

# 考虑实时需求的冷热电联供型微电网优化调度

杜晓婷

(安徽三联学院,安徽 合肥 230061)

**摘要:**冷热电联供型微电网通过对各分布式电源进行整合管理,既提高了可再生能源利用效率,减轻了环境污染,又保障了系统的稳定性。基于各微源自身不确定性及微网结构的复杂性,文中提出一种基于日前初始用电负荷需求并结合电价激励及用户侧用电舒适度的综合实时用电需求优化模型,实现负荷从高峰向非高峰转移,并采用遗传算法的多目标优化算法进行实验,验证了该模型能使负荷需求曲线明显平缓,各微源出力相对均衡,证明了该模型的科学性和有效性。

**关键词:**冷热电联供型微电网;实时用电需求;多目标优化算法

**中图分类号:**TM 715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)05-0006-08

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220502

## Optimal Scheduling of CCHP-based Microgrid Considering Real-time Demand

DU Xiaoting

(Anhui Sanlian University, Hefei 230061, Anhui, China)

**Abstract:**Through the integrated management of distributed power sources, the combined cooling, heating and power (CCHP)-based microgrid not only improves the efficiency of renewable energy utilization and reduces the environmental pollution, but also ensures the stability of the system. Based on the uncertainty of each micro-source and the complexity of microgrid structure, a comprehensive real-time power demand optimization model based on the pre-day initial load demand and combined with electricity price incentive and user-side electricity comfort is proposed, in which the shift of load from peak to non-peak is realized. And the multi-objective optimization algorithm based on genetic algorithm is adopted to prove that the proposed model can make the load demand curve obviously smooth and the output of each micro-source is relatively balanced, which proves the proposed model is scientific and effective.

**Key words:** CCHP-based microgrid; real-time power demand; multi-objective optimization algorithm

## 0 引言

化石能源短缺以及由化石能源带来的环境污染问题,依然困扰人类<sup>[1]</sup>。冷热电三联供(combined cooling, heating and power, CCHP)系统作为分布式能源的一种,可实现能源的梯级利用,提高系统能源利用效率,具有节能、环保的特点。随着微电网技术的发展,CCHP型微电网通过对各分布式电源进行整合管理,在提高可再生能源利用效率、减轻环境污

染的基础上,又保障了系统的稳定性<sup>[2-4]</sup>。而随着可再生能源的不断渗透以及负荷灵活性的提高,源荷不确定性使得CCHP型微电网调度难度增大。近年来,针对CCHP型微电网优化调度已有较多研究。例如基于调整微电源出力以及采用储能设备补偿误差方法,文献[5]提出了一种利用确定场景预测控制方法实时修正功率偏差模型。文献[6]提出了一种基于模型预测控制和反馈校正的CCHP型微电网优化调度方法,以补偿预测误差。文献[7-9]考虑需求侧管理建立了冷热电联供型微电网优化配置模型,其中:文献[7]通过削减负荷实现多能协同,并采用了一种基于模型预测控制的微电网能量管理算

法;文献[8]考虑包括可平移负荷和可中断负荷管理,并采用混沌粒子群算法对所建立的模型进行求解;文献[9]建立了一种包括基础负荷、可平移负荷、可转移负荷、可削减负荷的社区冷、热、电三联供系统,算例分析验证了该系统在调整冷、热、电负荷曲线的同时,也有效降低了综合运行成本。文献[10]提出了一种基于综合需求响应的源荷协调 CCHP 型微电网优化调度模型,采用典型场景集考虑新能源出力的不确定性,并利用免疫遗传算法求解,算例分析验证了该方法能有效降低综合运行成本,具有一定的经济及社会价值。文献[11]建立了一种含可再生能源预测的 RE-CCHP 系统经济模型,通过改进求解算法,分析各机组最优配置结果以及可再生能源渗透率对运行成本的影响。

考虑到负荷需求存在实时变化的特点,下面提出了一种基于日前初始用电负荷需求并结合电价激励及用户侧用电舒适度的综合实时用电需求优化模型,实现负荷从高峰向非高峰转移,并采用了遗传算法的多目标优化算法。通过典型日算例分析,证明了实时需求管理模型能使负荷需求曲线明显平缓,各微源出力相对均衡,证明了该模型的科学性和有效性。

## 1 系统模型

系统能源设备包括光伏电源、风力机组、燃料电池、微型燃气轮机、燃气锅炉;系统储能设备包括蓄电池、储热槽;系统能量转换设备包括余热回收及转换装置、电制冷机、吸收式制冷机<sup>[12]</sup>,如图1所示。

