

DOI: 10.7667/PSPC180112

# 考虑需求侧协同响应的热电联供微网多目标规划

刘辉, 刘强, 张立, 周中锋

(河北冀研能源科学技术研究院有限公司, 河北 石家庄 050051)

**摘要:** 热电联供(Combined Heat and Power, CHP)型微网集成了多种分布式能源, 能源利用率较高, 具有光明的应用前景。科学合理的系统规划是 CHP 型微网经济、高效运行的基础。基于此提出考虑需求侧热、电协同响应的 CHP 型微网多目标规划方法, 规划目标兼顾经济指标和碳排放指标。需求侧热电协同响应模型基于建筑物和热水箱的热力学特性, 同时考虑可转移电负荷的调度, 从而建立基于需求侧协同响应的 CHP 型微网多目标混合整数线性规划模型。以居民区 CHP 型微网规划为例进行算例仿真, 验证了方法的有效性。结果表明, 应用需求侧热电协同响应可降低 CHP 型微网所需配置的燃气锅炉和储热罐容量, 使系统综合成本明显降低。

**关键词:** CHP 型微网; 需求侧热电协同响应; 多目标规划; 碳排放; 混合整数线性规划

## Multi-objective planning for combined heat and power microgrid considering demand side cooperative response

LIU Hui, LIU Qiang, ZHANG Li, ZHOU Zhongfeng

(Hebei Ji-Yan Energy Science and Technology Research Institute Company, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** Combined Heat and Power (CHP) microgrid integrates a variety of distributed energy sources and has high energy utilization rate, which brings it bright application prospects. Scientific and rational system planning is the foundation of economical and efficient operation of CHP microgrid. On this basis, a multi-objective planning method for CHP microgrid is proposed which considers demand side thermal and electric cooperative response. The objective function takes into account both economic and carbon emission. The demand side thermal and electric cooperative response model is based on the thermodynamic characteristics of buildings and hot water tank, and integrates the shiftable electrical load. A multi-objective Mixed Integer Linear Programming (MILP) model for CHP microgrid planning based on demand side cooperative response is proposed. The simulation is carried out on a residential CHP microgrid planning to validate the effectiveness of the model. The results show that the application of the demand side thermal and electrical cooperative response lowers the capacities of the gas boiler and the thermal storage tank required in the CHP microgrid, and reduces the overall cost obviously.

This work is supported by Science and Technology Department Foundation of Hebei Province (No. 0254528D).

**Key words:** combined heat and power microgrid; demand side thermal and electric cooperative response; multi-objective programming; carbon emission; MILP

## 0 引言

随着传统化石能源的日益枯竭, 如何有效利用风电、光伏等可再生能源, 进一步提高能源利用效率, 成为亟需解决的问题。热电联产(Combined Heat and Power, CHP)型微网集成了多种分布式能源, 为分布式风电和光伏就地消纳提供了支持<sup>[1-3]</sup>, 同时实

现了能源的梯级利用, 具有能源利用率高、环境污染小、维护方便等优点, 在近年来得到了广泛的关注, 成为一种潜力巨大的能源系统<sup>[4-6]</sup>。

CHP 型微网中包含燃气轮机、燃气锅炉、余热回收装置、换热装置、储能装置和风电、光伏等分布式发电单元等, 各个单元不同的特性使得 CHP 型微网的运行呈现出耦合性、非线性和随机性等特征<sup>[7-9]</sup>。燃气轮机和燃气锅炉等核心能量生产单元的合理配置, 是实现 CHP 型微网高效、经济运行的关

基金项目: 河北省科技厅基金项目资助(0254528D)

键,也是 CHP 型微网规划需要解决的首要问题<sup>[10-12]</sup>。文献[13]提出了一种冷热电联供型微网两阶段规划方法,第一个阶段使用多目标遗传算法确定系统设备的容量和类型,第二个阶段求解系统的最优调度问题。文献[14]考虑负荷和可再生能源的不确定性,提出了联产系统两阶段随机规划模型,并使用遗传算法和蒙特卡洛算法进行求解。文献[15]建立了含有可再生能源和储能装置、基于区域热网的 CHP 系统的规划模型,并指出储热装置对提高负荷波动较大、可再生能源比例较高的联产系统经济效益具有重要作用。上述研究对 CHP 型微网的规划奠定了重要的理论基础,但并未充分考虑系统规划经济性、环保性等多重目标。在多目标规划方面,文献[16]针对冷热电联供系统,建立了包含综合能源、经济和环境效益三个目标的规划模型,使用粒子群算法进行求解得出系统最佳的设备容量和运行参数。文献[17]基于能源、环境、经济性评价标准,采用层次分析法对冷热电三联产系统进行了多目标优化及评估。文献[18]考虑了经济性和环保性两个目标,首先采用生命周期评估法评估了不同 CHP 型微网规划方案的环境影响,然后将其与经济性目标结合构成多目标规划方法。

然而上述研究并未充分考虑利用需求侧响应方法来提高系统规划方案的经济性、环保性等目标。由于 CHP 型微网的热电生产具有较强的耦合特性,因此负荷的热电比对系统运行效率有着较大的影响<sup>[19-21]</sup>,利用储热装置及建筑物储热特性来实现热能量的灵活供应在近年来得到了广泛的关注。文献[22]利用储热装置实现了 CHP 型微网中热能在时域内的调节,研究了储热装置对系统运行经济性的影响。文献[23]基于灵活供热和可转移负荷,建立了热、电需求侧响应模型,提出了居民区能量集线器(Energy hub)的热、电能量优化方法。

基于此,本文提出了基于需求侧热、电联合响应的 CHP 型微网多目标规划方法。首先,基于建筑物和用户热水器的热力学特性,分别建立了供暖响应模型和生活热水响应模型,结合可转移电负荷,构成需求侧热、电协同响应模型;其次,在优化目标中同时考虑了 CHP 型微网的经济指标与碳排放指标,构成 CHP 型微网规划的综合目标;最后,建立了 CHP 型微网混合整数线性规划模型,该模型可确定系统燃气轮机、燃气锅炉和储能设备的最佳容量。算例仿真中,通过 Energy Plus 模拟出负荷全年小时的热、电负荷,利用蒙特卡洛方法模拟光伏单元全年小时功率,使用 CPLEX 和 Matlab 软件对模型进行求解。仿真中设置了不应用需求响应技术、

