

# Optimal Cooperative Scheduling in Multi-Energy Micro-Energy-System Considering Comprehensive Demand Response

Jun Liu<sup>1</sup>, Xiaolei Liu<sup>1</sup>, Xijun Gao<sup>2</sup>, Ling Wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Daxing'anling Power Supply Company, Heilongjiang Electric Power Co., Ltd., Daxing'anling Heilongjiang

<sup>2</sup>Beijing Smart China Energy Technology Development Co., Ltd., Beijing

Email: weilingleija@mail.tsinghua.edu.cn

Received: Nov. 10<sup>th</sup>, 2019; accepted: Nov. 27<sup>th</sup>, 2019; published: Dec. 4<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The optimal cooperative scheduling of multi-energy micro energy system can promote the integration of different energy forms and reduce energy production costs. Therefore, multi-energy micro energy system has become the main direction of energy system development. In this paper, the coordinated scheduling problem of different energy sources in micro energy system is studied. Considering the comprehensive demand response of thermal and cold loads and electrical loads as the means of optimal operation and regulation, a multi-objective micro energy system optimal scheduling model is established, which aims at the operation cost, comprehensive energy utilization efficiency and renewable energy consumption of micro energy system, and an improved genetic algorithm is used to solve the model. The paper takes the example of cooperative scheduling in different operation cases of micro energy network. The results show that CCHP and comprehensive demand response play an important role in improving the comprehensive energy utilization efficiency and energy supply reliability of the multi energy micro energy system. The feasibility of the model and method is verified by the examples.

## Keywords

Multi-Energy Micro-Energy-System, Optimal Cooperative Scheduling, Comprehensive Demand Response, Comprehensive Energy Utilization Efficiency

---

## 考虑综合需求响应的多能源微能网优化协同调度

刘 军<sup>1</sup>, 刘晓磊<sup>1</sup>, 高希骏<sup>2</sup>, 魏 玲<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国网黑龙江省电力有限公司, 大兴安岭供电公司, 黑龙江 大兴安岭

<sup>2</sup>北京智中能源科技发展有限公司, 北京

Email: weilinglejia@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2019年11月10日; 录用日期: 2019年11月27日; 发布日期: 2019年12月4日

## 摘要

多能源微能网优化运行可以促进不同能源形式相互融合和降低能源生产成本, 因此多能源微能网成为当今能源系统发展的主要方向。本文研究了微能网中不同能源的协同调度问题, 考虑将冷热负荷和电负荷的综合需求响应作为优化运行调节手段, 建立了以微能网的运行费用、综合能源效率以及可再生能源消耗量为目标的多目标微能网优化调度模型, 并采用一种改进的遗传算法求解模型。通过不同运行场景下微能网的协同调度算例, 表明了CCHP和综合需求响应对提高多能源微能网的综合能源利用效率和供能可靠性具有重要作用, 算例验证了模型和方法的可行性。

## 关键词

多能源微能网, 优化协同调度, 综合需求响应, 综合能源利用效率

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在能源互联网的大背景下, 多能源微能网成为了学术界热议的焦点[1] [2]。多能源微能网通常包括以CCHP 机组为核心的分布式能源站、天然气、外网电能、光伏、风电等多种能量形式的输入, 通过微电网、供冷、供热管道等供能网络的传输, 在一定区域内满足用能客户的用电、用冷、用热等多种需求。在多能源系统中, 不仅要保持电力平衡, 还要保证其他形式能源的供需平衡。为在多能源系统中保持可靠、可持续的能源供应, 提出了协同调度的概念[3] [4]。协同调度是根据不同时间尺度和空间尺度下的源、网和负荷之间的相互作用, 找出系统各部分最优运行状态的一种方法。通过协同调度, 可以得到最优的发电调度, 从而实现资源的优化配置。CCHP 系统[5]多年来一直被我们视为多能源微能网的核心。它由内燃机或微型燃气轮机、吸收式制冷机、吸收式热泵等组成。采用 CCHP 系统的好处包括但不限于: ① 由于燃烧产生的废热得到回收和再利用, 供热用化石燃料消耗减少, 碳排放减少。② 实现了能量的梯级利用, 提高了火用效率。③ 电力供应压力有所缓解, 尤其是在夏季电空调的大量使用的情形下。

电力需求响应[6] [7]是一种成熟的智能电网技术, 指消费者通过改变能源消费方式, 对电网进行削峰填谷等的, 现被广泛地应用于电网的需求侧, 电力需求响应为电力系统的优化运行起到了重要的作用。

现有的研究集中在供给侧的能源协同优化上, 负荷侧响应的研究则集中在传统的电力需求响应上, 针对多能协同微网的优化, 从源荷联合调度的优化策略研究还比较少[8] [9], 特别是在负荷侧考虑热负荷的需求响应更为少见。

在进行多能源微能网的协同调度研究时, 首先需要研究多能源微能网的建模问题。多能源微能网中涉及电、冷、热多种能量流, 在传统的电、热、冷等各自领域, 各系统的建模方法相对成熟。不同能量