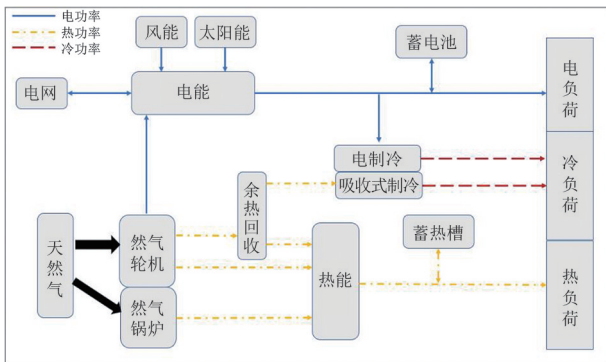


图1 冷热电联供型微电网结构

### 1.1 微型燃气轮机

微型燃气轮机是分布式电源中最典型的一种,微型燃气轮机排放污染气体量和运行功率成正比,

运行功率超出额定功率越多,排放的污染气体量越大。为了限定微型燃气轮机(以下简称燃气轮机)污染气体排放量,文中对燃气轮机的运行功率进行限制<sup>[13-14]</sup>;依据文献[15],给出了其较为精确的污染排放量数据,如表1所示。

表1 微型燃气轮机排放特性 单位:g/kWh

污染物	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>
排放量	0.62	220.08	0.17	0.000 9

$$P_m(t) = G_m(t) \eta_m L_{ng} \quad (1)$$

$$T_m(t) = P_m(t) \frac{1 - \eta_m}{\eta_m} \quad (2)$$

式中: $P_m(t)$ 为燃气轮机发电功率; $T_m(t)$ 为燃气轮机热出力; $G_m(t)$ 为燃气轮机燃气消耗; $\eta_m$ 为燃气轮机发电效率; $L_{ng}$ 为燃气热值,一般取 $9.7 \text{ kWh/m}^3$ 。

### 1.2 余热回收装置和热交换装置

燃气轮机排出烟气余热通过余热回收装置收集起来,经热交换装置转换成热能供给 CCHP 型微电网系统的冷、热负荷需求,实现能量的梯级利用<sup>[11]</sup>。

#### 1) 余热功率

$$T_r(t) = T_m(t) \cdot \eta_r \quad (3)$$

式中, $\eta_r$ 为余热回收装置效率。

#### 2) 热交换装置热出力

$$T_{ex}(t) = T_{exin}(t) \cdot \eta_{ex} \quad (4)$$

式中: $T_{exin}(t)$ 为热交换装置输入热功率; $\eta_{ex}$ 为热交换效率。

### 1.3 燃气锅炉

当余热回收及转换装置输出的热量不能够满足系统热负荷需求时,燃气锅炉作为热能补充设备提供能量给热负荷<sup>[14]</sup>。

#### 燃气锅炉热出力为

$$T_{bl}(t) = G_{bl}(t) \cdot \eta_{bl} L_{ng} \quad (5)$$

式中: $G_{bl}(t)$ 为燃气锅炉消耗燃气体积; $\eta_{bl}$ 为燃气锅炉效率。

### 1.4 光伏电源

光伏发电系统是 CCHP 型微电网的重要组成部分之一,温度和太阳光照强度是影响分布式光伏发电系统的重要因素。

#### 光伏发电功率为

$$P_p(t) = a_1 P_{pp}(t) \cdot A [1 + a_2(T_s - T_{sic})] \quad (6)$$

式中: $a_1$ 为功率系数,指实际输出功率与额定条件下输出功率的比值,一般取 $0.9$ ;  $a_2$ 为功率温度系数; $P_{pp}(t)$ 为额定输出功率; $A$ 为电池板实际辐照

度;  $T_{\text{sic}}$  为标准测试条件下参考温度,一般取 25 °C;  $T_s$  为当前电池板表面温度,可由式(7)求出。

$$T_s = T_a + 0.0138(1 + 0.031T_a)(1 - 0.042v_p) \cdot A \quad (7)$$

式中:  $T_a$  为环境温度;  $v_p$  为风速。

### 1.5 风力发电

风力发电与光伏发电在时间尺度上具有较为明显的互补性。夏季太阳能资源丰富,而风能资源则较小;冬春季则反之。合理利用这种互补特性,不仅可以减小整体投资成本,更能够减小储能系统的负担,从而可以一定程度上缩小储能设备容量。

