间加热到用户 $i$ 的最适温度 $A_i$ 。

(3)用户对暖气、天然气和空调3种供暖方式的感受不同<sup>[6]</sup>,在制热到相同温度 $A_i$ 下用户的舒适感也不同<sup>[7]</sup>,在此可设置参数 $x$ 表征供暖方式的舒适度系数,此系数通过调查得到。

### 1.2 特定用户的供暖决策效用函数

为确定所有用户的选择,应首先讨论特定用户的效用函数<sup>[8]</sup>,并且根据该效用函数得到此特定用户在某一温度下的供暖选择。

供暖决策带来的收益由气温和供暖费用所决定。因此用户 $i$ 每天的效用函数为:

收稿日期:2017-02-23;修回日期:2017-04-25

基金项目:国家科技支撑计划项目(消纳风电的热电联合优化规划及运行控制技术)(2015BAA01B01)

Project supported by the National Key Technology R&D Program(Joint Optimization and Operation Control Technology of Wind Power Consumptive Power Planning)(2015BAA01B01)

$$u_{i,D}=u_{i,D}(t_D,c_D) \quad (1)$$

其中,  $D$  指冬季的第  $D$  天;  $t_D$  为  $D$  日夜间温度;  $c_D$  为当天取暖所需费用。

对于整个冬天, 用户  $i$  的选择效用为:

$$U_i=\sum u_{i,D}(t_D,c_D) \quad (2)$$

由于低温对特定用户影响条件给定, 式(2)即:

$$u_{i,D}=f_{i,D}(t_D)+g_{i,D}(c_D) \quad (3)$$

其中,  $f_{i,D}(t_D)$  为温度带来的效用函数:

$$f_{i,D}(t_D)=\begin{cases} 0 & t_D>A_i \\ 1-a_i^{A_i-t_D} & t_D\leq A_i \text{ 且不供暖} \\ m & t_D\leq A_i \text{ 且供暖} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $a_i$  为对用户  $i$  而言低温对其用户感受降低的幅度;  $m$  为在供暖情况下温度达到用户  $i$  最适温度时增加的效用。由于温度相同时任何供暖方式的舒适度都低于等温自然条件下的舒适度, 故  $m$  取  $(-\infty, 0)$  中的一组值。

供暖价格函数由当日气温与供暖途径共同决定, 对应空调、天然气、暖气 3 种供暖方式的价格函数  $g_{ai,D}(c_D)$ 、 $g_{gi,D}(c_D)$ 、 $g_{hi,D}(c_D)$  可以写作:

$$g_{ai,D}(c_D)=\begin{cases} 0 & t_D>A_i \\ -b_i \ln c_{ad} & t_D\leq A_i \end{cases} \quad (5)$$

$$g_{gi,D}(c_D)=\begin{cases} 0 & t_D>A_i \\ -b_i \ln c_{gd} & t_D\leq A_i \end{cases} \quad (6)$$

$$g_{hi,D}(c_D)=-b_i \ln c_{hd} \quad (7)$$

其中,  $c_{ad}$ 、 $c_{gd}$ 、 $c_{hd}$  分别为用户使用空调、天然气与暖气制暖时等价至每个季度的价格;  $b_i$  为衡量用户  $i$  对价格的敏感度的指标之一。由此, 对于选择供暖的用户和选择不供暖的用户整个冬季的效用函数  $U_{in}$ 、 $U_{iy}$  可以分别简化为:

$$U_{in}=\sum_{t_D\leq A_i} f_{i,D}(t_D)=-\sum_{t_D\leq A_i} (a_i^{A_i-t_D}) \quad (8)$$

$$U_{iy}=\sum_{i\in\Omega_{ig}} (m+g_{i,D}(c_D)) \quad (9)$$

其中,  $\Omega_{ig}$  为采用供暖、供气和空调方式的集合。对于个体用户  $i$ , 将选取这几个负值效用中绝对值最小的一个为其选择策略。

### 1.3 不同供暖方式的用户选择比例

为直观展现用户选择不同供暖方式比例计算过程, 作不同供暖方式的用户选择比例示意图如图 1 所示。

首先, 在以温度  $T$  (单位  $^{\circ}\text{C}$ ) 为横坐标、效用为纵坐标的坐标系中作冬季气温的概率分布函数; 然后, 根据式(8)、(9)在同一坐标系下作出不同供暖方式的效用函数, 并得到它们的交点; 最后, 根据交点的横坐标将气温概率分布函数和横坐标围成的区域分为 I、II、III、IV 4 个部分。