仅应用电负荷响应技术以及应用需求侧热、电协同响应技术三个场景,对比分析了三种场景下的经济性、环保性指标、容量配置和设备运行工况。仿真结果表明,应用需求侧热、电协同技术可降低 CHP 型微网所需燃气锅炉和储热罐的容量。同时,与不应用需求响应技术相比,应用电负荷响应技术仅使系统综合成本降低 0.22%,而应用需求侧热、电协同响应技术可使系统综合成本降低 2.7%,给系统带来显著的经济效益及环保效益。

## 1 CHP 型微网结构与规划

### 1.1 CHP 型微网结构

典型的 CHP 型微网结构如图 1 所示。CHP 型微网内部集成了燃气轮机、储能装置和风电、光伏等可再生能源。并网型 CHP 型微网与电网连接,既可向电网购电,也可向电网售电。由于系统中存在热、电两种能量形式,其内部运行较为复杂,且负荷和可再生能源存在一定的随机性,因此系统中各个设备间需经过科学、合理的规划才能保证 CHP 型微网安全、经济、高效地运行。系统中余热回收装置和换热装置起到能量转换作用,通常根据燃气轮机和燃气锅炉的容量确定其容量。因此 CHP 型微网的规划需要确定系统中燃气轮机、燃气锅炉和储能设备的容量<sup>[24-25]</sup>。

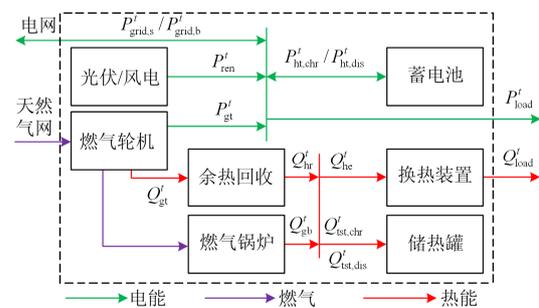


图 1 CHP型微网典型结构

Fig. 1 Typical structure of CHP microgrid

### 1.2 CHP 型微网规划

CHP 型微网的规划是一个系统性的工作。首先需要采集所在区域用户的热、电负荷数据、建筑物类型等参数,建立用户负荷预测模型,对未来用户的热、电需求做出科学的预测;其次,建立 CHP 型微网的规划模型,基于负荷数据进行求解,确定系统中各设备的最佳容量;最后,需对规划方案进行评估与论证,对规划做进一步的完善。本文重点研究 CHP 型微网规划模型,结合需求侧热、电协同响应技术,发掘 CHP 型微网规划的优化空间,达到提高系统的经济性与环保性的目的。

## 2 基于 IDR 的 CHP 型微网规划建模

### 2.1 目标函数

CHP 型微网规划目标函数包含经济性指标和环境指标两个方面。本文中, 经济性指标包含机组年投资成本、燃料费用、电网能量交互费用和实际需求侧响应的补偿费用, 环境指标考虑燃气轮机、燃气锅炉和电网电能生产的二氧化碳排放量。

#### 2.1.1 经济性指标

##### 1) 年投资成本

CHP 型微网中燃气轮机、燃气锅炉和储能设备的年投资成本为

$$C_{inv} = R \cdot \left( c_{gt,inv} P_{gt}^{cap} + c_{gb,inv} Q_{gb}^{cap} + c_{bt,inv} Cap_{bt} + c_{lst,inv} Cap_{lst} \right) \quad (1)$$

$$R = \frac{r \cdot (1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad (2)$$

式(1)中:  $R$  为资金回收率;  $c_{gt,inv}$ 、 $c_{gb,inv}$  为燃气轮机和燃气锅炉的单位容量初始投资成本, 元/kW;

$P_{gt}^{cap}$ 、 $Q_{gb}^{cap}$  分别为燃气轮机和燃气锅炉的容量, kW;

$c_{bt,inv}$ 、 $c_{lst,inv}$  分别为蓄电池和储热罐的单位容量初始投资成本, 元/kWh;  $Cap_{bt}$ 、 $Cap_{lst}$  分别为蓄电池和储热罐的容量, kWh。式(2)中,  $y$  为设备的使用寿命, 年;  $r$  为银行利率值。

##### 2) 运行和维护费用

CHP 型微网年运行和维护费用为

$$C_{om} = \sum_{t=1}^M \left( c_{gt,om} P_{gt}^t + c_{gb,om} Q_{gb}^t + c_{bt,om} P_{bt,dis}^t + c_{lst,om} Q_{lst,dis}^t \right) \quad (3)$$

式中:  $M$  为调度周期时长, h, 本文取为 8 760;  $c_{gt,om}$ 、 $c_{gb,om}$ 、 $c_{bt,om}$  和  $c_{lst,om}$  分别为燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池和储热罐的单位运行维护成本, 元/kWh;

$P_{gt}^t$ 、 $Q_{gb}^t$  分别为燃气轮机和燃气锅炉在  $t$  时段的功率, kW;  $P_{bt,dis}^t$ 、 $Q_{lst,dis}^t$  分别为蓄电池和储热罐在  $t$  时段的放电、放热功率, kW。

##### 3) 天然气费用

CHP 型微网的年天然气费用为

$$C_{ng} = c_{ng} \sum_{t=1}^M \left( \frac{P_{gt}^t}{\eta_{gt}} + \frac{Q_{gb}^t}{\eta_{gb}} \right) \Delta t \quad (4)$$

式中:  $c_{ng}$  为购买天然气的单位热值价格, 元/kWh;  $\eta_{gt}$  为燃气轮机的发电效率;  $\eta_{gb}$  为燃气锅炉的产热效率。

##### 4) 电网能量交换费用

CHP 型微网与电网交换费用包含从电网购电成本和向电网售电所获收益两个部分, 因此能量交换成本为

$$C_{grid} = \sum_{t=1}^M \left( c_{grid,b}^t \cdot P_{grid,b}^t - c_{grid,s}^t \cdot P_{grid,s}^t \right) \Delta t \quad (5)$$