由贝兹理论可知,通过风轮的最大能量可以表示为

$$P_w(t) = 0.5\rho\pi R^2 v_w^3 C_p \quad (8)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $R$  为风轮叶片半径;  $v_w$  为风速;  $C_p$  为风能利用系数,一般取 0.593。

### 1.6 吸收式制冷机

目前吸收式制冷机中,溴化锂制冷机的应用最为广泛。

吸收式制冷机冷出力为

$$C_{\text{ac}}(t) = T_{\text{acin}}(t) \cdot a_{\text{ac}} \quad (9)$$

式中:  $T_{\text{acin}}(t)$  为吸收式制冷机输入热功率;  $a_{\text{ac}}$  为制冷系数。

### 1.7 电制冷机

电制冷机的冷出力为

$$C_{\text{ec}}(t) = P_{\text{ec}}(t) \cdot a_{\text{ec}} \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{ec}}(t)$  为电制冷机输入电功率;  $a_{\text{ec}}$  为电制冷系数。

### 1.8 储能设备

#### 1) 储热

余热回收和热转换装置提供的热能超过系统热负荷需求时,采用蓄热槽储热;当余热回收和热转换装置提供热能不足时,首先由蓄热槽补充热能。

蓄热槽存储热量为

$$T_{\text{hs}}(t) = (1 - \sigma_{\text{hs}}) T_{\text{hs}}(t-1) + [\eta_{\text{hsc}} T_{\text{hsc}}(t) - T_{\text{hsd}}(t) / \eta_{\text{hsd}}] \cdot \Delta t \quad (11)$$

式中:  $\sigma_{\text{hs}}$  为蓄热槽能量损耗系数;  $\eta_{\text{hsc}}$  为蓄热槽蓄热效率;  $\eta_{\text{hsd}}$  为蓄热槽放热效率;  $T_{\text{hsc}}(t)$  为  $t$  时刻蓄热槽蓄热功率;  $T_{\text{hsd}}(t)$  为  $t$  时刻蓄热槽放热功率;  $\Delta t$  为时间间隔。

#### 2) 储电

燃气轮机和分步式电源(distributed generation,

DG)提供的电能超过系统电负荷及电制冷机需求时,采用蓄电池储电;当系统提供电能不足时,首先由蓄电池补充电能。

蓄电池存储电量为

$$P_{\text{bt}}(t) = (1 - \sigma_{\text{bt}}) P_{\text{bt}}(t-1) + \left( \eta_{\text{btc}} P_{\text{btc}}(t) - \frac{P_{\text{btd}}(t)}{\eta_{\text{btd}}} \right) \cdot \Delta t \quad (12)$$

式中:  $\sigma_{\text{bt}}$  为蓄电池能量损耗系数;  $\eta_{\text{btc}}$  为蓄电池蓄电效率;  $\eta_{\text{btd}}$  为蓄电池放电效率;  $P_{\text{btc}}(t)$  为  $t$  时刻蓄电池蓄电功率;  $P_{\text{btd}}(t)$  为  $t$  时刻蓄电池放电功率。

## 2 能量管理模型

### 2.1 目标函数

#### 1) 总投资成本最小

$$\min E_1 = \sum_{t=1}^T E_{\text{grid}}(t) + E_{\text{ng}}(t) + E_{\text{bt}}(t) + E_{\text{rm}}(t) \quad (13)$$

式中,  $E_{\text{grid}}(t)$ 、 $E_{\text{ng}}(t)$ 、 $E_{\text{bt}}(t)$ 、 $E_{\text{rm}}(t)$  分别为电网交互成本、天然气消耗成本、电池老化成本、运维成本。

