

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200766

# 考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行

冯奕<sup>1</sup>, 应展烽<sup>2</sup>, 颜建虎<sup>3</sup>

(1. 南京工程学院经济与管理学院, 江苏 南京 211167; 2. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094;  
3. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 随着综合能源管理技术的成熟, 建立含大比例可再生能源和储能装置的多能互补微能源网成为发展趋势。近年来, 我国在进行能源结构调整, 碳排放控制力度逐步提升。因此在考虑碳排放成本的基础上, 以微能源网日运行成本最低为目标建立经济运行模型, 对储能的充放电策略进行调整, 并采用商业软件 CPLEX 进行求解。以某一实际微能源网为例验证所提模型的有效性, 分析了两种储能容量和功率配置对微能源网运行成本的影响。算例结果表明, 所建模型纳入了碳排放成本的影响, 在保障可再生能源消纳的前提下, 对微能源网内的多种能源和储能装置充放电策略进行了优化, 实现微能源网运行成本最低的同时达到多能互补的效果。

**关键词:** 多能互补; 储能; 可再生能源; 微能源网; 碳排放

## Optimized operation of energy storage in a multi-energy complementary micro-energy network considering carbon emission cost

FENG Yi<sup>1</sup>, YING Zhanfeng<sup>2</sup>, YAN Jianhu<sup>3</sup>

(1. School of Economics and Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** With the maturity of integrated energy management technology, the establishment of a multi-energy complementary micro-energy network containing a high proportion of renewable energy and energy storage devices has become a development trend. In recent years, the control of carbon emissions is strengthened gradually in China with structural energy adjustment. Therefore, considering the cost of carbon emissions, the economic operation model of a micro-energy network is established with the target of the lowest daily operating cost to adjust the charging/discharging strategies of the energy storage devices, using the commercial software CPLEX. Taking an actual micro-energy network as an example, the effectiveness of the proposed model is verified, and the impact of two different energy storage capacity and charging/discharging power strategies on daily operating cost is analyzed. The results show that the proposed model can consider the impact of carbon emissions, and the operating strategy for multiple energy sources and energy storage devices is optimized to ensure the consumption of renewable energy. It achieves the lowest daily operating cost of the micro-energy network while realizing the multi-energy complement.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607091), the University Philosophy and Social Science Research Fund Project of Jiangsu Provincial Department of Education (No. 2017SJB0400), and the Innovation Fund Project of Nanjing Institute of Technology (No. CKJB201908).

**Key words:** multi-energy complement; energy storage; renewable energy; micro-energy network; carbon emission

## 0 引言

为了更好地促进可再生能源消纳, 国家能源局

近日起草了《关于建立健全清洁能源消纳长效机制的指导意见(征求意见稿)》, 《意见》中提出鼓励建设以电为中心的综合能源系统, 鼓励多途径促进清洁能源就地消纳<sup>[1]</sup>。目前我国已开展了微电网的利用形式, 由风电、光伏和燃气轮机等构成, 并通常配置储能<sup>[2-3]</sup>。在微电网架构基础上, 由风、光、气等多种能源输入和热、电、冷等多种产品输出的微

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607091); 江苏省教育厅高校哲学社会科学基金项目资助(2017SJB0400); 南京工程学院创新基金面上项目资助(CKJB201908)

能源网可以充分利用能源间的梯级利用技术, 具有多能互补优势, 成为了国内外的研究热点<sup>[4-8]</sup>。另一方面, 随着 2017 年我国碳市场建设的正式启动, 我国已在多地开展碳排放权交易试点并提出了多项碳交易商品, 因此开展计及碳排放成本的多能互补微能源网的最优运行策略具有显著的经济与环保价值<sup>[9-10]</sup>。

近年来, 国内外很多学者和研究机构针对多能互补系统的架构、配置和优化运行展开了研究。文献[11]采用多场景理念对某园区综合能源开展规划, 并对多能互补协同效益进行了分析, 结果表明多能互补综合能源系统可以有效提升可再生能源的利用率和经济价值。文献[12]将储能装置融入能源互联微网多能互补系统, 通过采取不同的储能模式对多能互补系统的经济运行进行优化, 结果表明含有储能装置的多能互补系统具有显著的调峰性能。文献[13]在考虑热储能的基础上, 建立了电/热混合储能的多能互补综合能源系统, 通过计算, 结果表明所提系统可以有效提升新能源消纳。文献[14]在归纳总结电转气(Power to Gas, P2G)主要技术和应用潜力的基础上将 P2G 应用于微能源网中, 通过建立模型和分析含 P2G 的微能源网系统, 指出未来的研究方向。文献[15]以系统总收益最大化和能源利用率最大化为优化目标, 构建了微能源网多目标优化调度模型。文献[16-21]分别针对多能互补微能源网系统提出了多种优化算法, 如飞蛾扑火优化、混合随机区间优化、随机鲁棒协调优化、加速遗传算法等, 通过计算分析得出, 所提的优化算法可以有效地实现多能互补系统经济运行。