图 1 中, 每个温度段取对效用函数中最高的曲线段, 可得个体最适温度  $A_i$ , 遍历所有温度  $t$  时的策

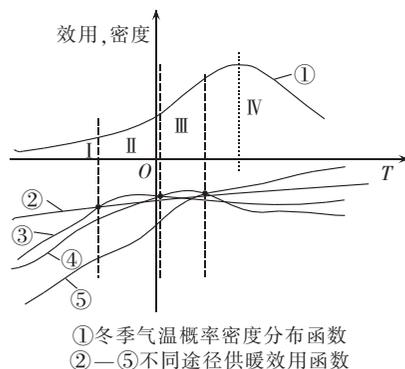


图 1 不同供暖方式的用户选择比例示意图  
Fig.1 Schematic diagram of household proportions for different heating modes

略选择。各区间面积比例即用户不选择供暖、选择天然气制暖、空调制暖和直接供暖的比例  $p_n$ 、 $p_g$ 、 $p_e$ 、 $p_h$ 。

## 2 供需两侧经济模型

### 2.1 多能协同优化负成本

电厂的高效发电运行状态大约处于满载发电的 70%~85%, 当发电量超过该范围时, 如图 2 阴影部分, 电厂中循环水、燃料等原料的利用率与设备的寿命会大幅降低, 折算成本会大幅增加。因此能源供应端采取多能协同对电力系统的优化作用可表征为一个负成本指标, 表示其对电力系统成本的降低幅度。

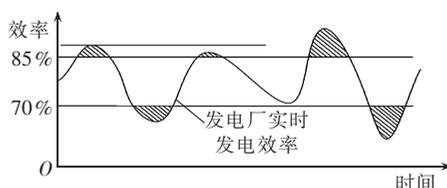


图 2 发电厂低效运行(阴影部分)示意图  
Fig.2 Schematic diagram of low-efficient power plant operation (shaded areas)

因此设定多能协同优化值(负成本)  $C_{pb}$ :

$$C_{pb}=\alpha\Delta\left(\int_{0\leq\beta\leq 70\%} P_p T dT+\int_{85\%\leq\beta\leq 100\%} P_p T dT\right) \quad (10)$$

其中,  $\beta=\frac{\text{发电厂实际发电功率}}{\text{发电厂满载发电功率}}\times 100\%$ ;  $T$  为发电厂运行时间; 系数  $\alpha$  为每调整一单位低效发电量时节约的成本单位;  $P_p$  为发电厂实际发电功率。

此过程将多能协同对发电厂运行的优化转化为一个经济性指标, 该指标叠加在成本中, 可在成本中反映出多能协同对系统运行安全性、稳定性、经济性的优化。

### 2.2 供应侧经济模型

电力行业中常将电力系统的总经济成本  $C_A$  分为投资成本  $C_I$ 、维持成本  $C_M$ , 在不同的情况下可作适当的细分<sup>[9]</sup>。本文将维持成本  $C_M$  分解为运维成本

$C_{OM}$  与退役处置成本  $C_D$ 。

$$C_A = C_1 + C_{OM} + C_D \quad (11)$$

对于  $C_1$ , 设利率为  $r$ , 年份变量为  $n$  年, 计算寿命为  $a$  年。应采取以下公式将现值转化为等额年金进行比较。

$$\text{等额年金} = \frac{LCC_{sz} \times r(1+r)^a}{(1+r)^a - 1} \quad (12)$$

其中,  $LCC_{sz}$  为全寿命周期成本资金现值。

多能协同系统供应侧的总成本为:

$$C_p = C_g + C_{pre} + C_{ph} + C_{pb} \quad (13)$$

其中,  $C_g$ 、 $C_{pre}$ 、 $C_{ph}$ 、 $C_{pb}$  分别为天然气供应站的成本、热电联产电厂发电部分成本、热电联产电厂发热部分成本与多能协同优化负成本。

### 2.2.1 供应侧供暖模型

热电联产电厂每个冬季通过直接送暖至需求侧时用户所得的供暖热量为  $Q_h = P_i t_{iw} - W_p$ , 其中  $P_i$  为装机容量,  $t_{iw}$  为机组冬季运行时间,  $W_p$  为管道热损。热电联产电厂供热部分成本  $C_{ph}$  的计算过程见文献[9-10], 可得用户每得到 1 J 的热量, 热电联产电厂的成本为  $C_{ph}/Q_{h0}$ 。