#### ① 天然气成本

$$E_{\text{ng}}(t) = E_{\text{nm1}}(t) + E_{\text{nbl}}(t) \quad (14)$$

式中:  $E_{\text{nm1}}(t)$  为燃气轮机消耗天然气成本;  $E_{\text{nbl}}(t)$  为燃气锅炉消耗天然气成本。

#### ② 电池老化成本

$$E_{\text{bt}}(t) = E_{\text{btc}}(t) + E_{\text{btd}}(t) \quad (15)$$

式中:  $E_{\text{btc}}(t)$  为蓄电池储电成本;  $E_{\text{btd}}(t)$  为蓄电池放电成本。

#### ③ 电网交互成本

$$E_{\text{grid}}(t) = E_{\text{gridin}}(t) - E_{\text{gridout}}(t) \quad (16)$$

式中:  $E_{\text{gridin}}(t)$  为买电成本;  $E_{\text{gridout}}(t)$  为卖电收益。

#### ④ 运维成本

$$E_{\text{rm}}(t) = \left\{ P_m(t) R_{\text{mtr}} + T_{\text{bl}}(t) R_{\text{blr}} + P_p(t) R_{\text{pr}} + P_w(t) R_{\text{wr}} + C_{\text{ac}}(t) R_{\text{acr}} + C_{\text{ec}}(t) R_{\text{ecr}} + [T_{\text{hsc}}(t) - T_{\text{hsd}}(t)] R_{\text{hsr}} + [P_{\text{btc}}(t) + P_{\text{btd}}(t)] R_{\text{btr}} + T_{\text{R}}(t) R_{\text{rr}} + T_{\text{ex}}(t) R_{\text{exr}} \right\} \cdot \Delta t \quad (17)$$

式中,  $R_{\text{mtr}}$ 、 $R_{\text{blr}}$ 、 $R_{\text{pr}}$ 、 $R_{\text{wr}}$ 、 $R_{\text{acr}}$ 、 $R_{\text{ecr}}$ 、 $R_{\text{hsr}}$ 、 $R_{\text{btr}}$ 、 $R_{\text{rr}}$ 、 $R_{\text{exr}}$  分别为燃气轮机、燃气锅炉、光伏电池、风

机、吸收式制冷机、电制冷机、蓄热槽储热放热、蓄电池充放电、余热回收装置和热交换装置  $t$  时刻出力费用。

## 2) 环境成本

污染物的排放与燃气轮机的出力、燃气锅炉出力以及电网购电有关,以  $\text{CO}_2$  为例,其排放量为

$$Q_{\text{cd}} = [N_{\text{mg}}(t)\beta_{\text{med}} + N_{\text{bg}}(t)\beta_{\text{bcd}} + N_{\text{g}}(t)\beta_{\text{gcd}}] \cdot T \quad (18)$$

式中:  $N_{\text{mg}}(t)$ 、 $N_{\text{bg}}(t)$ 、 $N_{\text{g}}(t)$  分别为燃气轮机、燃气锅炉燃气需求以及电网购电需求;  $\beta_{\text{med}}$ 、 $\beta_{\text{bcd}}$ 、 $\beta_{\text{gcd}}$  分别为燃气轮机、燃气锅炉、电网购电  $\text{CO}_2$  排放转换因子;  $T$  为整个规划周期。

有害气体处理成本<sup>[16]</sup>为

$$\min E_2 = \sum_{k=1}^m (R_k \cdot Q_k) \quad (19)$$

式中:  $k$  为污染物的种类;  $R_k$  为第  $k$  项污染物的处理费用;  $Q_k$  为第  $k$  项污染物的排放量。

## 2.2 约束条件

### 1) 电平衡

$$P_{\text{m}}(t) + P_{\text{p}}(t) + P_{\text{w}}(t) + P_{\text{gin}}(t) + P_{\text{btd}}(t) = P_{\text{ec}}(t) + P_1(t) + P_{\text{btc}}(t) + P_{\text{gout}}(t) \quad (20)$$

式中:  $P_{\text{gin}}(t)$  为电网购电功率;  $P_{\text{gout}}(t)$  为电网回购功率;  $P_1(t)$  为电负荷需求。

### 2) 热平衡

$$T_{\text{m}}(t) + T_{\text{ex}}(t) + T_{\text{bl}}(t) + T_{\text{hsd}}(t) = T_{\text{acin}}(t) + T_{\text{hsc}}(t) + T_1(t) \quad (21)$$

式中,  $T_1(t)$  为热负荷需求。

### 3) 冷平衡

$$C_{\text{ec}}(t) + C_{\text{ac}}(t) = C_1(t) \quad (22)$$

式中,  $C_1(t)$  为冷负荷需求。

### 4) 设备平衡约束

#### ① 微型燃气轮机

$$P_{\text{m},\text{min}}(t) \leq P_{\text{m}}(t) \leq P_{\text{m},\text{max}} \quad (23)$$

#### ② 光伏电源

$$0 \leq P_{\text{p}}(t) \leq P_{\text{m},\text{max}} \quad (24)$$

#### ③ 风电机组

$$0 \leq P_{\text{w}}(t) \leq P_{\text{m},\text{max}} \quad (25)$$

#### ④ 电网

$$0 \leq P_{\text{gin}}(t) \leq P_{\text{gin},\text{max}}, 0 \leq P_{\text{gout}}(t) \leq P_{\text{gout},\text{max}} \quad (26)$$