然而, 目前针对多能互补的微能源网优化运行研究还较少纳入碳排放影响因素。因此本文在考虑碳排放成本的基础上, 结合风电、光伏等可再生能源以及储能装置, 构建含电、气、热的多能互补微能源网系统。以微能源网日运行成本最低为目标建立模型, 在保障可再生能源消纳的前提下, 对网内多种能源出力和储能装置充放电策略进行优化, 通过商业软件 CPLEX 进行求解。最后, 通过某实例验证所提模型的有效性, 并分析了两种储能装置容量和充放电功率对运行成本的影响, 为实现多能互补微能源网的低碳经济运行提供借鉴。

## 1 多能互补微能源网系统及数学模型

本文所研究的多能互补微能源网主要面向小型的园区, 图 1 给出了其主要网络系统架构, 供能侧包括天然气站(Gas Station)、风电(Wind Power,

WP)、光伏电能(Photovoltaic, PV), 需求侧包括热、电两种负荷。热负荷主要由天然气站作为输入给燃气炉(Gas Boiler, GB)和微型燃气轮机(Micro Turbine, MT)以及电转热(Power to Heat, P2H)设备供给。而电负荷主要通过风电、光伏以及 MT 供给。为了提高可再生能源消纳能力, 系统中还配置了储能装置(Energy Storage, ES)用以平抑可再生能源的波动性和随机性。微能源网和配电网通过变压器联结, 实现能量的双向流通, 两者在灵活性和可靠性等方面互为备用。

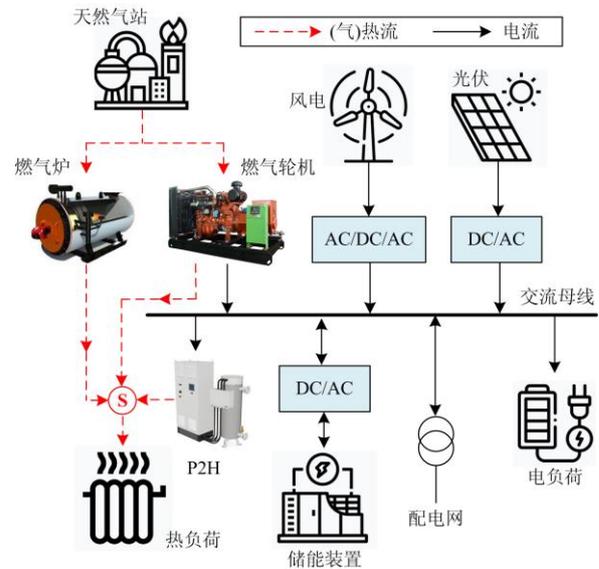


图 1 多能互补微能源网架构

Fig. 1 Multi-energy complementary micro-energy network architecture

### 1.1 燃气炉数学模型

燃气炉作为主要的供热源, 实现了天然气向热的转换, 从而满足区域热负荷的要求, 其热功率模型为<sup>[22]</sup>

$$P_{GB,h} = P_{GB,gas} \eta_{GB} \quad (1)$$

$$Q_{GB,gas} = \frac{P_{GB,gas} \Delta t}{CV_{gas}} \quad (2)$$

$$H_{GB,h} = P_{GB,h} \Delta t \quad (3)$$

式中:  $P_{GB,h}$  和  $Q_{GB,gas}$  分别为燃气炉的制热功率和耗气功率;  $\eta_{GB}$  为转换效率, 本文取 0.9;  $CV_{gas}$  为天然气热值, 本文取  $10 \text{ kWh/m}^3$ ;  $\Delta t$  为时间间隔;  $Q_{GB,gas}$  为  $\Delta t$  时间内消耗的天然气量;  $H_{GB,h}$  为  $\Delta t$  时间内的燃气炉产热量。此外, 在天然气完全燃烧的情况下, 近似认为  $1 \text{ m}^3$  天然气产生  $1.96 \text{ kg}$  的二氧化碳。