### 2.2.2 供应侧供电模型

需求侧通过空调制热从热电联产电厂得到供暖热量  $Q_e = (P_i t_{iw} - W_{lw})/\eta_{ac}$ , 其中  $W_{lw}$  为冬季线路损耗,  $\eta_{ac}$  为空调制热效率。热电联产电厂供电部分成本  $C_{pre}$  计算过程见文献[9-11]。

此时可得用户每得到 1 J 的热量, 热电联产电厂的成本为  $C_{pre}/Q_e$ 。

### 2.2.3 供应侧供气模型

天然气供应站每个冬季通过送气至需求侧时用户得到的供暖热量  $Q_g = (W_g - W_{gw})\eta_g$ , 其中  $W_g$  为供应站供出的天然气能量,  $W_{gw}$  为传输过程中天然气的能量损耗<sup>[12]</sup>,  $\eta_g$  为天然气供热效率。

天然气供应站投资成本  $C_{pg1}$  可以分解为设备成本  $C_{pgf}$  与土地折算成本  $C_{pge}$ ; 运维成本  $C_{pg2}$  分解为维修成本  $C_{pgr}$ 、人工成本  $C_{pgh}$  与废气排放成本  $C_{pge}$ ; 由于天然气公司已经考虑废弃成本, 故可不再考虑。因此天然气供应站成本为  $C_g = C_{pg1} + C_{pg2}$ , 可以得到用户每通过天然气供暖得到 1 J 的热量, 能源供应侧成本为  $C_g/Q_{g0}$ 。

## 2.3 需求侧经济模型

### 2.3.1 需求侧供暖模型

若用户冬天用热是通过直接供暖而得, 则每户用户冬季用电取暖费用  $C_{uhe}$  为:

$$C_{uhe} = C_{uhf} \frac{(1+r)^{y_i}}{\sum_{y=1}^{y_i} (1+r)^y} + C_{uh} S_a \quad (14)$$

其中,  $C_{uhf}$  为折算至房屋价格内的暖气初装费;  $C_{uh}$  为

每平方米供暖收费;  $S_a$  为用户住宅总面积;  $Y_g$  为暖气装置的寿命年限;  $y_i$  为安装后年数。

### 2.3.2 需求侧用电模型

为建立冬季夜间用户侧居民用电数学模型, 首先可根据阶梯电价得到用户每户冬季若不用供暖单位用电时每月电费成本  $C_{uee}$ :

$$C_{uee} = \begin{cases} E_1 C_{ue1} + (E_2 - E_1) C_{ue2} + (E_{ue} - E_2) C_{ue3} & E_{ue} > E_2 \\ E_1 C_{ue1} + (E_{ue} - E_1) C_{ue2} & E_1 < E_{ue} \leq E_2 \\ E_{ue} C_{ue1} & E_{ue} \leq E_1 \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $E_{ue}$ 、 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $C_{ue1}$ 、 $C_{ue2}$ 、 $C_{ue3}$  分别为每户冬季每月用电量、阶梯电费第一电量阶、阶梯电费第二电量阶、第一阶梯电价、第二阶梯电价与第三阶梯电价。

$$E_{ue} = E_{uef} + E_{uea} \quad (16)$$

用户冬天选择空调制热的电量  $E_{uea}$  为:

$$E_{uea} = E_{uea1} + E_{uea2} \quad (17)$$

其中,  $E_{uea1}$  为空调制热使房间升温所消耗的电量;  $E_{uea2}$  为空调制热以保持房间温度所消耗的电量。

$$E_{uea1} = \frac{C_{air} \rho_{air} S h (T_{ac} - T_{air})}{\eta_{ac}} \quad (18)$$

$$E_{uea2} = P t_e \quad (19)$$

其中,  $C_{air}$  为空气比热容;  $\rho_{air}$  为空气密度;  $T_{ac}$  为空调设置温度;  $T_{air}$  为自然温度;  $S$  为一个房间的面积;  $h$  为室内高度;  $P$  为空调制热以保持房间温度时的功率;  $t_e$  为用户空调制热时长。