#### ⑤ 蓄电池

$$\begin{cases} P_{\text{btd},\text{min}} X_{\text{btd}}(t) \leq P_{\text{btd}}(t) \leq P_{\text{btd},\text{min}} X_{\text{btd}}, X_{\text{btd}} \in \{0,1\} \\ P_{\text{btc},\text{min}} X_{\text{btd}}(t) \leq P_{\text{btc}}(t) \leq P_{\text{btc},\text{min}} X_{\text{btd}}, X_{\text{btc}} \in \{0,1\} \\ X_{\text{btd}} + X_{\text{btc}} \leq 1 (\text{充放电状态约束}) \end{cases} \quad (27)$$

#### ⑥ 蓄热槽

$$\begin{cases} T_{\text{hsd},\text{min}} X_{\text{hsd}}(t) \leq T_{\text{hsd}}(t) \leq T_{\text{hsd},\text{min}} X_{\text{hsd}}, X_{\text{hsd}} \in \{0,1\} \\ T_{\text{hsc},\text{min}} X_{\text{hsc}}(t) \leq T_{\text{hsc}}(t) \leq T_{\text{hsc},\text{min}} X_{\text{hsc}}, X_{\text{hsc}} \in \{0,1\} \\ X_{\text{hsd}} + X_{\text{hsc}} \leq 1 (\text{蓄热槽储热放热状态约束}) \end{cases} \quad (28)$$

式(23)一式(28)中:下标 max、min 分别表示对应量的最大值、最小值;  $X_{\text{btc}}$ 、 $X_{\text{btd}}$  分别为蓄电池充、放电标志;  $X_{\text{hsc}}$ 、 $X_{\text{hsd}}$  分别为蓄热槽充、放热标志。

## 3 实时需求管理模型

基于日前负荷需求曲线,考虑用户侧用电成本和用电舒适度,建立一种综合信息价格激励机制的实时用电需求模型,鼓励用户在用电高峰期适量转移部分需求到用电低谷。总用电需求可表示为

$$P_{\text{tot}}(t) = \sum_{t=1}^T P_{\text{or}}(t) \quad (29)$$

式中:  $P_{\text{or}}(t)$  为  $t$  时刻初始用电需求;  $T$  为一个管理周期的时间。

实时用电需求为

$$P_{\text{rt}}(t) = P_{\text{or}}(t) + P_{\text{mv}}(t) \quad (30)$$

式中,  $P_{\text{mv}}(t)$  为转移需求。

转移负荷受到电价影响,假设将一个管理周期分为  $i$  个时间段,用  $N_i$  表示,对应时间段电价为  $r_i$ ,标准电价为  $r_0$ ,则由负荷转移引起的电价补偿费用为

$$R_{\text{tot}}(t) = P_{\text{mv}}(t) \cdot (r_0 - r_i) \quad (31)$$

其中:

$$r_i = \gamma \cdot r_0 \quad (32)$$

$$r_{\text{imin}} \leq r_i \leq r_{\text{imax}}$$

$$\gamma = P_{\text{or}}(t) / P_{\text{av}}(t) \quad (33)$$

$$P_{\text{av}}(t) = P_{\text{tot}}(t) / T \quad (34)$$

式中:  $P_{\text{av}}(t)$  为平均电负荷需求;  $\gamma$  为用电需求浮动因子。

## 4 算例分析

参照文献[17]中的算例参数,并结合合肥地区

实际情况给出各微电源参数,如表 2 所示;系统其他参数如表 3 所示。

表 2 微电源参数

符号	名称	额定功率/W	运维成本/(元·kW <sup>-1</sup> )
MT	燃气轮机	1000	0.036 40
PV	光伏电源	180	—
WT	风机	200	—
FC	燃料电池	200	0.025 98
GB	燃气锅炉	800	0.027 64
BT	蓄电池	500	0.027 48
HT	储热罐	800	0.030 28
ET	电制冷机	500	0.014 37
AT	吸收式制冷机	1000	0.013 26
GRID	电网交互功率	1500	—

4.1 gamultiobj 函数

Kalyanmoy Deb 的带精英策略的快速非支配排序遗传算法是目前应用较为广泛的一种算法, Matlab 提供了基于此种算法的 gamultiobj 函数,算例分析基于 gamultiobj 函数,证明了此算法为解决多目标优化问题提供了良好的分析途径。