## 1.2 微型燃气轮机数学模型

微型燃气轮机是微能源网系统中重要的发电和产热设备，其工作原理为：天然气与压缩空气混合燃烧推动涡轮转动带动发电机发电，再将做完功的燃气经过回热器和热交换器进行供热。其电、热简化数学模型为<sup>[23]</sup>

$$P_{MT_e} = P_{MT_{gas}} \eta_{MT_e} \quad (4)$$

$$P_{MT_h} = P_{MT_{gas}} (1 - \eta_{MT_e}) \eta_{MT_h} \quad (5)$$

$$H_{MT_h} = P_{MT_h} \Delta t \quad (6)$$

$$Q_{MT_{gas}} = \frac{P_{MT_{gas}} \Delta t}{CV_{gas}} \quad (7)$$

式中： $P_{MT_e}$ 和 $P_{MT_{gas}}$ 分别为微型燃气轮机的发电功率和耗气功率； $P_{MT_h}$ 为微型燃气轮机的制热功率； $\eta_{MT_e}$ 和 $\eta_{MT_h}$ 分别为电能与热能转换效率，本文分别取0.2和0.2； $Q_{MT_{gas}}$ 为 $\Delta t$ 时间内消耗的天然气的量； $H_{MT_h}$ 为 $\Delta t$ 时间内的微型燃气轮机产热量。

## 1.3 电转热设备数学模型

P2H 设备在微能源网中实现电能向热能的转换，加强了电与热之间的耦合，其功率模型为

$$P_{P2H_e} = P_{P2H} \eta_{P2H} \quad (8)$$

$$H_{P2H_h} = P_{P2H_h} \Delta t \quad (9)$$

$$Q_{P2H_e} = P_{P2H_e} \Delta t \quad (10)$$

式中： $P_{P2H_e}$ 和 $P_{P2H_h}$ 分别为P2H设备的耗电功率和制热功率； $\eta_{P2H}$ 为电能向热能转换的效率，通常认为其效率为100%； $Q_{P2H_e}$ 为 $\Delta t$ 时间内消耗的电量的； $H_{P2H_h}$ 为 $\Delta t$ 时间内的P2H设备产热量。

## 1.4 储能装置数学模型

在含有可再生能源的微能源网中配置储能装置可以平滑风电、光伏等发电设备的输出功率，此外还可以实现电、热负荷的迁移，优化运行成本。由于储能装置的储能量 $Q_{ES}$ 与某一时刻的荷电状态(State of Charge, SOC)有关，其物理模型为<sup>[24]</sup>

$$Q_{ES_{ch}} = P_{ES_{ch}} \eta_{ES_{ch}} \Delta t \quad (11)$$

$$Q_{ES_{dis}} = \frac{P_{ES_{dis}} \Delta t}{\eta_{ES_{dis}}} \quad (12)$$

$$Q_{ES} = Q_{ES_{max}} \cdot SOC + Q_{ES_{ch}} - Q_{ES_{dis}} \quad (13)$$

式中： $P_{ES_{ch}}$ 和 $P_{ES_{dis}}$ 分别为储能装置的充放电功率； $\eta_{ES_{ch}}$ 和 $\eta_{ES_{dis}}$ 分别为储能装置的充放电效率，本文均取0.9； $Q_{ES_{ch}}$ 和 $Q_{ES_{dis}}$ 分别为储能装置在 $\Delta t$ 时间内的充放电量； $Q_{ES_{max}}$ 为储能装置的额定最大容量。

## 2 微能源网优化运行模型

### 2.1 碳排放成本

为了限制和减少温室气体的排放，我国已在北京、上海、天津、广州等7个城市开展了碳排放交易市场试点，给予一定数量的碳排放配额并对超出部分进行市场交易，从而促进能源结构的改善。

对于多能互补微能源网来说，在运行阶段的风电、光伏和储能装置不会产生碳排放，而天然气消耗则会产生直接的碳排放。因此，本文将全年配额平均分配到每日，建立适用于多能互补微能源网运行的碳排放费用模型为

$$\begin{cases} F_{em} = p_c (W_{em_a} - W_{em_q}) & W_{em_a} \geq W_{em_q} \\ F_{em} = 0 & W_{em_a} < W_{em_q} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $W_{em_a}$ 和 $W_{em_q}$ 分别为每日实际碳排放量和平均分配到每日的碳排放配额量，单位为(tCO<sub>2</sub>)； $p_c$ 为碳交易价格，单位为(元/tCO<sub>2</sub>)。其中 $W_{em_a}$ 可以表达为

$$W_{em_a} = \frac{1.96(Q_{GB_{gas}} + Q_{MT_{gas}})}{1000} \quad (15)$$

### 2.2 目标函数

本文基于上述各多能互补系统单元模型，在考虑碳排放成本以及系统其他部分约束的前提下，建立多能互补微能源网日前最优经济运行为目标的优化模型，其每日微能源网运行总费用目标函数可以表达为

$$\begin{cases} F_{total} = F_{gas} + F_{e_{buy}} + F_{om} + F_{em} - F_{e_{sell}} \\ \min \{ F_{total} \} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $F_{gas}$ 、 $F_{e_{buy}}$ 、 $F_{om}$ 、 $F_{em}$ 和 $F_{e_{sell}}$ 分别为每日消耗天然气的费用、从外部配电网购入电量的费用、运行维护费用、碳排放费用以及向外部配电网售出电量的费用。