式中:  $c_{grid,b}^t$ 、 $c_{grid,s}^t$  分别为  $t$  时刻 CHP 型微网向电网购电和售电价格, 元/kWh;  $P_{grid,b}^t$ 、 $P_{grid,s}^t$  分别为  $t$  时刻 CHP 型微网从电网购电功率和向电网售电功率, kW。

##### 5) 用户补偿费用

CHP 型微网实施热、电负荷响应的补偿费用为

$$C_{comp} = c_{comp} \sum_{t=1}^M P_{out}^t \Delta t \quad (6)$$

式中:  $c_{comp}$  为可转移负荷的补偿价格, 元/kWh;  $P_{out}^t$  为  $t$  时刻用户转移出的电功率, kW。由于热负荷在用户舒适度范围内进行响应, 本文不考虑其补偿费用。

#### 2.1.2 环境指标

CHP 型微网的环境指标考虑系统的碳排放量, 包含 CHP 型微网的碳排放量以及向电网购买电能所对应的碳排放量, 因此总碳排放量为

$$C_{CO_2} = \sum_{t=1}^M \left( m_{gt} \cdot P_{gt}^t + m_{grid} \cdot P_{grid,b}^t \right) \Delta t \quad (7)$$

式中,  $m_{gt}$ 、 $m_{grid}$  分别为燃气轮机和电网生产单位电能的  $CO_2$  排放量。

#### 2.1.3 综合目标

基于以上的分析, CHP 型微网多目标规划的目标函数为

$$C_{sum} = \omega_1 \cdot \left( C_{inv} + C_{om} + C_{ng} \right) + \omega_2 \cdot C_{CO_2} \quad (8)$$

式中,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为权重因子。其大小反映了各指标的重要性, 且一般取  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

## 2.2 约束条件

### 2.2.1 CHP型微网约束

CHP 型微网约束包含 CHP 型微网与电网能源交换约束、系统功率平衡约束、设备功率约束和储能装置约束等。

#### 1) 与电网的能量交换约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{grid,b}^t \leq \varepsilon_{grid,b}^t \cdot P_{grid,b}^{max} \\ 0 \leq P_{grid,s}^t \leq \varepsilon_{grid,s}^t \cdot P_{grid,s}^{max} \\ \varepsilon_{grid,b}^t + \varepsilon_{grid,s}^t = 1, \varepsilon_{grid,b}^t, \varepsilon_{grid,s}^t \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{grid,b}^{max}$ 、 $P_{grid,s}^{max}$  分别为 CHP 向电网购电功率和售电功率的最大值, kW;  $\varepsilon_{grid,b}^t$ 、 $\varepsilon_{grid,s}^t$  分别为  $t$  时刻 CHP 型微网购电、售电的状态变量。

#### 2) 功率平衡约束

$$\begin{cases} Q_{gt}^t = \alpha P_{gt}^t \\ Q_{hr}^t = \eta_{hr} Q_{gt}^t \\ Q_{he}^t = \eta_{he} Q_{hr}^t \\ \begin{cases} P_{grid,b}^t + P_{gt}^t + P_{ren}^t + P_{bt,dis}^t = \\ P_{grid,s}^t + P_{bt,chr}^t + P_{load}^t \end{cases} \\ Q_{hr}^t + Q_{gb}^t + Q_{tst,dis}^t = Q_{tst,chr}^t + Q_{he}^t \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\alpha$  为 CHP 型微网中燃气轮机的热电比;  $\eta_{hr}$ 、 $\eta_{he}$  分别为 CHP 型微网中余热回收装置和换热装置的效率;  $Q_{hr}^t$  为  $t$  时刻余热回收装置的输出功率, kW;  $Q_{he}^t$  为  $t$  时刻换热装置的输入功率, kW;  $P_{ren}^t$  为  $t$  时刻 CHP 型微网中风电、光伏等可再生能源的发电功率, kW;  $P_{bt,chr}^t$ 、 $P_{bt,dis}^t$  分别为  $t$  时刻 CHP 型微网中蓄电池的充、放电功率, kW;  $Q_{tst,chr}^t$ 、 $Q_{tst,dis}^t$  分别为  $t$  时刻 CHP 型微网中储热装置的蓄热、放热功率, kW;  $P_{load}^t$ 、 $Q_{load}^t$  分别为  $t$  时刻 CHP 型微网中电负荷功率和热负荷功率, kW。

### 3) 设备功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{gt}^t \leq P_{gt}^{cap} \\ 0 \leq Q_{gb}^t \leq Q_{gb}^{cap} \\ 0 \leq Q_{hr}^t \leq Q_{hr}^{max} \\ 0 \leq Q_{he}^t \leq Q_{he}^{max} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $Q_{hr}^{max}$  和  $Q_{he}^{max}$  分别表示余热回收装置和换热装置的最大功率, kW。

### 4) 蓄电池运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{bt,chr}^t \leq \varepsilon_{bt,chr}^t \cdot \gamma_{bt,chr} \cdot Cap_{bt} \\ 0 \leq P_{bt,dis}^t \leq \varepsilon_{bt,dis}^t \cdot \gamma_{bt,dis} \cdot Cap_{bt} \\ \varepsilon_{bt,chr}^t + \varepsilon_{bt,dis}^t = 1 \\ \varepsilon_{bt,chr}^t, \varepsilon_{bt,dis}^t \in \{0, 1\} \\ W_{bt}^{t+\Delta t} = \left\{ \begin{aligned} & (1 - \sigma_{bt}) W_{bt}^t + \\ & \left( \eta_{bt,chr} P_{bt,chr}^t - \frac{P_{bt,dis}^t}{\eta_{bt,dis}} \right) \Delta t \end{aligned} \right\} \\ \gamma_{bt}^{min} \cdot Cap_{bt} \leq W_{bt}^t \leq \gamma_{bt}^{max} \cdot Cap_{bt} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\varepsilon_{bt,chr}^t$ 、 $\varepsilon_{bt,dis}^t$  分别为  $t$  时段蓄电池的充、放电 0-1 变量, 0-1 变量的引入保证蓄电池在同一时段只处于充、放电状态中的一种;  $\gamma_{bt,chr}$ 、 $\gamma_{bt,dis}$  分别为蓄电池的最大充电、放电率;  $W_{bt}^t$ 、 $W_{bt}^{t+\Delta t}$  分别表示蓄电池在  $t$  时段和  $t+1$  时段的蓄电量, kWh;  $\sigma_{bt}$  为蓄电池的自放电率;  $\eta_{bt,chr}$ 、 $\eta_{bt,dis}$  分别为蓄电池的充电效率和放电效率;  $\gamma_{bt}^{min}$ 、 $\gamma_{bt}^{max}$  为蓄电池的最小蓄电量和最大蓄电量系数, kWh。