4.2 典型日风机、光伏出力以及负荷预测曲线

为验证所建模型及求解算法的有效性,参考文献[18-19]得到某典型日风机及光伏出力曲线如图 2 所示,某典型日的冷负荷、热负荷和电负荷曲线如图 3 所示。

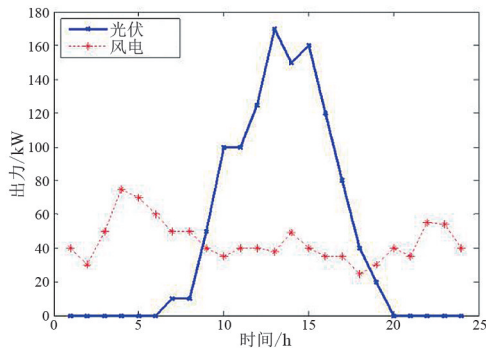


图 2 光伏和风力出力预测曲线

4.3 主要污染物处理成本

各污染物的处理成本如表 4 所示,各主要发电方式的污染物排放量如表 5 所示,某典型日分时段电价如表 6 所示。

4.4 优化分析

以某典型日 24 h 为一个调度周期,调度时段长 1 h。采用遗传算法的多目标优化算法进行优化调

表 3 系统其他参数

符号	含义	取值
$\eta_{me}$	燃气轮机发电效率	0.3
$\eta_{mt}$	燃气轮机发热效率	0.4
$L_{ng}$	燃气热值	9.7 kWh/m <sup>3</sup>
$\eta_r$	余热回收装置效率	0.7
$\eta_{ex}$	热交换效率	0.98
$\eta_{hl}$	燃气锅炉效率	0.9
$T_s$	当前电池板表面温度	32 °C
$a_1$	功率系数	0.9
$a_2$	温度系数	0.9
$A$	电池板实际辐照度	1.2
$T_{sic}$	标准测试条件下参考温度	25 °C
$T_a$	环境温度	29 °C
$v_p$	风速	32 m/s
$\rho$	空气密度	1.293 kg/m <sup>3</sup>
$R$	风轮叶片半径	50 m
$v_w$	风速	12 m/s
$C_p$	风能利用系数	0.593
$a_{ac}$	吸收式制冷机制冷系数	1.2
$a_{ec}$	电制冷机电制冷系数	4
$\sigma_{hs}$	蓄热槽能量损耗系数	0.02
$\eta_{hsc}$	蓄热槽蓄热效率	0.98
$\eta_{hsd}$	蓄热槽放热效率	0.98
$T_{hs,max}$	蓄热槽最大蓄热	1800
$T_{hs,min}$	蓄热槽最小蓄热	400
$\Delta t$	时间间隔	15 s
$\sigma_{bt}$	蓄电池能量损耗系数	0.01
$\eta_{bte}$	蓄电池蓄电效率	0.96
$\eta_{btd}$	蓄电池放电效率	0.96
$P_{ht,max}$	蓄电池最大蓄电量	1800 W
$P_{ht,min}$	蓄电池最小蓄电量	400 W
$T$	表示整个规划周期	24 h
$k$	表示污染物的种类	$k=1,2,3$
$R_k$	表示第 $k$ 项污染物的处理费用	$k=1,2,3$
$Q_k$	表示第 $k$ 项污染物的排放量	$k=1,2,3$
$X_{bte}$	蓄电池充电标志	0/1
$X_{btd}$	蓄电池放电标志	0/1
$X_{hsc}$	蓄热槽充热标志	0/1
$X_{hsd}$	蓄热槽放热标志	0/1
$r_i$	用户侧实时电价	0.3~0.8 元
$r_0$	用户侧标准电价	0.5 元
$R_{gin}$	购电价格(合肥工业用电)	0.52 元
$R_{gout}$	卖电价格	0.52×0.8 元
$R_{ng}$	天然气价格(合肥工业用气)	2.05 元
$R_{bt}$	蓄电池充放电费用	0.027 31 元

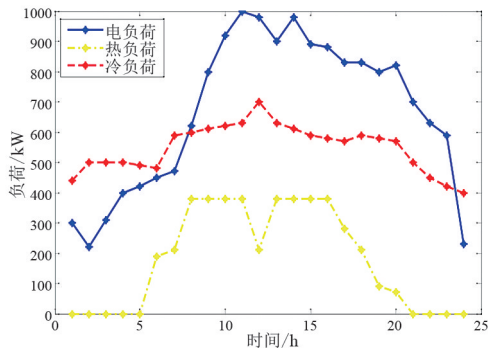


图 3 典型日冷、热、电负荷预测曲线

表 4 主要污染物处理成本 单位:元/kg

污染物	SO <sub>2</sub> (R <sub>1</sub> )	NO <sub>x</sub> (R <sub>2</sub> )	CO <sub>2</sub> (R <sub>3</sub> )
处理成本	14.834	61.964	0.211