$$F_{gas} = C_{gas} \sum_{t=1}^T [Q_{GB_{gas}}(t) + Q_{MT_{gas}}(t)] \quad (17)$$

$$F_{e_{buy}} = \sum_{t=1}^T C_{e_{buy}}(t) Q_{e_{buy}}(t) \quad (18)$$

$$F_{om} = \sum_{t=1}^T (C_{GB_{om}} P_{GB_h}(t) + C_{MT_{om}} P_{MT_e}(t) + C_{ES_{om}} |P_{ES_{ch}}(t) - P_{ES_{dis}}(t)| + C_{W_{om}} P_w(t) + C_{PV_{om}} P_{PV}(t) + C_{P2H_{om}} P_{P2H_e}(t)) \quad (19)$$

$$F_{e_{sell}} = \sum_{t=1}^T C_{e_{sell}}(t) Q_{e_{sell}}(t) \quad (20)$$

式中:  $C_{\text{gas}}$ 、 $C_{\text{e\_buy}}$  和  $C_{\text{e\_sell}}$  分别为天然气单价(单位为元/m<sup>3</sup>)、从外部配电网购电单价(单位为元/kWh)和向外部配电网售电单价(单位为元/kWh);  $C_{\text{GB\_om}}$ 、 $C_{\text{MT\_om}}$ 、 $C_{\text{ES\_om}}$ 、 $C_{\text{W\_om}}$ 、 $C_{\text{PV\_om}}$  和  $C_{\text{P2H\_om}}$  分别为燃气炉运行维护单价、微型燃气轮机运行维护单价、储能运行维护单价、风电运行维护单价、光伏运行维护单价、P2H 运行维护单价, 各维护单位单位均为元/kW;  $Q_{\text{e\_buy}}$  和  $Q_{\text{e\_sell}}$  分别为向外部配电网购入和售出的电量;  $P_{\text{W}}$  和  $P_{\text{PV}}$  分别为风电和光伏的输出功率。

### 2.3 约束条件

本文所构建的多能互补微能源网系统包括了电负荷和热负荷两类, 因此系统需要满足这两种负荷的平衡约束。同时, 本文的约束还包括各装置的功率约束以及储能电量约束。

#### 1) 电、热负荷约束

$$H_{\text{MT\_h}}(t) + H_{\text{GB\_h}}(t) + H_{\text{P2H\_h}}(t) = H_{\text{load}}(t) \quad (21)$$

$$P_{\text{MT\_e}}(t) - P_{\text{P2H\_e}}(t) + P_{\text{W}}(t) + P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{ES\_ch}}(t) + P_{\text{ES\_dis}}(t) + P_{\text{e\_buy}}(t) - P_{\text{e\_sell}}(t) = P_{\text{load}}(t) \quad (22)$$

式中:  $H_{\text{load}}$  和  $P_{\text{load}}$  分别为热负荷和电负荷;  $P_{\text{e\_buy}}$  和  $P_{\text{e\_sell}}$  分别为向外部配电网购售电功率。

#### 2) 向配电网购售电功率限制

$$P_{\text{e\_buy\_min}} \leq P_{\text{e\_buy}}(t) \leq P_{\text{e\_buy\_max}} \quad (23)$$

$$P_{\text{e\_sell\_min}} \leq P_{\text{e\_sell}}(t) \leq P_{\text{e\_sell\_max}} \quad (24)$$

式中:  $P_{\text{e\_buy\_max}}$ 、 $P_{\text{e\_buy\_min}}$ 、 $P_{\text{e\_sell\_max}}$  和  $P_{\text{e\_sell\_min}}$  分别为微能源网向外部配电网购入和售出的最大和最小功率。

#### 3) 热设备功率约束

$$P_{\text{MT\_e\_min}} \leq P_{\text{MT\_e}}(t) \leq P_{\text{MT\_e\_max}} \quad (25)$$

$$P_{\text{GB\_h\_min}} \leq P_{\text{GB\_h}}(t) \leq P_{\text{GB\_h\_max}} \quad (26)$$

$$P_{\text{P2H\_e\_min}} \leq P_{\text{P2H\_e}}(t) \leq P_{\text{P2H\_e\_max}} \quad (27)$$

式中:  $P_{\text{MT\_e\_max}}$ 、 $P_{\text{MT\_e\_min}}$ 、 $P_{\text{GB\_h\_max}}$ 、 $P_{\text{GB\_h\_min}}$ 、 $P_{\text{P2H\_e\_max}}$  和  $P_{\text{P2H\_e\_min}}$  分别为微型燃气轮机、燃气炉和 P2H 设备的功率上下限。为了简化计算过程, 本文忽略了微型燃气轮机、燃气炉和 P2H 设备的爬坡速率。