用户每户冬季每月电费成本  $C_{uee}$  与每户冬季每月用电量  $E_{ue}$  关系曲线如图 3 所示。

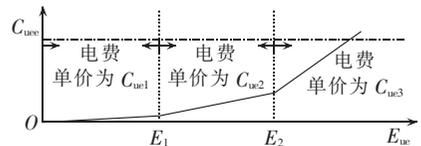


图 3 用户每户每月电费成本

Fig.3 Household electricity cost per month

每户每月基本电费  $C_{uef}$  为:

$$C_{uef} = E_{uef} C_{ue1} \quad (20)$$

其中,  $E_{uef}$  为每户每月基本电量。

则用户冬季取暖时的总消费为:

$$C_{uee} = 3(C_{ume} - C_{uef}) \quad (21)$$

### 2.3.3 需求侧用气模型

若用户冬天用热是通过天然气供应取暖而得, 则用户冬季用气取暖费用  $C_{uge}$  为:

$$C_{uge} = C_{ugf} \frac{(1+r)^{y_i}}{\sum_{y=1}^{y_i} (1+r)^y} + C_{ug} V_{uge} \quad (22)$$

其中,  $C_{ugf}$  为天然气供暖装置初装费;  $C_{ug}$  为天然气单位体积价格, 由于天然气供暖用量大幅超过天然气其他日常用量与天然气阶梯价格节点, 所以可用统一  $C_{ug}$  表示;  $V_{uge}$  为天然气使用体积。

$$V_{\text{uge}} = \frac{C_{\text{air}} \rho_{\text{air}} Sh (T_{\text{ac}} - T_{\text{air}})}{\eta_g e_g} + \frac{E_{\text{uea2}} t_g}{e_g t_e} \quad (23)$$

其中,  $e_g$  为天然气的热值;  $t_g$  为使用天然气制热的时间。

### 3 双目标优化模型与求解

#### 3.1 目标函数与约束条件

##### 3.1.1 目标函数

根据前述理论模型, 考虑用户的消费经济性以及电力发电侧的发电经济性与稳定性, 设定目标函数如下。

a. 用户消费总额最低。

$$\min C_u = N(p_g C_{\text{uge}} + p_e C_{\text{uee}} + p_h C_{\text{uhe}}) \quad (24)$$

其中,  $N$  为居民用户的户数, 当  $N$  为定值时, 则上式即  $\min(C_u/N)$ 。

定义需求侧每个冬季取暖每户的平均花费为  $A_c$ ,  $A_c = C_u/N$ , 则目标函数为:

$$\min A_c \quad (25)$$

b. 热电联产电厂高效发电。

热电联产电厂发电比例为 70%~85% 时为高效运行, 为优化电力发电侧的高效经济性与稳定性, 应设定目标使热电联产电厂发电比例低于 70% 与高于 85% 的部分  $O_1$  达到最小。

$$\min O_1 = \int_{0 \leq \beta \leq 70\%} P_e t dt + \int_{85\% \leq \beta \leq 100\%} P_e t dt + \int_{0 \leq \beta \leq 70\%, 85\% \leq \beta \leq 100\%} \frac{P_e}{P_h + P_e} P t dt \quad (26)$$

定义低效运行度  $A_1 = \frac{P_e}{P_h + P_e}$ , 则目标函数为:

$$\min A_1 = \frac{P_e}{P_h + P_e} \quad (27)$$

##### 3.1.2 约束条件

a. 功率平衡约束。

在多能协同系统中, 应使能源供应端各种能源能满足需求侧用户所需的各种不同类型的能源<sup>[11]</sup>, 即:

$Q_{\text{pe}} > \int E_{\text{ue}} + Q_{\text{ph}} > \int Q_{\text{uh}} + Q_{\text{pg}} > \int V_{\text{uge}} e_g$ , 其中  $Q_{\text{uh}}$  为各用户每户冬季直接用暖时暖总量,  $Q_{\text{pe}}$  为空调制暖供暖总量,  $Q_{\text{ph}}$  为直接供暖总量,  $Q_{\text{pg}}$  为天然气制暖供暖总量。

b. 机组运行约束。

为使能源供应侧能够维持运行, 能源需求侧对各能源消费额不小于能源需求侧的产能成本:

$$N p_g C_{\text{uge}} \geq C_{\text{pg}} \quad (28)$$

$$N(p_e C_{\text{uee}} + p_h C_{\text{uhe}}) \geq C_{\text{pg}} + C_{\text{pe}} \quad (29)$$