流的不同时间尺度的动态特性的描述是多能源系统建模的关键问题。

本文研究了微能网中不同能源的协同调度问题。以冷热负荷和电负荷的综合需求响应作为优化运行调节手段，针对电、热不同时间尺度的动态特性，采用具有时延的热网模型来描述和约束，建立了以微能网的运行费用、综合能源效率以及可再生能源消耗量为目标的多目标微能网优化调度模型，并采用一种改进的遗传算法求解模型。以贵州某微能网为例，在不同运行场景下对微能网进行协同调度，计算结果表明 CCHP 和综合需求响应对提高多能源微能网的综合能源利用效率和供能可靠性具有重要作用，算例验证了模型和方法的可行性。

## 2. 多能源微能网协同调度建模

对多能源微能网中的多种能源进行协同调度是进一步提高其经济效益和环境效益的关键。本文将考虑多能源微能网的经济运行、能源利用效率及可再生能源利用率三个目标，利用多种能源之间的互补及电力热力需求响应的灵活性，建立微能网协同调度优化模型，进一步提高微能网的运行效率。

### 2.1. 多能源微能网系统建模

本文研究的多能源微能网系统结构如图 1 所示。

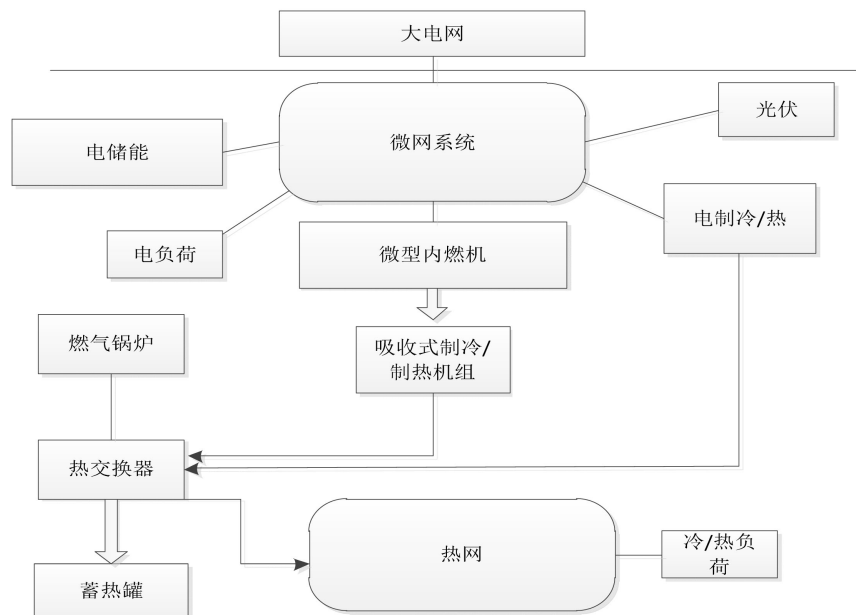


Figure 1. Multi-energy micro-energy-system structure  
图 1. 多能源微能网系统结构图

多能源微能网系统建模涉及电力、热力相关设备及网络以及转换设备的建模，电力相关模型已经非常成熟，本文仅列出与热相关的设备及网络建模。

#### 1) 内燃机

内燃机可以为面积在数万到数十万平方米之间的地区提供能源。模型中产生的余热由烟气热和水套水热组成。其数学表达式描述如下：

$$P_{ge} = \alpha_{GE} Q_{fuel} + b_{GE}$$

$$Q_{gas} = m_{GE} Q_{fuel} + n_{GE}$$

$$Q_{water} = P_{GE} Q_{fuel} + q_{GE}$$

$$P_{ge\_min} \leq P_{ge} \leq P_{e\_max}$$

其中,  $P_{ge}$  表示燃气内燃机的发电出力, 单位为 kW。  $Q_{fuel}$  是消耗天然气对应的热能, 单位为 kW。  $Q_{gas}$  是指燃气内燃机发电产生的燃气余热, 单位为 kW。  $Q_{water}$  是燃气内燃机发电产生的缸套水余热, 单位为 kW。  $P_{ge\_min}$  是燃气内燃机的最低出力,  $P_{e\_max}$  是燃气内燃机的最大发电功率。  $\alpha_{GE}$ 、  $m_{GE}$ 、  $p_{GE}$ 、  $b_{GE}$ 、  $n_{GE}$ 、  $q_{GE}$  是燃气内燃机设备参数。

## 2) 吸收式制冷制热机组

在 CCHP 系统中, 吸收式制冷/制热机组将燃气内燃机发电产生的余热用于制冷或制热, 从而实现余热回收利用。制冷制热量和与其相应的  $COP$  系数有关, 数学表达式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_c = COP_c \cdot Q_{rc} \\ \text{制冷: } COP_c = COP_{rc} \cdot \beta / (0.75\beta^2 + 0.0195\beta + 0.213) \\ Q_{c\_min} \leq Q_c \leq Q_{c\_max} \\ Q_h = COP_h \cdot Q_{rh} \\ \text{制热: } COP_h = COP_{rh} \cdot \beta / (0.22\beta^2 + 0.6698\beta + 0.112) \\ Q_{h\_min} \leq Q_h \leq Q_{h\_max} \end{array} \right.$$