表 5 主要发电方式污染物排放量 单位:g/kWh

发电方式	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>
燃煤	0.108 2~3.954 6	0.155 7~3.094 83	86.472 5
天然气	0.464 1	0.007 7~1.546 9	49.037 2
微型燃气轮机	0.000 92	0.618 8	184.082 9

表 6 某典型日分时电价 单位:元/kWh

时间段	用电价格 r <sub>i</sub>
1:00—4:00	0.3
4:00—7:00	0.4
7:00—10:00	0.5
10:00—14:00	0.8
14:00—19:00	0.6
19:00—22:00	0.7
22:00—24:00	0.3

注:标准电价 r<sub>0</sub> 为 0.5 元/kWh。

度分析,种群大小设置为 100,最优前端个体系数为 0.3,最大进化代数数为 200,停止代数数为 200,适应度函数值偏差为 1×10<sup>-100</sup>。

以某典型日负荷需求为例,图 4 给出了考虑实时需求管理优化的第一个前端个体分布情况;图 5—图 10 给出了实时用电需求管理的各微源出力情况;图 11 给出了综合考虑实时需求及电价激励的实时用电需求曲线与初始需求曲线。

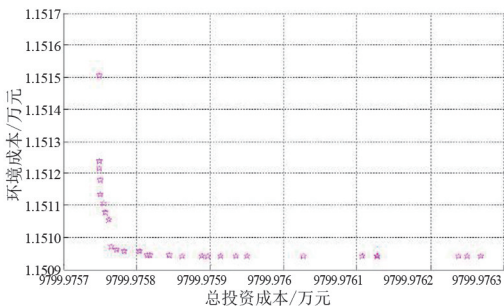


图 4 考虑实时需求管理的第一个前端个体分布

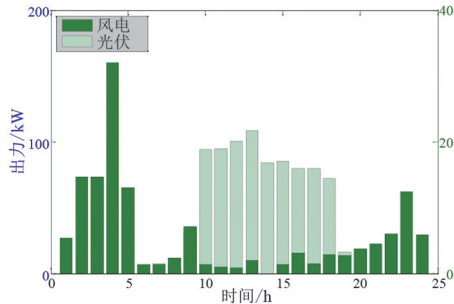


图 5 风电-光伏出力

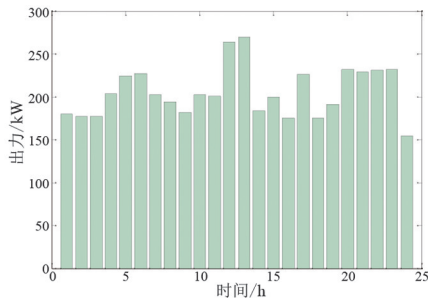


图 6 燃气轮机出力

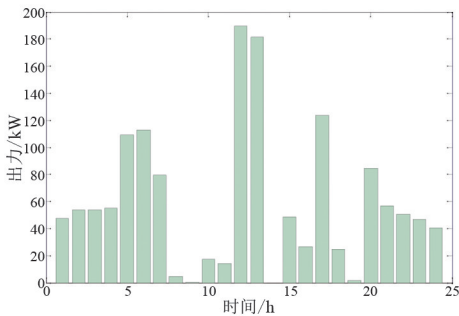


图 7 燃气锅炉出力

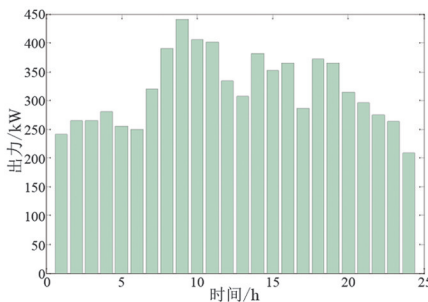


图 8 吸收式制冷机出力

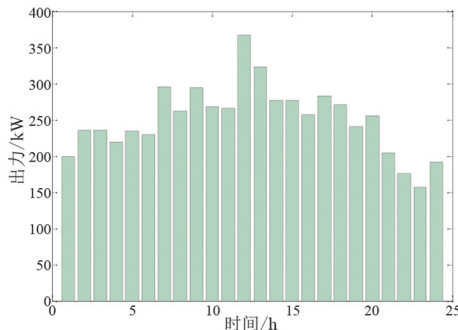


图 9 电制冷机出力

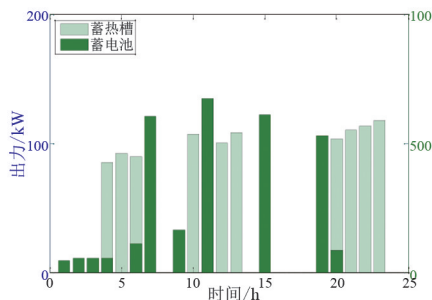


图 10 蓄电池、蓄热槽出力

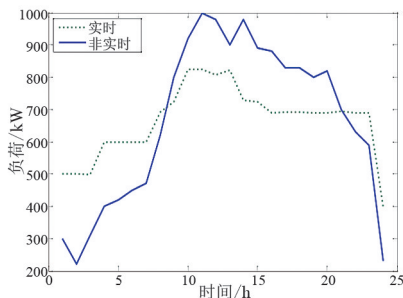


图 11 某典型日电负荷需求曲线对比

由图 11 可得,通过价格激励及用电舒适度优化,实时用电需求曲线明显平缓,初始用电高峰适度向非高峰区域转移。算例表明,考虑实施需求管理优化方法各微电源出力较为均衡,能源利用率相对较高。

## 5 结论

上面分析了冷热电联供型微电网优化现状,并建立了一个典型的冷热电微电网优化模型,分析了各微电源工作原理及出力特点;提出了一种基于日前初始用电负荷需求并结合电价激励及用户侧用电舒适度的综合实时用电需求优化模型;采用遗传算法的多目标优化算法进行优化,考虑实时需求管理模式进行仿真分析。实际算例证明,考虑实时需求管理优化方法使得用电需求曲线明显平缓,各微电源在各时段处理情况较不考虑实时需求管理时更为均衡,改善了各微电源出力不均衡带来的资源浪费、能源利用率低等问题。同时,由于在实时需求管理中兼顾用户侧用电舒适度问题,避免了由于电价激励带来的用户满意度低的问题。由于所用算例中价格激励参数设置相对简单,没有进行深入调研,致使价格激励带来的价格补偿费用增加,使得总成本相较不考虑实时用电需求管理模型稍有增加。