#### 3.2 双目标优化求解

##### 3.2.1 自适应权重法

本文采用自适应权重系数法<sup>[14]</sup>将双目标归一为

单一目标, 其每次迭代过程中权重因子均在当前迭代中重新调整, 求得搜索空间最优解。

双目标最小化优化问题即:

$$\min \{z_1 = A_c(C_{\text{ug}}, C_{\text{uh}}), z_2 = A_1(C_{\text{ug}}, C_{\text{uh}})\} \quad (30)$$

每次迭代中在判据空间中定义最大与最小极限点  $z^+$ 、 $z^-$ , 每次迭代都更新, 代入得到权重。

$$z^+ = \{z_1^{\max}, z_2^{\max}\} \quad (31)$$

$$z^- = \{z_1^{\min}, z_2^{\min}\} \quad (32)$$

归一后的目标函数为:

$$\min z = \frac{z_1^{\max} - A_c(C_{\text{ug}}, C_{\text{uh}})}{z_1^{\max} - z_1^{\min}} + \frac{z_2^{\max} - A_1(C_{\text{ug}}, C_{\text{uh}})}{z_2^{\max} - z_2^{\min}} \quad (33)$$

##### 3.2.2 自适应罚函数法

本文采取可变的罚函数, 用一种自适应罚函数方法来处理不等式约束, 使罚函数在每次迭代中适应性调整罚因子, 避免过度惩罚<sup>[14]</sup>。

根据约束条件  $g_j(a_j) \leq b_j (j=1, 2, \dots, k)$  构造自适应罚函数:

$$p(x) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^m \left( \frac{-\Delta b_j}{\Delta b_j^{\max}} \right)^\alpha \quad (34)$$

其中,  $\Delta b_j = \max\{0, g_j(a_j) - b_j\}$ ,  $\Delta b_j^{\max} = \max\{\varepsilon, \Delta b_j\}$ ,  $\varepsilon$  为一个小的正数, 用来避免罚函数中出现除数为 0 的情况,  $b_j$  为对应于第  $j$  个约束的上限,  $\Delta b_j$  为当前结果对第  $j$  个约束的违背值,  $\Delta b_j^{\max}$  为当前结果对第  $j$  个约束的最大违背值;  $k$  为不等式约束个数;  $\alpha$  为惩罚因子, 可取 0~1 之间的值。

## 4 算例分析

### 4.1 算例说明

算例以某省某市某区<sup>[15]</sup>的一部分数据为参考, 热源为天然气供应站与热电联产电厂, 供能网络总长 13 307 m, 居民住宅总面积  $1.4412 \times 10^7 \text{ m}^2$ 。假设每户面积为  $120 \text{ m}^2$ , 共 12 万户, 利用空调制暖与天然气供暖时有效面积为  $40 \text{ m}^2$ 。

对于能源单价费用, 不妨假设天然气单位立方价格为  $C_{\text{ug}}$ , 每月每平方米供暖收费为  $C_{\text{uh}}$ 。电价定价参考该地区现有阶梯电价标准折算至每月。对于天气状况, 根据该地历史温度状况预测 2016 年底至 2017 年初的天气数据<sup>[16]</sup>, 取每日最低温度得到冬季的温度统计预测如图 4 所示。

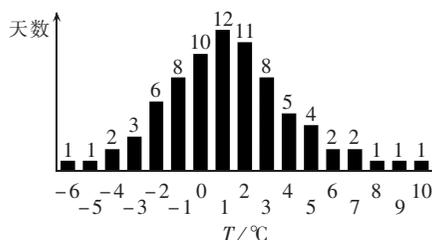


图 4 2016 至 2017 年度冬季温度预测

Fig.4 Temperature forecast for winter of 2016-2017

4.2 不同算例对比分析

设置:算例 1 研究未加入天然气网络的热电联供系统模型;算例 2 为考虑热电协同天然气供暖的热电气联供系统模型。

4.2.1 需求侧消费分析

由实际情况知选择不供暖的用户极少,故本算例中取  $p_n=0$ ,由此在两算例下需求侧选择不同供暖方式的比例如图 5 和图 6 所示, $C_{ug}$ 、 $C_{uh}$  与居民每冬季取暖每户平均花费  $A_c$  函数关系如图 7 和图 8 所示。

在算例 1 中,由图 5 可知用户选择空调制暖的

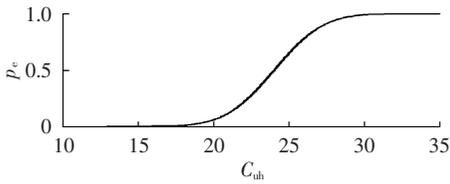


图 5 算例 1 中需求侧选择用电制热比例  
Fig.5 Household proportion of electric heating for Case 1