其中  $Q_c$  是指吸收式制冷机组制冷量,  $Q_h$  为制热量,  $Q_{rc}$  和  $Q_{rh}$  表示用于制冷和制热的余热量, 单位均为 kW。  $Q_{c\_min}$ 、  $Q_{c\_max}$  为机组制冷量的下限和上限,  $Q_{h\_min}$ 、  $Q_{h\_max}$  为机组制热量的上下限。  $COP_c$  和  $COP_h$  表示制冷系数和制热系数, 由机组自身决定。  $COP$  系统会随着机组实际出力的变化而变化, 所以需要对额定制冷/制热系数  $COP_{rc}$  和  $COP_{rh}$  进行修正,  $\beta$  为负荷率, 即实际出力与额定出力的比值。目前国内常用的吸收式制冷/制热机为双效溴化锂吸收式制冷/制热机, 其额定制冷系数  $COP_{rc}$  取值为 1.29, 其额定制热系数  $COP_{rh}$  取值为 0.9。

## 3) 电锅炉/电制冷机组

电制冷机和电热泵通过消耗电能, 利用压缩机将其转化为所需的冷或热。与吸收式制冷/制热机组类似, 电制冷机和电热泵也具有制冷系数和制热系数。电制冷机和电热泵的数学模型如下:

电制冷机:

$$Q_c = COP_{air\_c} \cdot P_{airc}$$

$$P_{airc\_min} \leq P_{airc} \leq P_{airc\_max}$$

电热泵:

$$Q_h = COP_{air\_h} \cdot P_{airh}$$

$$P_{airh\_min} \leq P_{airh} \leq P_{airh\_max}$$

其中  $Q_c$ 、  $Q_h$  为各设备相应的制冷量和制热量。  $P_{airc}$ 、  $P_{airh}$  表示各自消耗的电功率,  $P_{airc\_min}$ 、  $P_{airc\_max}$  为电制冷机的功率上下限,  $P_{airh\_min}$ 、  $P_{airh\_max}$  为电热泵的功率上下限, 以上参数的单位均为 kW。  $COP_{air\_c}$  和  $COP_{air\_h}$  为电制冷机和电热泵的制冷系数和制热系数。

## 5) 储能系统

在多能源微能网中的储能系统可能包括电储能、储热罐和蓄冷槽。其数学模型如下所示:

$$Q_x^{t+1} = Q_x^t (1 - \delta_x) + P_x^t \Delta t$$

$$-P_{sf \max} \leq P_x \leq P_{xc \max}$$

$$Q_{x \min} \leq Q_x^t \leq Q_{x \max}$$

$$Q_x^{24} = Q_x^0$$

其中,  $\delta_x$  为储能设备自放能系数。后三个式子分别代表了储能设备充放能功率限制、储能容量限制和储能设备在一个调度周期内的充放能平衡限制。

#### 6) 热网模型

在多能源微能网中, 热网的模型需要跟电网模型相匹配以实现电热联合优化。为实现这一目的, 通常采用电路的分析方法而分析热网。将热网和电路对比, 设定等效参数, 对换热器、输热管网以及热负荷计算其热阻和热容, 从而将热网比拟为电路。

换热器连接着一次管网与二次管网, 是一次与二次网络热交换的媒介。热能的交换与管网中工质的流速和温度都有关系。其数学模型如下:

$$Q = c \cdot m (t_f - t_h)$$

$$c = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

其中,  $Q$  表示二次管网通过换热器从一次管网获得的热能, 单位为 kW。  $c$  表示工质的比热,  $m$  表示热网中二次管网内工质的循环流量, 单位是 kg/s,  $t_f$  表示二次管网中工质通过换热器后的温度,  $t_h$  表示二次管网中工质进入换热器时的温度, 单位均为  $^\circ\text{C}$ 。

由热力工质运动特性可知进行冷热电联合优化时必须考虑热能传输延迟时间, 并在热传输时也存在热能损失的问题, 所以还需要考虑热损耗。

$$\tau = L/v$$

$$Q_{loss} = Q_l \cdot L$$

$$Q_l = aT + b$$

其中  $\tau$  表示热传输时的延迟时间,  $L$  是供热管道长度, 单位为 m,  $v$  是工质流动的速度, 单位是 m/s。  $Q_{loss}$  表示  $L$  长度段供热管道的热损值, 单位为 kW。  $Q_l$  表示单位长度的供热管道热损值, 单位 kW。  $T$  表示供热管道中的工质温度, 单位为 K,  $a$ 、 $b$  是管道自身参数, 与管道种类有关。

本文假定供热负荷为建筑, 建筑物等值热参数模型如下:

$$\begin{cases} T_i^{t+1} = T_0^{t+1} + QR - (T_0^{t+1} + QR - T_i^t) e^{-\frac{\Delta t}{RC}} & s = 1 \\ T_i^{t+1} = T_0^{t+1} - (T_0^{t+1} - T_i^t) e^{-\frac{\Delta t}{RC}} & s = 0 \end{cases}$$

其中  $T_0^{t+1}$  表示  $t+1$  时刻的环境温度,  $T_i^{t+1}$  表示  $t+1$  时刻的室内温度,  $T_i^t$  为  $t$  时刻的室内温度。  $Q$  为供冷/供热量。  $R$  为等效热阻, 由  $R1$  和  $R2$  等效得到, 近似等于  $R1$ 。  $C$  为气体热容和固体热容等效之后的热容, 近似等于空气热容。其中  $s=0$  表示停止供能状态,  $s=1$  表示供冷/供热进行状态。