### 5) 储热罐运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq Q_{tst,chr}^t \leq \varepsilon_{tst,chr}^t \cdot \gamma_{tst,chr} \cdot Cap_{tst} \\ 0 \leq Q_{tst,dis}^t \leq \varepsilon_{tst,dis}^t \cdot \gamma_{tst,dis} \cdot Cap_{tst} \\ \varepsilon_{tst,chr}^t + \varepsilon_{tst,dis}^t = 1 \\ \varepsilon_{tst,chr}^t, \varepsilon_{tst,dis}^t \in \{0, 1\} \\ W_{tst}^{t+\Delta t} = \left\{ \begin{aligned} & (1 - \sigma_{tst}) W_{tst}^t + \\ & \left( \eta_{tst,chr} Q_{tst,chr}^t - \frac{Q_{tst,dis}^t}{\eta_{tst,dis}} \right) \Delta t \end{aligned} \right\} \\ \gamma_{tst}^{min} \cdot Cap_{tst} \leq W_{tst}^t \leq \gamma_{tst}^{max} \cdot Cap_{tst} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\varepsilon_{tst,chr}^t$ 、 $\varepsilon_{tst,dis}^t$  分别为  $t$  时段储热罐储、放热状态变量;  $\gamma_{tst,chr}$ 、 $\gamma_{tst,dis}$  分别为储热罐最大储、放热率;  $W_{tst}^t$ 、 $W_{tst}^{t+\Delta t}$  分别表示储热罐在  $t$  时段和  $t+\Delta t$  时段蓄热量, kWh;  $\sigma_{tst}$  为储热罐的自放热率;  $\eta_{tst,chr}$ 、 $\eta_{tst,dis}$  分别为储热罐的储热效率和放热效率;  $\gamma_{tst}^{min}$ 、 $\gamma_{tst}^{max}$  为储热罐的最小储热量和最大储热量系数, kWh。

### 2.2.2 需求侧协同响应约束

#### 1) 热负荷响应

本文假设 CHP 型微网中负荷包含供暖需求、生活热水需求和电需求。建筑物室温和供暖功率有如式(14)所示关系。

$$T_{in}^{t+\Delta t} = T_{in}^t \cdot e^{-\Delta t/\tau} + (R_h \cdot Q_{load}^t + T_{out}^t) \cdot (1 - e^{-\Delta t/\tau}) \quad (14)$$

式中:  $T_{in}^t$ 、 $T_{in}^{t+\Delta t}$  分别为  $t$  和  $t+\Delta t$  时刻建筑物的室内温度, °C;  $R_h$  为建筑物的等效热阻, °C/kW;  $\tau = R_h \cdot C_{air}$ , h;  $C_{air}$  为室内空气热容, kWh/°C。

为了保证室温在舒适的范围内, 有如式(15)约束。

$$T_{in}^{min} \leq T_{in}^t \leq T_{in}^{max} \quad (15)$$

式中,  $T_{in}^{min}$ 、 $T_{in}^{max}$  分别为人体感到舒适的最低室温和最高室温, °C。

用户热水器中热水温度方程如式(16)。

$$T_w^{t+\Delta t} = \frac{1}{V_w} \left( V_w T_w^t - V_{w,out}^t (T_w^t - T_{w,cold}) + Q_w^t \right) \quad (16)$$

式中:  $T_w^t$ 、 $T_w^{t+\Delta t}$  分别为  $t$ 、 $t+\Delta t$  时刻热水器中热水的温度, °C;  $V_w$  为热水器的总体积, L;  $V_{w,out}^t$  为  $t$  时刻用户用掉的热水体积, L;  $T_{w,cold}$  为补充入热水器的冷水温度, °C;  $Q_w^t$  为向  $t$  时刻热水器提供的热功率, kW。

为保证热水器中热水的温度在允许的范围内, 有如下约束, 如式(17)。

$$T_w^{min} \leq T_w^t \leq T_w^{max} \quad (17)$$

式中,  $T_w^{min}$ 、 $T_w^{max}$  分别为允许的最低温度和最高温度, °C。

式(14)、式(15)即为热负荷响应模型。该模型表明,建筑物的供暖功率可在一定范围内波动。

## 2) 电负荷响应

本文中电负荷响应考虑可转移负荷的调度,其约束如式(18)。

$$(18) \quad \begin{cases} 0 \leq P_{in}^t \leq \varepsilon_{in}^t \cdot P_{in}^{\max} \\ 0 \leq P_{out}^t \leq \varepsilon_{out}^t \cdot P_{sft}^t \\ \sum_{t=1}^M P_{in}^t = \sum_{t=1}^M P_{out}^t \\ \varepsilon_{in}^t + \varepsilon_{out}^t = 1 \\ \varepsilon_{in}^t, \varepsilon_{out}^t \in \{0, 1\} \\ P_{load}^t = P_{fix}^t + P_{sft}^t + P_{in}^t - P_{out}^t \end{cases}$$

式中:  $P_{in}^t$  为  $t$  时刻转入的电功率, kW;  $P_{out}^t$  为  $t$  时刻转出的电功率, kW;  $P_{in}^{\max}$  为可转入电功率的最大值, kW;  $P_{sft}^t$  为  $t$  时刻电负荷中的可转移功率部分, kW;  $\varepsilon_{in}^t$ 、 $\varepsilon_{out}^t$  分别为  $t$  时刻电功率转入和转出状态变量;  $P_{fix}^t$  为  $t$  时刻电负荷中的固定功率, kW。