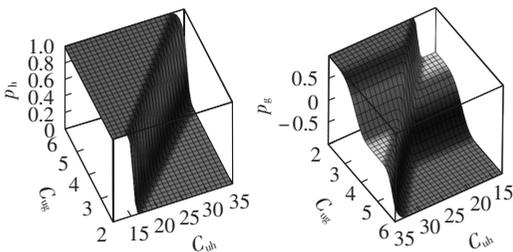


图 6 算例 2 中需求侧选择直接供暖或天然气供暖的比例

Fig.6 Household proportions of direct heating and gas heating for Case 2

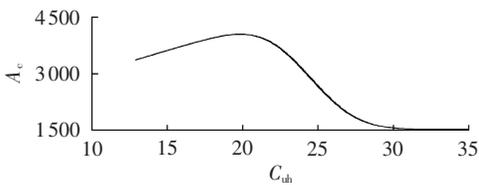


图 7 算例 1 中需求侧每冬季取暖每户平均花费  
Fig.7 Average household heating cost per winter for Case 1

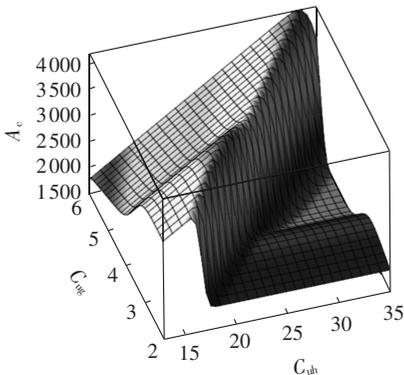


图 8 算例 2 中需求侧每冬季取暖每户平均花费  
Fig.8 Average household heating cost per winter for Case 2

比例  $p_e$  由 0 随  $C_{uh}$  的升高而升高,最终趋于 1,相应选择直接供暖的用户比例  $p_h$  则由 1 随  $C_{uh}$  的升高而降低,最终趋于 0。由图 7 可知,用户平均取暖花费  $A_c$  随  $C_{uh}$  的升高而先升高后减小至趋于稳定;结合图 5 可知  $A_c$  的变化原因是当直接用暖单价  $C_{uh}$  较低时,居民偏向选择用户体验更佳的直接用暖的取暖方式,而随着  $C_{uh}$  逐渐增大,用户在高花费与高体验两者中权衡博弈,选择空调制暖的用户比例逐渐增加, $A_c$  随之降低直至稳定。

在算例 2 中,如图 6、8 所示, $p_g$ 、 $p_e$ 、 $p_h$ 、 $A_c$  均为关于  $C_{uh}$ 、 $C_{ug}$  的三维函数,其变化过程中的曲面变化趋势也显示了需求侧用户在价格与用户感受的选择博弈过程:当直接供暖单价较低、天然气价格相对较高时,用户偏向选择体验更佳是直接供暖方式;当直接供暖单价与天然气单价均较高时,用户偏向选择价格更有优势的空调制暖方式;当天然气价格较低、供暖单价相对较高时,用户偏向选择价格与体验均居中的天然气供暖方式。也因用户决策选择与 2 种单价的综合变化,每冬季取暖用户平均花费在天然气单价、直接供暖单价同时较大与同时较小时达到最低水平,在两单价相对居中时达到最大。

4.2.2 供应侧热电联产电厂运行分析

2 个算例中的  $A_1$  如图 9、10 所示,算例 1 中,随  $C_{uh}$  的升高  $A_1$  逐渐升高最终趋于稳定,而供应侧的经济性稳定性随之降低;算例 2 中  $A_1$  随  $C_{uh}$ 、 $C_{ug}$  的变化,其变化过程中的曲面变化显示了需求侧用户在价