在优化运行中考虑热网约束时, 可将供供热量作为输入量, 利用热负荷模型计算后, 将供热建筑的室内温度作为约束量, 即供热在满足用户的舒适度的前提下, 室内温度可在小范围内波动, 以上描述的热网约束可表示为下面的公式:

$$T_{i+1} = f(T_i, Q, T_0)$$

$$T_{\min} \leq T_{i+1} \leq T_{\max}$$

## 2.2. 多能源微能源系统调度建模

### 2.2.1. 目标函数

在本文中主要考虑多能源微能网协调运行的三个目标：经济运行、最大化综合能源利用效率以及最小化非可再生能源利用量。

考虑微能网经济运行时，即运行成本最小化时，不仅考虑了综合微能源系统从外网购电、购气的费用，还需要考虑环境排放的影响，因此微能网协同调度目标函数包括了购电购气成本和环境成本两部分。

$$C = \min(C_1 + C_2)$$

其中  $C_1$  为购电、购气成本， $C_2$  表示微燃机及电网电能的环境成本，其计算表达式如下：

$$C_1 = \sum C_{grid}^i \cdot P_{grid}^i + \sum C_{NG}^i \cdot V_{NG}^i$$

$$C_2 = \sum_{k=1}^M \alpha_k \times \beta_{MTK} \times \sum P_{MT}^k$$

式中， $C_{grid}^i$  表示  $i$  时刻的电网电价，单位为元/kWh， $P_{grid}^i$  表示  $k$  时刻从大电网得到的有功功率，单位为 kW。  $C_{NG}^i$  为天然气价格，单位为元/Nm<sup>3</sup>， $V_{NG}^i$  为  $k$  时刻消耗的天然气总量，单位为 Nm<sup>3</sup>。  $\alpha_k$  为排放类型的外部折扣成本， $\beta_{MTK}$  为燃气发电机在排放类型为  $k$  时的排放强度， $M$  为排放类型(NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>)。

多能源微能网的显著特征就是涵盖了不同种类和形式的能源，在计算系统能效时，考虑到不同种类和形式的能量品质不同，所以在计算能效时不能简单地将能量值直接求和。能量的焓值与能量的种类、温度等特性参数有对应关系，不同种类能源的能量都可转换为焓值，因此可将用焓值来进行系统能效的计算，从而达到多种能源统一的目的。焓效率的表达式如下：

$$\eta = (E_e + E_h + E_c) / E_{all}$$

$$E_{all} = E_g + E_{PV} + E_f$$

其中， $E_e$  为电负荷对应的焓值， $E_h$  为热负荷对应的焓值， $E_c$  为冷负荷对应的焓值。 $E_{all}$  表示系统总的输入能量对应的焓值，包括外网发电耗能、光伏发电量和天然气热能三者对应的焓值之和。 $P_e$  为总的电负荷， $Q_h$  为总的热负荷， $Q_c$  为总的冷负荷， $Q_{fuel}$  为系统天然气消耗量， $P_g$  为外电网发电的总耗能， $P_{PV}$  为光伏系统总出力。不同能量与焓值之间的转换关系如下：

$$E_e = \sum_{k=1}^{24} (P_e^k)$$

$$E_c = \sum_{k=1}^{24} ((T_0^k / T_c^k - 1) Q_c^k)$$

$$E_h = \sum_{k=1}^{24} ((1 - T_0^k / T_h^k) Q_h^k)$$

$$E_{NG} \approx \sum_{k=1}^{24} (Q_{NG}^k)$$

$$E_{grid} = \sum_{k=1}^{24} (P_{grid}^k)$$

$$E_{PV} = \sum_{k=1}^{24} (P_{PV}^k)$$

其中， $T_0^k$  为  $k$  时刻环境温度， $T_c^k$  为  $k$  时刻冷源的温度， $T_h^k$  为  $k$  时刻热源的温度，单位均为 K。 $Q_c^k$  为  $k$  时刻总的冷负荷， $Q_h^k$  为  $k$  时刻总的热负荷， $P_e^k$  为  $k$  时刻总的电负荷，单位均为 kW。 $Q_{NG}^k$  为  $k$  时刻天然气热能， $P_{grid}^k$  为  $k$  时刻外电网发电耗电量， $P_{PV}^k$  为  $k$  时刻光伏发电量，单位也均为 kW。

多能源微能网中的非可再生能源输入不仅包括本地机组消耗天然气，还有外购电能中火力发电所消耗的燃煤燃气。优化时可统一折算成标准煤来计算：



$$M = (Q_{fuel} + P_{grid} * (1 - \gamma) / \eta) * \varepsilon$$

式中,  $Q_{fuel}$  为研究的系统内本地消耗的天然气的量,  $P_{grid}$  为研究的系统从外电网购电量,  $\gamma$  为本系统的可再生能源渗透率, 即可再生能源发电在该区域大电网发电量中的比例,  $\eta$  为研究的系统中燃煤燃气发电的平均效率,  $\varepsilon$  为折算系数, 其值为 0.1229, 单位是 kg 标准煤/kWh。