上述目标函数和约束条件构成 CHP 型微网多目标规划模型,该模型为混合整数线性规划模型,可使用 CPLEX、GUROBI 等软件进行求解。

## 3 算例分析

以中国北方某居民区 CHP 型微网规划为例进行算例仿真。CHP 型微网从 10 月初到次年 2 月末给居民供暖,全年供应热水和电能。假定该居民区共有居民 1 000 户,全年的小时负荷数据采用 Energy Plus 进行模拟,负荷曲线如图 2 所示。假设系统中已配置容量为 500 kW 的分布式光伏发电系统,使用蒙特卡洛模拟得到的光伏功率曲线如图 3 所示。算例中 CHP 型微网不配置蓄电池,利用本文提出的模型确定系统中燃气轮机(GT)、燃气锅炉(GB)和储热罐(TST)的最佳容量。

仿真中,系统中设备参数如表 1 所示。CHP 型微网向电网购电电价如表 2 所示。同时假设设备

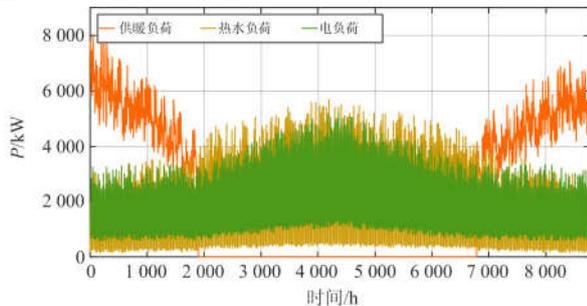


图 2 用户热、电负荷年数据曲线

Fig. 2 Curves of annual heat and power load

使用寿命  $y$  为 20 年,银行利率  $r$  取为 6.7%。燃气轮机(含余热回收装置)、燃气锅炉和储热罐的投资成本分别取 6 800 元/kW、200 元/kW 和 200 元/kW。目标函数中  $\omega_1$  和  $\omega_2$  均取 0.5。为了比较应用热、电负荷协同响应的效果,设置三个场景进行仿真,场景 1 中热、电负荷不可调,场景 2 仅应用电负荷响应技术,场景 3 中应用热、电负荷协同响应技术。

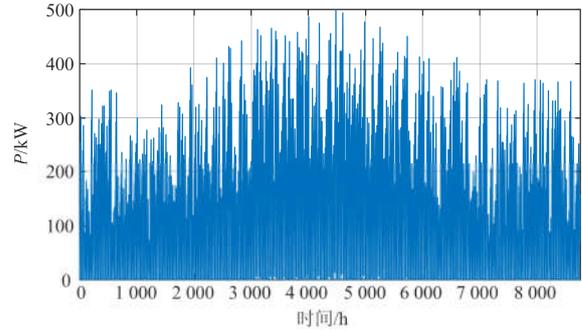


图 3 光伏功率曲线

Fig. 3 Curves of annual photovoltaic power

表 1 设备和负荷参数

Table 1 Parameters of devices and load

设备/负荷	参数	数值	
CHP 系统参数	$\alpha$	2.3	
	GT	$\eta_{gt}$	0.3
	GB	$\eta_{gb}$	0.8
	HR	$\eta_{hr}$	0.73
	HE	$\eta_{he}$	0.9
	TST	$W_{lst}^0$	0
		$W_{lst}^{\min}$	0
	负荷参数	$\gamma_{lst,chr}$	0.2
		$\gamma_{lst,dis}$	0.4
		$\eta_{lst,chr}$	0.95
$\eta_{lst,dis}$		0.95	
$\sigma_{lst}$		0.02	
供暖		$C_{air}$	0.525
		$T_{in}^{\min}$	18
热水	$T_{in}^{\max}$	24	
	$T_w^{\min}$	35	
	$T_w^{\max}$	45	

表 2 购电电价(元/kWh)

Table 2 Electricity price of the grid

分段	时段	价格/(元/kWh)
峰段	8:00—11:00, 17:00—22:00	0.627
平段	06:00—08:00, 11:00—17:00	0.527
谷段	22:00—06:00	0.427

### 3.1 CHP 型微网配置结果

三种场景下燃气轮机(GT)、燃气锅炉(GB)和储热罐(TST)的最优容量如表 3 所示。结果表明, 场景 2 所需的 GT 容量最小, 且场景 2 与场景 1 相比降低并不明显, 场景 3 所需 GT 容量最大。场景 1 和场景 2 中 GB 和 TST 的容量相同, 均大于情景 3 的结果, 且相差较为明显。可见: 仅考虑电负荷响应时, 可通过电负荷的转移稍微降低系统所需 GT 容量, 但对 GB 和 TST 的容量无明显影响; 而需求侧热、电协同响应的应用, 使负荷侧的热、电需求可在一定范围内灵活调度, 特别是热需求的灵活性显著提高, 从而使系统 CHP 型微网所需配置的 GB 和 TST 容量大大减小。

表 3 设备容量

Table 3 Capacities of devices

设备	GT/MW	GB/MW	TST/MWh
场景 1	4.85	7.84	4.26
场景 2	4.83	7.84	4.26
场景 3	4.98	5.07	2.98

三种场景下的目标函数值及各项成本如表 4 所示。与场景 1 相比, 场景 2 除补偿成本外的各项成本均较低, 且向电网售电收入较高, 场景 2 的综合目标比场景 1 下降 0.22%, 可见电负荷响应技术的应用通过合理的电负荷转移降低了系统配置与运行成本。场景 3 由于所配置的燃气轮机容量略大, 考虑到燃气轮机的单位投资成本较大, 其投资成本略大于场景 1。而场景 3 中, CHP 型微网的购电成本较小, 且向电网售电所获得的收益较大, 同时其 CO<sub>2</sub> 排放明显小于场景 1。