#### 4) 储能装置约束

由于储能装置性能的限制, 其充电和放电功率必须维持在最大充放电功率之内, 否则会对储能电池造成损坏, 因此

$$0 \leq P_{\text{ES\_ch}}(t) \leq s_{\text{ES}} P_{\text{ES\_ch\_max}} \quad (28)$$

$$0 \leq P_{\text{ES\_dis}}(t) \leq (1 - s_{\text{ES}}) P_{\text{ES\_dis\_max}} \quad (29)$$

式中:  $P_{\text{ES\_ch\_max}}$  和  $P_{\text{ES\_dis\_max}}$  分别为储能装置允许的最大充放电功率;  $s_{\text{ES}}$  为充放电状态, 其中 1 代表充电、0 代表放电。

此外, 储能容量还需要满足最大容量约束, 且和储能装置的 SOC 上下限有关, 即

$$SOC_{\text{lim-}} Q_{\text{ES\_max}} \leq Q_{\text{ES}}(t) \leq SOC_{\text{lim+}} Q_{\text{ES\_max}} \quad (30)$$

式中:  $SOC_{\text{lim+}}$  和  $SOC_{\text{lim-}}$  分别为储能装置 SOC 的上下限, 本文分别取为 0.9 和 0.1。

### 2.4 求解方法

根据式(16)一式(30)可以看出, 各发电装置、储能装置以及负荷分别存在各自的和相互间的运行约束和状态约束, 因此本文所讨论的问题是一个 0-1 混合整数规划问题, 且变量较多, 所以无法直接寻找最优解。而商用求解器 CPLEX 综合了多种优化算法的优点, 可以快速、准确地求解多变量混合整数规划问题。因此本文选用 CPLEX 对所提目标函数进行求解。

## 3 算例分析

针对日前多能互补微能源网经济运行研究, 本文对参考文献[12, 25]中给出的算例进行了改进, 假定单位调度时间为 1 h, 总时刻  $T$  为 1 天, 表 1 给出了系统的主要参数。并且假设现阶段的天然气价格为 1.5 元/m<sup>3</sup>, 碳排放成本为 1 000 元/t<sup>[24]</sup>, 此外, 微能源网向配电网购入和售出的电价按照分时电价执行, 如表 2 所列。

表 1 多能互补微能源网系统主要参数

Table 1 Main parameters of multi-energy complementary micro-energy system

装置类型	最小出力/kW	最大出力/kW	运维成本/(元/kW)
微型燃气轮机	0(电功率)	50	0.02
燃气炉	0(热功率)	80	0.01
P2H	0(热功率)	30	0.01
风电	0	40	0.05
光伏	0	60	0.06
储能装置	-10(充电)	30(120 kWh)	0.03
配网交换功率	-60	60	0

表 2 电网峰谷电价

Table 2 Grid peak-valley electricity price

时段	购入单价/(元/kWh)	售出单价/(元/kWh)
峰时 8:00—21:00	0.55	0.42
谷时 21:00—次日 8:00	0.35	0.21

以某一天为例，其光伏和风电功率预测曲线如图 2 所示，电负荷和热负荷预测曲线如图 3 所示。

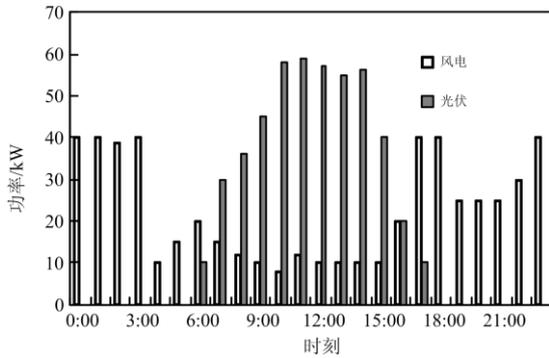


图 2 风电和光伏功率预测曲线

Fig. 2 Predicted power curves of wind power and PV

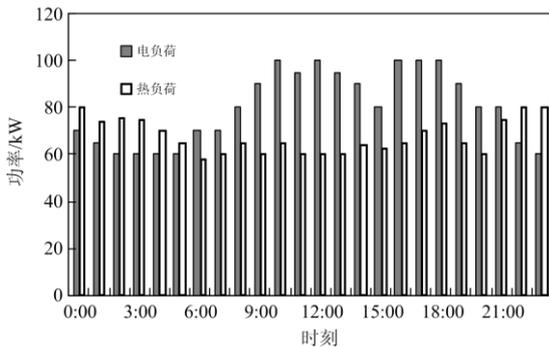


图 3 热负荷和电负荷预测曲线

Fig. 3 Predicted heat and power load curves

### 3.1 不考虑碳排放成本

在保障可再生能源最大消纳的情况下，根据表 1 配置微能源网系统，若不考虑碳排放成本，对该系统以成本最小为目标进行优化，得到储能装置充放电策略如图 4 所示，充电为负、放电为正，燃气炉、微型汽轮机以及 P2H 设备的运行策略如图 5 所示。同时可以得到与外部配电网之间交易的电量如图 6 所示。通过图 4—图 6 可以看出，当不考虑碳