### 2.2.2. 约束条件

多能源微能网协同调度优化模型的约束条件由等式约束和不等式约束组成, 包含上文中的各元件和网络的数学模型中的约束。其中等式约束包括能量平衡约束, 具体包括电能平衡约束、热能平衡约束和冷能平衡约束; 不等式约束包括各设备元件的出力上下限约束以及电网节点电压约束和热网温度约束。

### 2.2.3. 优化算法

在求解本文建立的微能网多目标调度模型时, 采用的优化算法为 GOSET (遗传优化算法系统工程工具(Genetic Optimization System Engineering Tool))。GOSET 在其发展过程中, 被广泛用于解决各种工程问题, 也被用于设计电感器、无刷直流电机、电源、逆变器和同步电机、感应电机、燃气轮机等的参数识别。其使用进化算法来解决这些问题, 在寻求全局最优的能力上非常强大。

## 3. 算例

### 3.1. 算例条件

以贵州某微能网为例, 通过求解建立的微能网调度模型给出了该微能网多能源协同调度运行策略。微能网的网络拓扑图及 CCHP、光伏、风电、储能、小水电接入位置如图 2 所示。CCHP 机组、水力发电机组、储能电池和光伏分布式发电装置、风电为微能网提供电、热、冷负荷, 不足部分由外部电网、电热泵和电制冷机进行补偿。

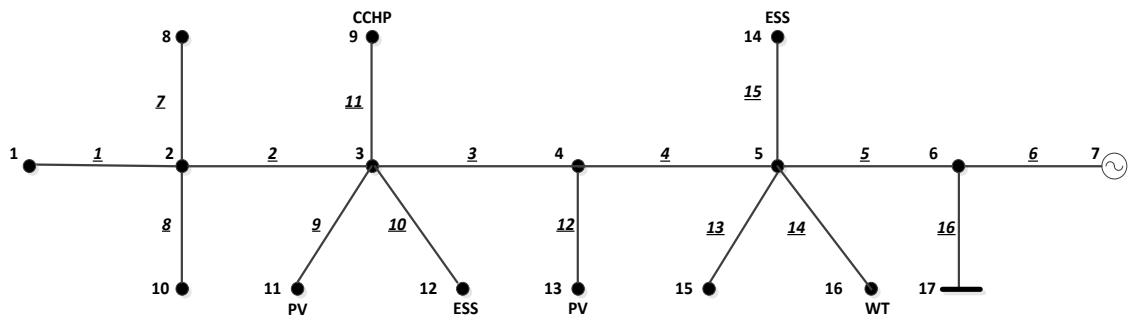


Figure 2. Micro-energy system network topology

图 2. 微能网算例网络拓扑图

考虑到微能网的多能源供应, 本文采用了“以冷热定电功率”的原则, 即以首先满足冷热负荷需求再考虑满足电负荷需求。

本文考虑了电力和热力的综合需求响应。节点 6、8、15 节点的负荷可削减其最大负荷 20% 的比例作为响应负荷量。热力负荷的需求响应考虑冷热负荷其温度可调节 5℃。

为了验证模型和算法的正确性, 首先定义基本运行场景为微能网与大电网并网运行, 用该算例进行了以下几个场景研究:

- 场景 1: 并网模式下无电力热力需求响应;
- 场景 2: 并网模式电力热力均参与需求响应;

场景 3: 并网模式下外部电网购电价格发生变化, 购电价格从单一电价 0.724 元/kWh 变为分时电价, 电价表如表 1 所示:

**Table 1.** Time-of-use electricity price

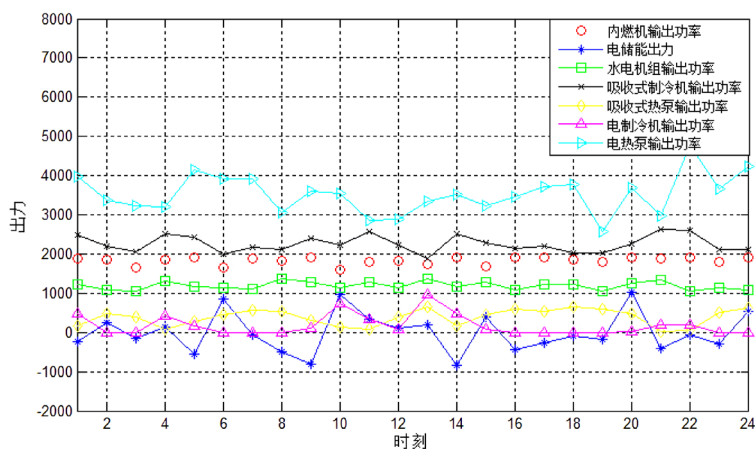
**表 1.** 分时电价表

电价(元/kWh)	时段
1.138	峰时段: $t = 11:00\sim 15:00, 19:00\sim 21:00$
0.710	平时段: $t = 8:00\sim 10:00, 16:00\sim 18:00, 22:00\sim 23:00$
0.268	谷时段: $t = 1:00\sim 7:00, 24:00$