表 4 两种场景下的各项成本

Table 4 Costs in two cases

万元				
成本	$C_{inv}$	$C_{om}$	$C_{ng}$	$C_{grid,b}$
场景 1	326.40	3.78	2 557.37	213.21
场景 2	325.15	3.77	2 556.54	211.78
场景 3	327.10	3.96	2 584.20	190.55
成本	$C_{grid,s}$	$C_{comp}$	$C_{co_2}$	$C_{sum}$
场景 1	638.28	0	202.68	1 332.70
场景 2	641.34	2.37	202.38	1 329.71
场景 3	708.35	3.04	192.24	1 296.36

综合目标上, 场景 3 比场景 1 降低 2.7%, 比场景 2 降低 2.5%, 可见需求侧热、电联合响应技术相比于单纯的电负荷响应技术具有更大的优势, 给 CHP 型微网带来了可观的经济效益与环保效益。图 4 直观地给出了三种场景下的各项成本比较, 可见

三种场景下天气燃气成本均占了较大比重, 维护费用和补偿费用均较小。

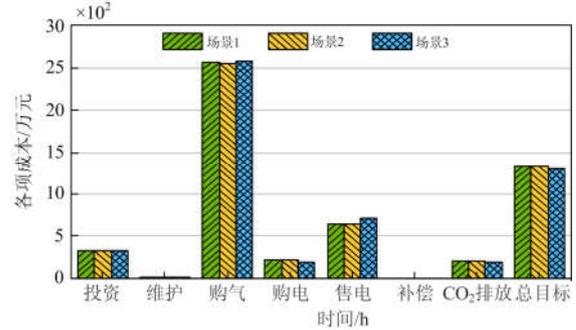


图 4 三种场景下的各项成本对比

Fig. 4 Comparison of costs in three cases

### 3.2 CHP 型微网运行结果

由于场景 1 和场景 2 中 CHP 型微网的配置结果极为接近, 一方面场景 2 在综合目标上仅比场景 1 降低 0.22%, 另一方面两个场景下系统运行仿真结果差异较不明显, 因此下文仅对场景 1 和场景 3 的 CHP 型微网运行结果进行分析与对比。

#### 1) 燃气轮机和燃气锅炉工况

场景 1、3 中燃气轮机和燃气锅炉的全年运行状况分别如图 5、图 6 所示。由于 CHP 型微网在 10 月初到次年 2 月末同时供暖和提供热水, 因此热负荷较大, 在该时间段两种场景下燃气轮机的出力均较大, 且热功率基本在 5 MW 以上, 同时燃气锅炉均工作。而在其他时间段, 由于 CHP 只需满足热水负荷, 系统热负荷较小, 两种场景下燃气锅炉均不工作, 燃气轮机即可满足负荷的热需求, 且燃气轮机的出力波动范围较大。

比较两种场景下的燃气锅炉出力可以看出, 场景 1 中随着供暖需求的下降, 燃气锅炉出力呈现明显的下降趋势, 燃气锅炉的出力与供暖需求呈现出

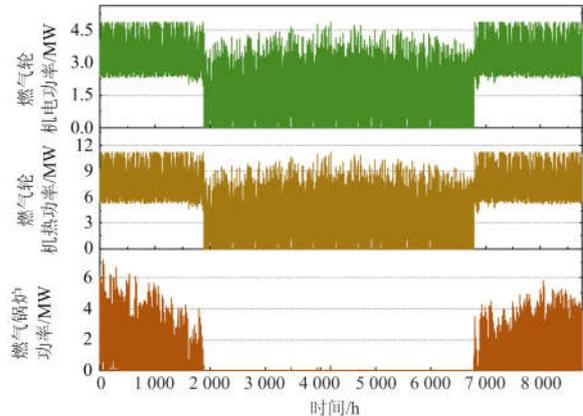


图 5 场景1中燃气轮机和燃气锅炉的出力

Fig. 5 Power of gas turbine and gas boiler in case 1

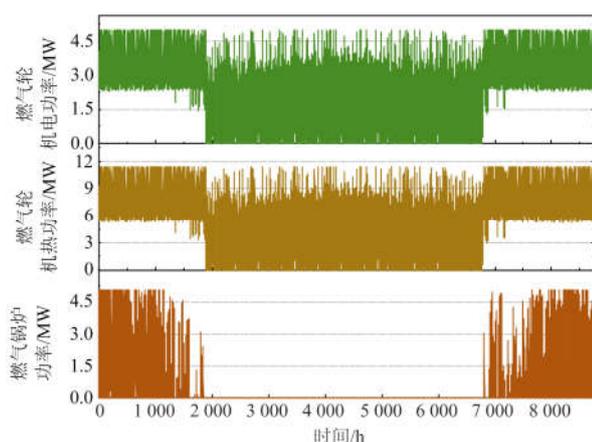


图6 情景3中燃气轮机和燃气锅炉的出力

Fig. 6 Power of gas turbine and gas boiler in case 3

较强的关联。而场景3中燃气锅炉的出力仅在供暖负荷较低时,才呈现出下降趋势,可见热、电负荷协同响应的应用在一定程度上提高了设备的利用率。

## 2) CHP型微网购/电和储热罐工况

场景1、3中CHP型微网购/售电功率和储热罐蓄/放热功率分别如图7、图8所示。结果表明,在供热季,两种场景下CHP型微网均不向电网购电,而仅向电网售电。此时由于热负荷较高,微网中燃气轮机在满足热需求的同时产生了较多的电能以输向电网。比较两种场景可知,在供暖季,场景3售电功率大于场景1,这是由于单独用燃气轮机产热其经济性和环保性比燃气锅炉差,场景1所配置的燃气锅炉容量较大,因此燃气轮机产热较少,所产生的电能较少。在非供暖季,由于生活热水负荷高低波动较大,两种场景下,CHP型微网和电网的电能交互均较为频繁。