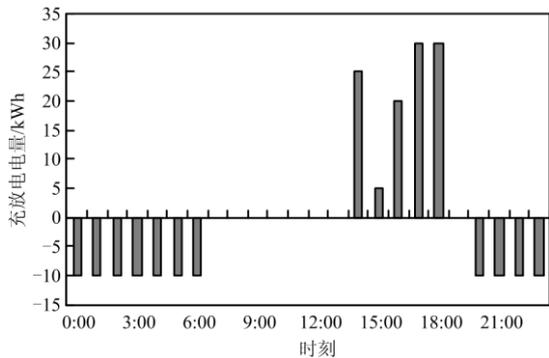


图 4 不考虑碳排放成本时储能充放电电量

Fig. 4 Charge and discharge capacity without  $F_{em}$

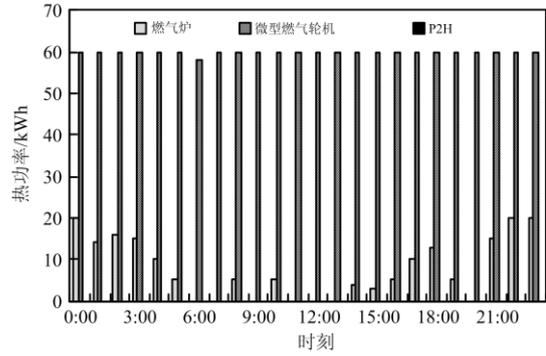


图 5 不考虑碳排放成本时热设备出力

Fig. 5 Output power of heater devices without  $F_{em}$

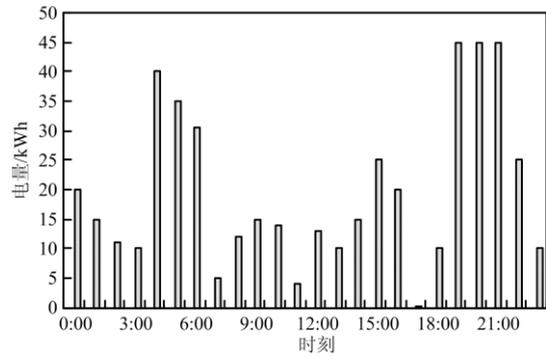


图 6 不考虑碳排放成本时向配电网购入电量

Fig. 6 Electricity bought from dispatched grid without  $F_{em}$

排放成本的时候，该微能源网会将微型汽轮机保持最大出力，不使用 P2H 设备，因为天然气转换成热负荷的成本比直接使用电能转换更具有经济性。储能装置在谷时段进行充电，在峰时段进行放电，以减少峰时段向外部配电网的购入电量。此时可以得出该多能互补微能源网在一天中的最低运行成本为 660.33 元。

### 3.2 储能装置模式一

在保障可再生能源最大消纳的情况下，根据表 1 配置微能源网系统，若此时考虑碳排放成本，同样对该系统以成本最小为目标进行优化，得到储能装置充放电策略如图 7 所示，放电为正，燃气炉、微型汽轮机以及 P2H 设备的运行策略如图 8 所示。同时可以得到与外部配电网之间交易的电量如图 9 所示。通过图 7—图 9 可以看出，当考虑碳排放成本的时候，该微能源网会自动调整微型汽轮机进行出力，并提升燃气炉和 P2H 设备的出力保障热负荷供应。此外微能源网在谷时段向配电网购入了更多电量储存起来，并在峰时段时放电供应微能源网内使用。可以得出该多能互补微能源网的日最低运行成本为 1 128.98 元。