场景 4: 并网模式下燃气价格发生变化, 燃气价格从 2.5 元/m<sup>3</sup> 上涨为 3.1 元/m<sup>3</sup>。

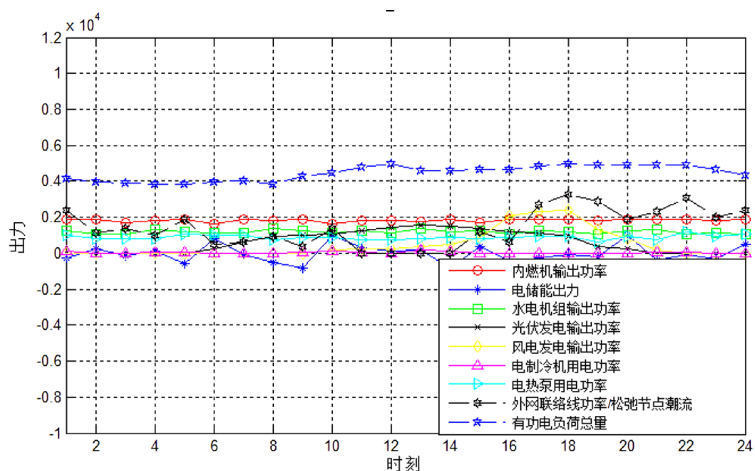
### 3.2. 算例结果分析

通过求解建立的多能源微能网协调调度模型, 可以得到该微能网各种能源一天 24 小时的出力计划, 如图 3 所示。图 4~6 分别为电负荷平衡、热负荷平衡和冷负荷平衡。



**Figure 3.** Output power of devices in micro-energy-network

**图 3.** 微能网中各设备输出功率



**Figure 4.** Electric power and load curve of micro-energy-network

**图 4.** 微能网电功率和电负荷曲线



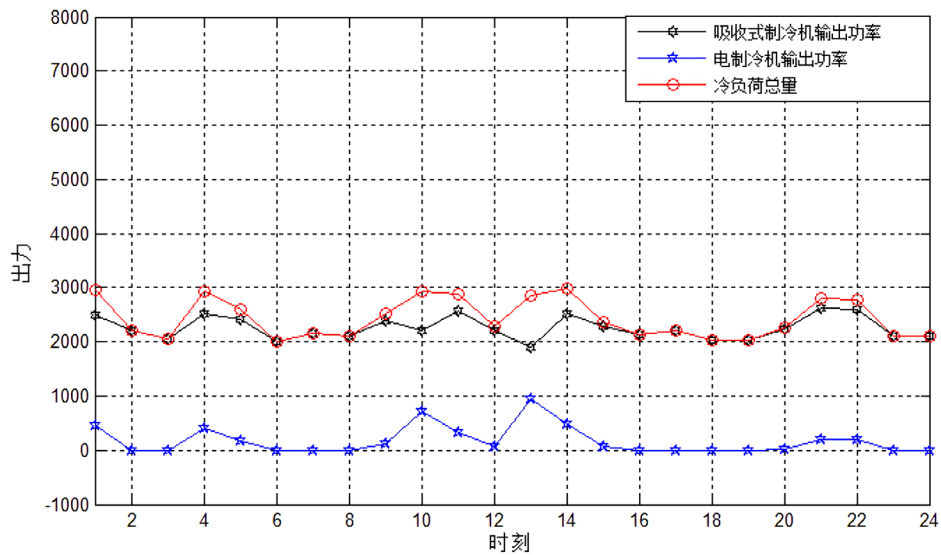


Figure 5. Cooling power and cooling load curve of micro-energy-system

图 5. 微能网中冷功率和冷负荷曲线

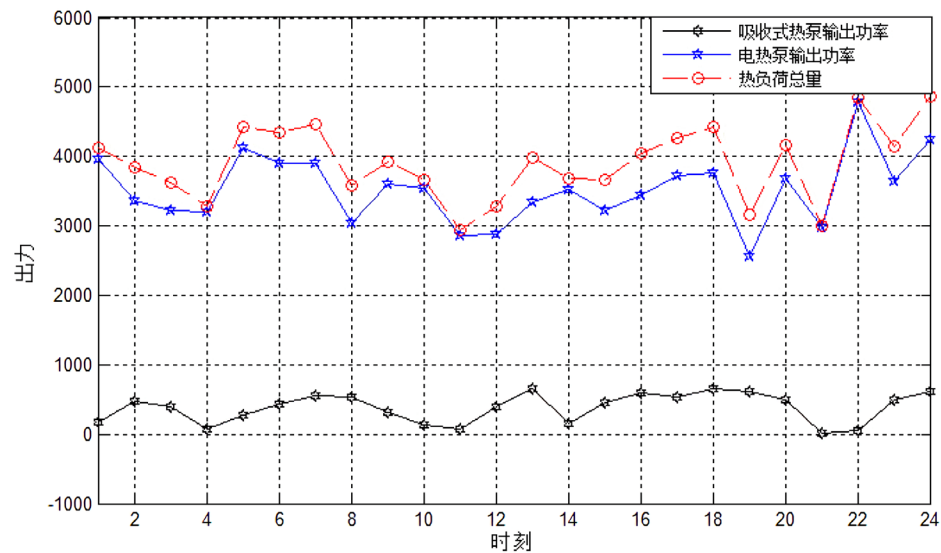


Figure 6. Thermal power and thermal load curve of micro-energy-system

图 6. 微能网中热功率和热负荷曲线

图 3 所示的调度计划是无电力热力需求响应及单一电价情形下的, 在此情形下, 微能网的运行成本为 52,924 元, 系统综合能源利用效率为 50.1%, 非可再生能源消耗量为 21898.61 kg 标准煤。