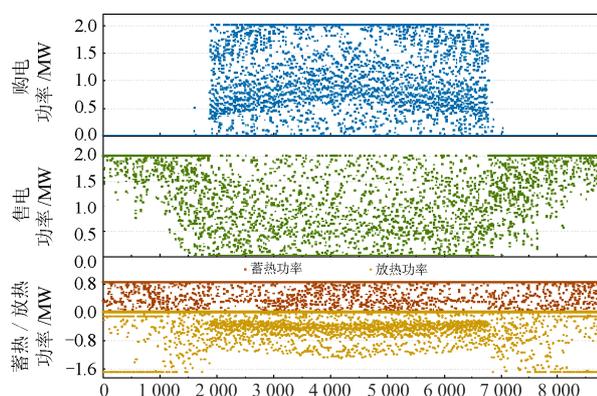


图7 场景1中购/售电功率及储热罐工况

Fig. 7 Buying/selling power and thermal tank working condition in case 1

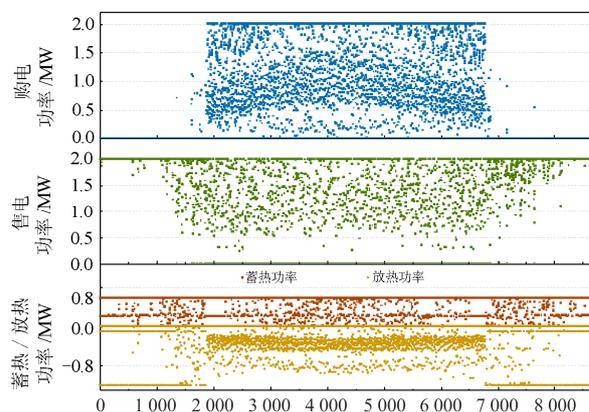


图8 场景3中购/售电功率及储热罐工况

Fig. 8 Buying/selling power and thermal tank working condition in case 3

此外,两种场景下储热罐的工况也因供暖季/非供暖季热负荷的不同而呈现出不同的特性。在供暖季,储热罐的放热功率均较大,有效地参与了供热调节。而在非供暖季,储热罐的放热功率相对较小。

## 3) 燃气轮机和燃气锅炉负荷率

为了进一步比较两种场景下设备的负荷率,对全年燃气轮机和燃气锅炉的负荷率进行频率统计,对负荷率区间 $[0, 1]$ 取10个区间,每个区间长度为0.1。燃气轮机和燃气锅炉负荷率频次柱状图分别如图9、图10所示。图9表明,在负荷率0.5以上,场景3的频次略大于场景1(除了负荷率为0.75时),在负荷率0.1~0.5的区间内,两种场景结果差别不大。但在负荷率0.05的频次中,场景1的结果明显大于场景3。考虑到两种场景下燃气轮机的容量相差不大,因此可认为场景3中燃气轮机的工况要优于场景1。主要原因是场景3中热、电负荷协同响应的应用,实现了热电负荷在时域内的灵活调节,达到较优的组合,充分发挥了燃气轮机热电产生的优势。

图10的结果对比较为明显,负荷率在0.65以上时,场景3的频次明显大于场景1,此时场景1的频次较小。而当负荷率在0.65以下时,场景1结果明显大于场景3。结合图5、图6可知,在非供暖季燃气锅炉不工作,因此燃气锅炉负荷率为0的频次较高,场景1、场景3分别为6937、7102,可见燃气炉机的经济效益和排放特性均较差,因此在优化时总是优先选择燃气轮机产热,从而使燃气锅炉的全年利用率较低。另一方面,场景1中所配置的燃气锅炉容量较大(7.84 MW),场景3的燃气锅炉容量较小(5.07 MW),由此可知,场景1中由于热、电负荷不可调,其设备必须满足各个时刻的需求,

因此全年负荷中存在热负荷极高的情况(尽管极少),使得必须配置容量较大的锅炉才可满足需求;而场景3中由于热、热负荷的协同调节,当热负荷较高时,可协同燃气轮机、燃气锅炉和储热装置共同供热,避免因为极少的极端情况而必须配置大容量设备的情况,从而有效地降低了系统的费用,提高了系统的经济性。

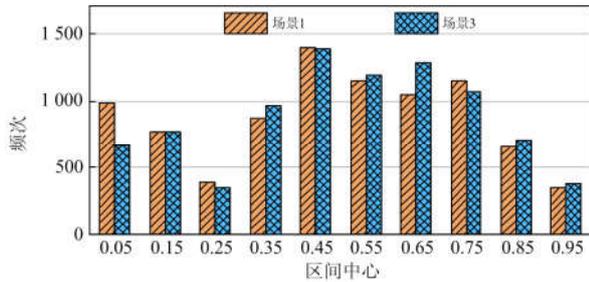


图9 燃气轮机负荷率频次统计

Fig. 9 Frequency statistic of the load rate of gas turbine

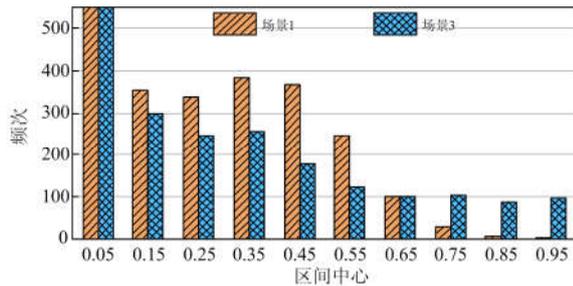


图10 燃气锅炉负荷率频次统计

Fig. 10 Frequency statistic of the load rate of gas boiler

### 4 结论

本文建立了基于需求侧热、电协同响应的 CHP 型微网多目标规划模型,规划目标考虑了系统初始投资成本、维护成本、燃气费用、电费和碳排放量。模型中考虑了供暖负荷和热水负荷的灵活供应。算例结果表明:需求侧热、电协同响应的应用,有效降低了系统所需配置的燃气锅炉和储热罐的容量,降低了系统碳排放,进一步提高了 CHP 型微网的经济性与环保性。

### 参考文献

[1] 许丹,丁强,黄国栋,等.考虑电网调峰的热电联产热负荷动态调度模型[J].电力系统保护与控制,2017,45(11):59-64.  
XU Dan, DING Qiang, HUANG Guodong, et al. Cogeneration unit dynamic scheduling model considering peak-load regulation ability[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 59-64.