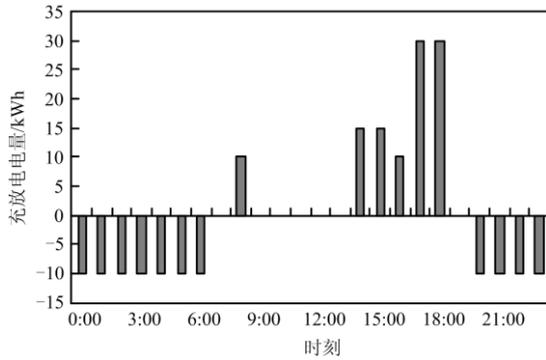


图 7 模式一储能充放电电量

Fig. 7 Charge and discharge capacity in mode 1

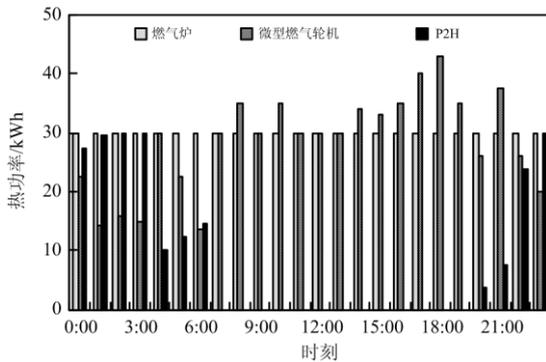


图 8 模式一热设备出力

Fig. 8 Output power of heater devices in mode 1

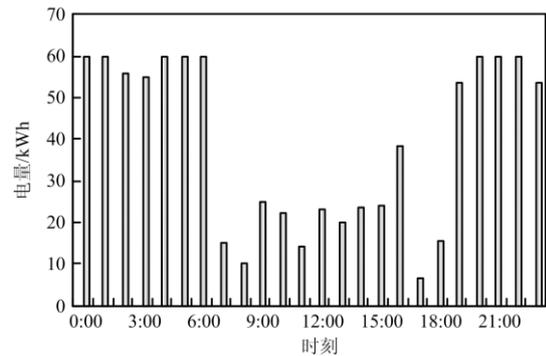


图 9 模式一向配电网购入电量

Fig. 9 Electricity bought from dispatched grid in mode 1

### 3.3 储能装置模式二

在模式一的基础上，将储能装置的容量和功率增加一倍，此时得到储能装置充放电策略如图 10 所示，放电为正，燃气炉、微型汽轮机以及 P2H 设备的运行策略如图 11 所示。同时可以得到与外部配电网之间交易的电量如图 12 所示。通过图 10—图 12 可以看出，当储能装置功率和容量翻倍后，在峰时段向配电网购电的总量会降低，减少了购电成本。

通过计算，可以得到此时系统的日最低运行成本为 1 019.82 元，相比模式 1 降低了 10.5%。未来采取实时电价后，系统中增加的储能装置可以获取更多套利，从而进一步降低系统的运行成本。

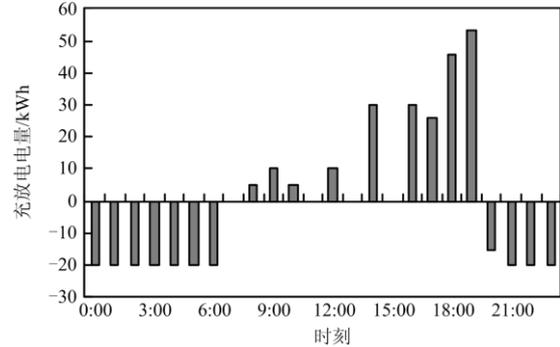


图 10 模式二储能充放电电量

Fig. 10 Charge and discharge capacity in mode 2

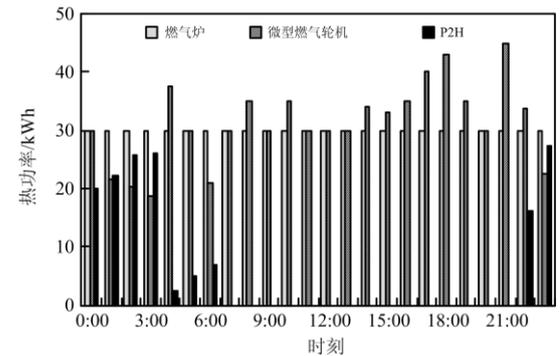


图 11 模式二热设备出力

Fig. 11 Output power of heater devices in mode 2

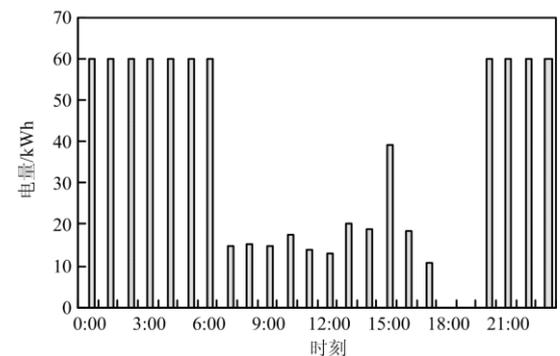


图 12 模式二向配电网购入电量

Fig. 12 Electricity bought from dispatched grid in mode 2

## 4 结论

本文在考虑碳排放成本，并且充分保障可再生能源消纳的基础上，以微能源网系统运行成本最低为目标，建立了多能互补微能源网经济运行模型，

并采用商业软件 CPLEX 进行求解。并分别对某一多能互补微能源网系统采取计及碳排放成本和不考虑碳排放成本的运行策略分析计算。结果表明, 当考虑 1 000 元/t 的碳排放成本后, 系统运行的成本会显著增加。同时, 微型燃气轮机和燃气炉的出力会降低, 而 P2H 设备的出力会提升。此外, 所配置储能装置容量的增大可使充放电功率调节更具灵活性, 可获得更好的经济性。