比较了基本运行场景下有无需求响应的优化结果, 即场景 1 和场景 2 的比较。场景 2 的计算结果如图 7 所示。

对比图 4 和图 7 可以看出, 在没有需求响应的情况下, 水电站的发电量和联络线功率增加, 由于资源采购成本和能源效率的优化目标, 水电站发电量增加较多。从图 5 和图 8 以及图 6 和图 9 可以看出, 由于有需求响应时 CCHP 出力减少, 冷热负荷主要由电制冷机及电热泵来承担, 而且由于 CCHP 出力较为平稳, 所产生的冷、热源也较为平稳。在有电力热力综合需求响应时, 微能网的运行成本为 45,047 元, 系统综合能源利用效率为 52.3%, 非可再生能源消耗量为 18320.39 kg 标准煤。

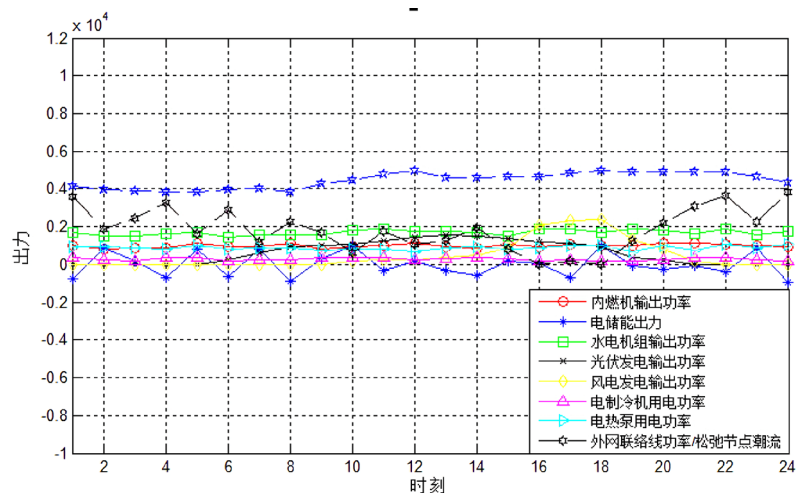


Figure 7. Electric power and load curve of micro-energy-network of case 2  
图 7. Case 2 微能网电功率和电负荷曲线

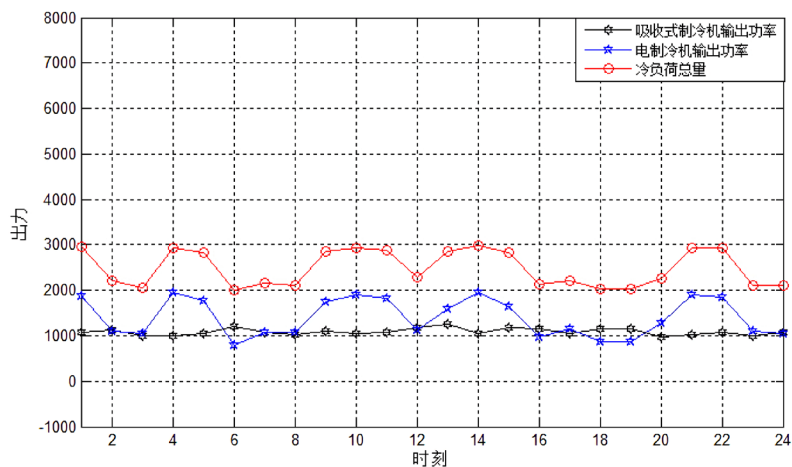


Figure 8. Cooling power and cooling load curve of micro-energy-system of case 2  
图 8. Case 2 微能网中冷功率和冷负荷曲线

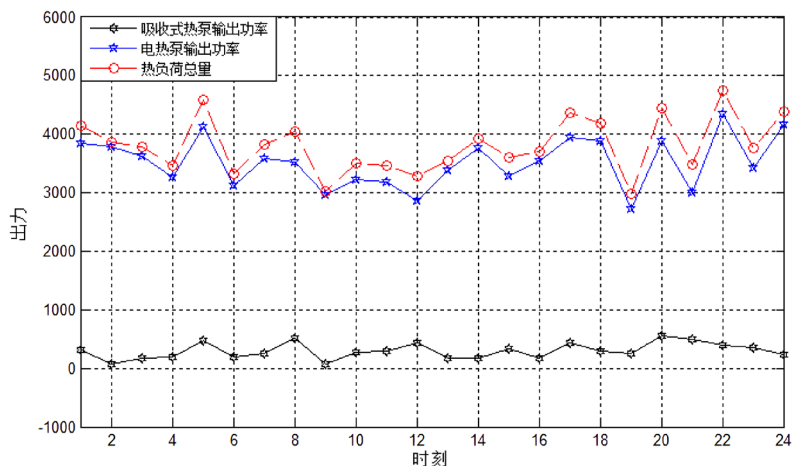


Figure 9. Thermal power and thermal load curve of micro-energy-system of case 2  
图 9. Case 2 微能网中热功率和热负荷曲线