[2] 宋卓然,赵琳,张子信,等.热电联产与风电机组联合运行滚动优化调度模型[J].电力系统保护与控制,2016,44(24):110-116.  
SONG Zhuoran, ZHAO Lin, ZHANG Zixin, et al. Rolling optimal model for multiple heating source and wind turbine unit[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 110-116.

[3] 任洪波,吴琼.分布式热电联产系统设计优化研究进展[J].热力发电,2017,46(1):11-16.  
REN Hongbo, WU Qiong. Design optimization for distributed combined heat and power cogeneration systems: research progress[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(1): 11-16.

[4] 胡康,陈群.电-热综合能源系统整体能效及灵活性改造方案分析[J].热力发电,2018,47(5):14-21.  
HU Kang, CHEN Qun. Overall energy efficiency and flexibility retrofit scheme analysis of heat-power integrated energy system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 14-21.

[5] 陈洁,杨秀,朱兰,等.基于遗传算法的热电联产型微网经济运行优化[J].电力系统保护与控制,2013,41(8):7-15.  
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Genetic algorithm based economic operation optimization of a combined heat and power microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 7-15.

[6] 杨秀,陈洁,朱兰,等.基于经济调度的微网储能优化配置[J].电力系统保护与控制,2013,41(1):53-60.  
YANG Xiu, CHEN Jie, ZHU Lan, et al. Optimization allocation of energy storage for microgrid based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 53-60.

[7] 白学祥,曾鸣,李源非,等.区域能源供给网络热电协同规划模型与算法[J].电力系统保护与控制,2017,45(5):65-72.  
BAI Xuexiang, ZENG Ming, LI Yuanfei, et al. The model and algorithm of thermoelectric collaborative planning of regional energy supply network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 65-72.

[8] 顾伟,陆帅,王珺,等.多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1316.  
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1316.

[9] 王珺,顾伟,张成龙,等.智能社区综合能源优化管理研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(1):89-97.

- WANG Jun, GU Wei, ZHANG Chenglong, et al. Research on integrated energy management for smart community[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 89-97.
- [10] LI L, MU H, GAO W, et al. Optimization and analysis of CCHP system based on energy loads coupling of residential and office buildings[J]. Applied Energy, 2014, 136: 206-216.
- [11] SEIJO S, DEL CAMPO I, ECHANOBE J, et al. Modeling and multi-objective optimization of a complex CHP process[J]. Applied Energy, 2016, 161: 309-319.
- [12] URIS M, LINARES J I, ARENAS E. Size optimization of a biomass-fired cogeneration plant CHP/CCHP (combined heat and power/combined heat, cooling and power) based on Organic Rankine Cycle for a district network in Spain[J]. Energy, 2015, 88: 935-945.
- [13] GUO L, LIU W, CAI J, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74(10): 433-445.
- [14] ZHOU Z, ZHANG J, LIU P, et al. A two-stage stochastic programming model for the optimal design of distributed energy systems[J]. Applied Energy, 2013, 103: 135-144.
- [15] WANG H, YIN W, ABDOLLAHI E, et al. Modelling and optimization of CHP based district heating system with renewable energy production and energy storage[J]. Applied Energy, 2015, 159: 401-421.
- [16] 魏大钧, 孙波, 赵峰, 等. 小型生物质沼气冷热电联供系统多目标优化设计与运行分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 7-12.
- WEI Dajun, SUN Bo, ZHAO Feng, et al. Multi-objective optimization design and operation analysis of a small biomass biogas combined cooling heating and power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 7-12.
- [17] 蒋润花, 曾蓉, 李洪强, 等. 考虑气候条件及建筑类型等因素的分布式冷热电三联产系统的多目标优化及评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3206-3214.
- JIANG Runhua, ZENG Rong, LI Hongqiang, et al. Multi-objective optimization and evaluation of distributed CCHP system considering influence of climate condition and building type[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3206-3214.
- [18] ZHANG D, EVANGELISTI S, LETTIERI P, et al. Optimal design of CHP-based microgrids: multiobjective optimization and life cycle assessment[J]. Energy, 2015, 85: 181-193.
- [19] PIRKANDI J, JOKAR M A, SAMETI M, et al. Simulation and multi-objective optimization of a combined heat and power (CHP) system integrated with low-energy buildings[J]. Journal of Building Engineering, 2016, 5: 13-23.
- [20] TASDIGHI M, GHASEMI H, RAHIMI-KIAN A. Residential microgrid scheduling based on smart meters data and temperature dependent thermal load modeling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 349-357.
- [21] 张冲, 胡林献, 胡佳. 热电机组比重及热负荷对风电消纳率影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 120-125.
- ZHANG Chong, HU Linxian, HU Jia. Research on the impact of the proportion of thermal power generating units and heat load on the wind power accommodation rate[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 120-125.
- [22] MIN J K, SONG H Y, PARK J B, et al. Optimization of CHP and thermal storage under heat demand[C] // 2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), June 1-3, 2016, Kathmandu, Nepal: 277-281.
- [23] BRAHMAN F, HONARMAND M, JADID S. Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system[J]. Energy and Buildings, 2015, 90: 65-75.
- [24] AHMADI P, ALMASI A, SHAHRIYARI M, et al. Multi-objective optimization of a combined heat and power (CHP) system for heating purpose in a paper mill using evolutionary algorithm[J]. International Journal of Energy Research, 2012, 36(1): 46-63.
- [25] GLAVAN I, PRELEC Z, PAVKOVIC B. Modelling, simulation and optimization of small-scale CCHP energy systems[J]. International Journal of Simulation Modelling, 2015, 14(4): 683-696.

收稿日期: 2018-01-24; 修回日期: 2018-05-23

作者简介:

刘辉(1981—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为高电压与绝缘技术、电气设备绝缘检测技术、分布式电源优化配置等; E-mail: liuh\_1981@126.com

刘强(1988—), 男, 学士, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、高电压与绝缘技术、高电压试验技术等;

张立(1979—), 男, 工程师, 主要研究方向为高压设备绝缘状态评估、电力系统继电保护装置检测等。

(编辑 葛艳娜)