### 参考文献

[1] 杨玉峰.世界能源展望与能源形势报告系列评述之四

世界能源展望:科学与偏见[J].中国投资,2012(10):64-65.

- [2] 甘霖,陈瑜玮,刘育权,等.含可再生能源的微网冷-热-电多能流协同优化与案例分析[J].电力自动化设备,2017,37(6):275-281.
- [3] 戴瑞海,廖鸿图,施亦治,等.分时电价下考虑需求响应的微电网经济调度方法[J].重庆大学学报,2022,45(1):25-37.
- [4] 周晓倩,余志文,艾芊,等.含冷热电联供的微电网优化调度策略综述[J].电力自动化设备,2017,37(6):26-33.
- [5] 肖浩,裴玮,孔力.基于模型预测控制的微电网多时间尺度协调优化调度[J].电力系统自动化,2016,40(18):7-14.
- [6] GU Wei, WANG Zhihe, WU Zhi, et al. An online optimal dispatch schedule for CCHP microgrids based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2332-2342.
- [7] LI Xianchao, DONG Yi, ZOU Yuanyuan. Energy management of CCHP microgrid considering demand-side management [C]//32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), IEEE, 2017:240-245.
- [8] 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.
- [9] 刘蓉晖,李阳,孙改平,等.考虑含多种可控负荷的社区冷热电联供系统协同优化调度[J].可再生能源,2019,37(9):1317-1324.
- [10] 袁桂丽,董金凤,魏更,等.基于需求响应和多能互补的冷热电联产微电网优化调度[J].电力建设,2019,40(9):64-72.
- [11] 王帅飞,王维庆,王海云,等.基于可再生能源的冷热电联供系统优化[J].太阳能学报,2021,42(9):26-32.
- [12] SABERI Kasra, PASHAEI-DIDANI Hamed, NOUROLLAHI Ramin, et al. Optimal performance of CCHP based microgrid considering environmental issue in the presence of real time demand response [J]. Sustainable Cities and Society, 2019,45: 596-606.
- [13] 金红光,郑丹星,徐建中,等.分布式冷热电联产系统装置及应用[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [14] 谭碧飞,陈皓勇,梁子鹏,等.基于 CoPSO-BAS 的冷热电联供型微电网经济调度[J].广东电力,2019,32(9):85-93.
- [15] 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):11-15.