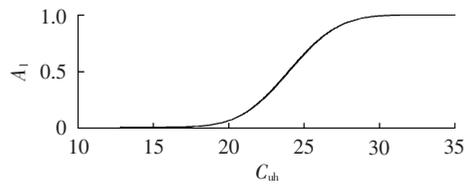


图 9 算例 1 中低效运行度  
Fig.9 Low-efficient operation level of Case 1

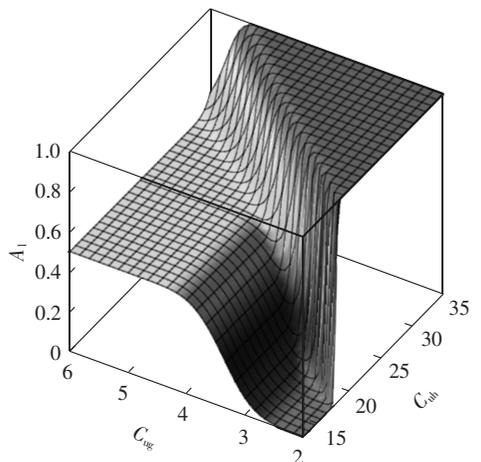


图 10 算例 2 中低效运行度  
Fig.10 Low-efficient operation level of Case 2

格与用户感受的选择博弈过程。

#### 4.2.3 双目标优化结果比较

约束条件可由算例参数与式(29)—(31)得到,如表 1 所示。根据表 1 与式(34)运用遗传算法<sup>[13]</sup>进行双目标寻优,在 2 种算例下得到的双目标综合优化的结果如表 2 所示。

表 1 2 个算例的约束条件  
Table 1 Constraints of two cases

算例	约束条件
1	$13.9 \leq C_{uh} \leq 24.3$
2	$2.9435 \leq C_{ug}$ $C_{uh} \geq \frac{5503.7522 + 2156.1254 C_{ug}}{759.5573 - 59.9209 C_{ug}}$

表 2 2 个算例中的双目标综合寻优结果  
Table 2 Results of bi-objective optimization for two cases

算例	$C_{uh}/\text{元}$	$C_{ug}/\text{元}$	$p_e/\%$	$p_h/\%$
1	24.3	—	0.545	0.455
2	23.1	3.35	0.315	0.501
变化率/%	-4.94	—	-42.20	10.11
算例	$p_g/\%$	$A_c/\text{元}$	$A_1$	$P_e/\text{元}$
1	—	2951.199	0.545	$1.503 \times 10^{-7}$
2	0.184	3174.804	0.386	$1.802 \times 10^{-7}$
变化率/%	—	7.58	-29.17	19.89

由表 2 知,通过双目标寻优得到 2 个算例的综合优化结果为:在两算例下  $C_{uh}$  的最优设定值分别为 24.3 元与 23.1 元,算例 2 中  $C_{ug}$  的最优设定为 3.35 元。其中算例 1 中  $C_u/N=2951.199$  元、 $A_1=0.545$ ,算例 2 中  $C_u/N=3174.804$  元、 $A_1=0.386$ 。对比 2 个算例的结果可知,热电气多能协同能源系统相比热电联产能源系统,在加入天然气系统并同样综合优化调整后,需求侧用户经过比较选择舒适度较高,单价相对较高的供暖方式的人数比例大幅提高;而供应侧的直接供暖单价反而有所降低。因此,加入天然气系统协同作用后,虽然需求侧冬季取暖每户平均花费的情况提高 7.58%,但用户自身以较小的消费增加得到了大幅提升的用暖体验,与此同时,供应侧低效运行度下降 29.17%,热电联产电厂的单位焦耳能量收益  $P_e$  增加 19.89%,因此在综合供需两侧的考虑下,加入天然气系统的热电气协同综合能源系统优于热电联产系统。

## 5 结论

本文考虑用户行为分析与多能协同的优化性对电厂提出了一种考虑供需两侧交互作用的多能协同综合能源系统优化法,并得到以下结论:

a. 本文针对多能协同综合能源系统提出了需求侧每冬季取暖每户平均花费指标  $A_c$  与供应侧低效运行度指标  $A_1$ ,同时结合用户行为分析方法与多能

互补优化方法提出了双目标优化法,并进一步在 2 种算例中验证了该优化方法的有效性;