比较了不同电价和天然气价格下的优化结果。电价变化和燃气价格变化前后微能网中各设备的出力情况对比如图 10、图 11 所示。

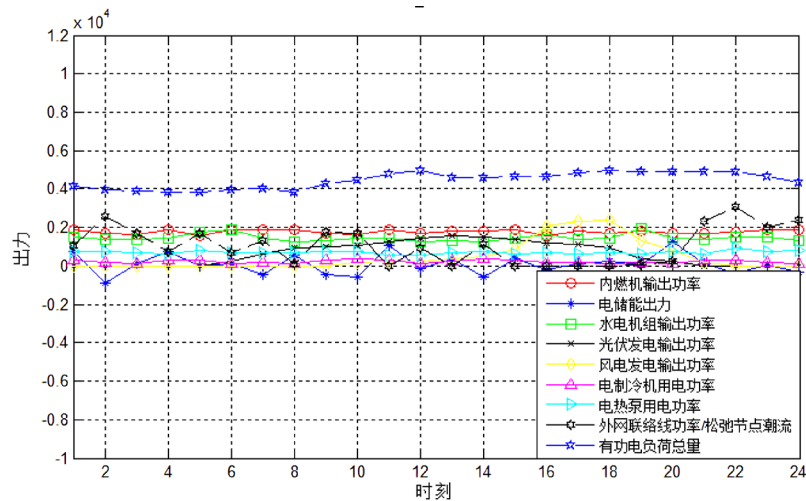


Figure 10. Output power of device in micro-energy-network of power price changed  
图 10. 电价变化后微能网中各设备输出功率

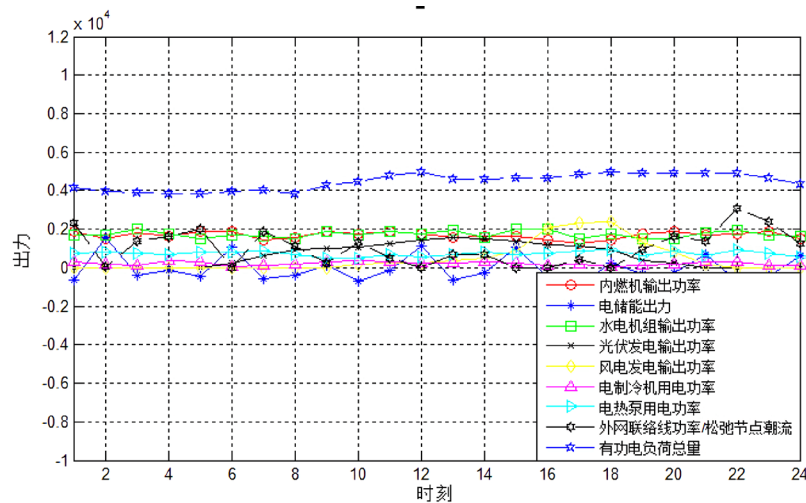


Figure 11. Output power of device in micro-energy-network of gas price changed  
图 11. 气价变化后微能网中各设备输出功率

从图 10 和图 7 对比可以看出，电价由单一电价变为分时电价后，从大电网购电的联络线功率减少，CCHP 系统的发电量增加，电制冷机输出功率和电热泵输出功率减少。系统综合能源效率由单一电价时的 52.4% 变为分时电价时的 51.1%。

从图 11 可以看出，随着天然气价格的上涨，燃气发电机发电量减少，而水电机组的进水量和联络线的功率增加，以补偿剩余的电能需求。在天然气价格上涨的情况下，由于更多地使用电动热泵和电冰箱，系统综合能效提高到了 53.56%。

#### 4. 结论

本文通过多能源微能网的建模分析及建立多目标协调调度模型和求解，研究微能网中不同能源的协

同调度问题,以冷热负荷和电负荷的综合需求响应作为优化运行调节手段,综合考虑微能网综合运行成本、综合能源利用效率、可再生能源消纳量多个目标,得到微能网的最优调度策略。以贵州某微能网为例,在不同运行场景下对微能网进行协同调度,CCHP 和水力发电机组的出力以及从外部电网购买的电能可以实现灵活协调,计算结果表明电力热力综合需求响应能提高系统能效,减少非可再生能源消耗量;在综合考虑成本、能效、环境目标时,电价及天然气价格是决定调度各种能源的关键因素,算例表明通过多种能源之间的相互配合、转换可以满足客户的多种用能需求,使得系统能源配置达到最优。

## 参考文献

- [1] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 16-25.
- [2] 田世明,栾文鹏,张东霞,等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [3] 张峰. 城市主动配电网“源-网-荷”协同优化调度模式研究[J]. 科技展望, 2016(34): 18.
- [4] 王珂,郭晓蕊,周竞,等. 智能电网“源-荷”协同调度框架及实现[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2637-2644.
- [5] Trigenation/CCHP. <https://www.clarke-energy.com/gas-engines/trigenation>
- [6] 党东升,韩松,周珏,等. 需求响应参与系统调峰研究综述[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(5): 13-17.
- [7] 闫华光,陈宋宋,李世豪,等. 需求响应发展现状及趋势研究[J]. 供用电, 2017(3): 1-7.
- [8] 曾鸣,韩旭,李冉,等. 能源互联网系统供需双侧多能协同优化策略及其求解算法[J]. 2017, 41(2): 409-417.
- [9] 刘小聪,王蓓蓓,李扬,等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J]. 2013, 33(1): 30-38.