b. 算例分析说明当引入新的能源系统协同原有能源系统时,能在保证需求侧消费成本基本不增加的情况下,有效降低供应侧的低效运行度并提升热电联产电厂的单位能量收益。

而目前研究仅考虑了单一需求侧用户类型,在下一步的工作中还可以考虑引入更多用户类型,进行进一步的深入研究。

## 参考文献:

- [1] 徐秋玲. 多能协同推进能源可持续发展[N]. 中国电力报,2016-03-30(001).
- [2] WANG H, YAN J, DONG L. Simulation and economic evaluation of biomass gasification with sets for heating, cooling and power production[J]. Renewable Energy, 2016, 99: 360-368.
- [3] 施锦月, 许健, 曾博, 等. 基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2959-2966. SHI Jinyue, XU Jian, ZENG Bo, et al. A bi-level optimal operation for energy hub based on regulating heat-to-electric ratio mode[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2959-2966.
- [4] 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.
- [5] 黄国日, 刘伟佳, 文福拴, 等. 具有电转气装置的电-气混联综合能源系统的协同规划[J]. 电力建设, 2016, 37(9): 1-13. HUANG Guori, LIU Weijia, WEN Fushuan, et al. Collaborative planning of integrated electricity and natural gas energy systems with power-to-gas stations[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(9): 1-13.
- [6] TANABE S, KIMURA K. Effects of air temperature, humidity, and air movement on thermal comfort under hot and humid conditions[R]. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1994.
- [7] FANG L, CLAUSEN G, FANGER P O. Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality[J]. Indoor Air, 1998, 8(2): 80-90.
- [8] MAS-COLELL A. Microeconomic theory[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1995: 236-256.
- [9] 帅军庆. 电力企业资产全寿命周期管理[M]. 上海: 中国电力出版社, 2010: 73-94.
- [10] 田书欣, 程浩忠, 常浩, 等. 特高压电网社会效益分析及评价方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 145-153. TIAN Shuxin, CHENG Haozhong, CHANG Hao, et al. Analysis and evaluation method of social benefit of UHV power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 145-153.
- [11] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(下册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 128-135.
- [12] 姚黎明. 城镇燃气设计规范的建议[J]. 油气田地面工程, 2004, 23(3): 58.

- YAO Liming. Suggestion on design code of urban gas[J]. Oil and Gas Field Surface Engineering,2004,23(3):58.
- [13] 玄光男. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社,2004: 97-100.
- [14] 刘磊. 分布式发电接入系统的双目标优化[D]. 长沙:湖南大学, 2009.
- LIU Lei. Dual objective optimization of distributed generation access system[D]. Changsha:Hunan University,2009.
- [15] 叶文晟. 武汉热电冷联产供暖期系统分析与自控研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- YE Wensheng. System analysis and automatic control of heating and cooling heating period in Wuhan[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2008.
- [16] JIA W,XIEFEI J,YUWEN C. Probabilistic multimodel ensemble prediction of decadal variability of east asian surface air tempe-

rature based on IPCC-AR5 near-term climate simulations [J]. Advances in Atmospheric Sciences,2013,30(4):1129-1142.

#### 作者简介:



王琪鑫

王琪鑫(1993—),女,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与能源互联网(E-mail:wangqixin@whu.edu.cn);

刘涤尘(1953—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、电力自动监控(E-mail:dcliu@whu.edu.cn);

吴军(1977—),男,上海人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统运行控制、电力市场(E-mail:byronwu@whu.edu.cn)。

## Comprehensive optimization including user behavior analysis for supply and demand sides of IES-MEC

WANG Qixin<sup>1</sup>, LIU Dichen<sup>1</sup>, WU Jun<sup>1</sup>, ZHU Xuedong<sup>1</sup>, LUO Jinshan<sup>1</sup>, CHEN Yi<sup>1</sup>,  
CHEN Wei<sup>1</sup>, ZHAO Hongsheng<sup>2</sup>, SUN Yong<sup>3</sup>, CAI Hongyi<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Economic and Technology Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;

3. State Grid Jilin Electric Power Company, Changchun 130000, China)

**Abstract:** With the heat supply and consumption system of an IES - MEC (Integrated Energy System with Multi-Energy Cooperation) as the research object, a method of comprehensive optimization including user behaviour analysis is proposed for its supply and demand sides. The utility function is adopted to analyze the user behaviour towards the heat consumption at demand side. The economic supply-side models are established according to their heat generation characteristics for different energy sources while the economic demand-side models according to their heat supply mechanisms. A bi-objective optimization method is suggested, which maximizes the operational efficiency of power plant at supply side and minimizes the household electricity consumption cost at demand side. The proposed method is respectively applied to a heat-power combination system and an electricity-heat-gas IES. The optimization results are analyzed and compared, which proves that the integrated gas system enhances the cooperative optimization effect of IES and also verifies the effectiveness and feasibility of the proposed method.

**Key words:** multi-energy cooperation; integrated energy system; user behavior analysis; comprehensive supply-demand optimization; bi-objective optimization