### 参考文献

- [1] 国家能源局. 关于建立健全清洁能源消纳长效机制的指导意见(征求意见稿)[EB/OL]. [2020-05-19]. [http://www.nea.gov.cn/2020-05/19/c\\_139069819.htm](http://www.nea.gov.cn/2020-05/19/c_139069819.htm)
- [2] HITTINGER E, WILEY T, KLUZA J, et al. Evaluating the value of batteries in microgrid electricity systems using an improved energy systems model[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 89: 458-472.
- [3] LIU Chunyang, QIN Yinghao, ZHANG Hengxu. Real-time scheduling strategy for microgrids considering operation interval division of DGs and batteries[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(5): 442-452.
- [4] 葛维春, 滕健伊, 潘超, 等. 含风光储能源-储-荷规划与运行调控策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(13): 46-53.  
GE Weichun, TENG Jianyi, PAN Chao, et al. Operation regulation strategy of source-storage-load with wind energy storage energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(13): 46-53.
- [5] HE Y, CHEN Y, YANG Z, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(2): 183-193. DOI: 10.1186/s41601-018-0092-2.
- [6] TURK A, WU Q, ZHANG M, et al. Day-ahead stochastic scheduling of integrated multi-energy system for flexibility synergy and uncertainty balancing[J]. *Energy*, 2020, 196.
- [7] GABRIELLI P, POLUZZI A, KRAMER G J, et al. Seasonal energy storage for zero-emissions multi-energy systems via underground hydrogen storage[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 121.
- [8] MOSER A, MUSCHICK D, GÖLLES M, et al. A MILP-based modular energy management system for urban multi-energy systems: performance and sensitivity analysis[J]. *Applied Energy*, 2020, 261.
- [9] 薛禹胜, 黄杰, 王放, 等. 基于分类监管与当量协同的碳市场框架设计方案[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(13): 1-8.  
XUE Yusheng, HUANG Jie, WANG Fang, et al. Carbon market framework design based on classified regulation and equivalent coordination[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(13): 1-8.
- [10] GU H, LI Y, YU J, et al. Bi-level optimal low-carbon economic dispatch for an industrial park with consideration of multi-energy price incentives[J]. *Applied Energy*, 2020, 262.
- [11] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 282-287.  
CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 282-287.
- [12] 门向阳, 曹军, 王泽森, 等. 能源互联微网型多能互补系统的构建与储能模式分析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(19): 5727-5737, 5929.  
MEN Xiangyang, CAO Jun, WANG Zesen, et al. The constructing of multi-energy complementary system of energy internet microgrid and energy storage model analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(19): 5727-5737, 5929.
- [13] GOOD N, MANCARELLA P. Flexibility in multi-energy communities with electrical and thermal storage: a stochastic, robust approach for multi-service demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(1): 503-513.
- [14] XING X, LIN J, SONG Y, et al. Modeling and operation of the power-to-gas system for renewables integration: a review[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2018, 4(2): 168-178.
- [15] 陈丽萍, 林晓明, 许苑, 等. 基于能源集线器的微能源网建模与多目标优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(6): 9-16.  
CHEN Liping, LIN Xiaoming, XU Yuan, et al. Modeling and multi-objective optimal dispatch of micro energy grid based on energy hub[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(6): 9-16.
- [16] WANG Y, LI F, YU H, et al. Optimal operation of microgrid with multi-energy complementary based on moth flame optimization algorithm[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, 42(7): 785-806.
- [17] JIANG Y, WAN C, CHEN C, et al. A hybrid stochastic-interval operation strategy for multi-energy microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 440-456.

- [18] WANG Y, TANG L, YANG Y, et al. A stochastic-robust coordinated optimization model for CCHP micro-grid considering multi-energy operation and power trading with electricity markets under uncertainties[J]. *Energy*, 2020, 198.
- [19] 文乐, 张宝锋, 张恩享, 等. 并网型多能互补系统优化规划方法[J]. *热力发电*, 2019, 48(11): 68-72.  
WEN Le, ZHANG Baofeng, ZHANG Enxiang, et al. Optimized planning method for grid-connected multi-energy complementary system[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(11): 68-72.
- [20] LESAGE-LANDRY A, WANG H, SHAMES I, et al. Online convex optimization of multi-energy building-to-grid ancillary services[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 28(6): 2416-2431.
- [21] 黄景光, 陈波, 林湘宁, 等. 基于乌鸦搜索算法的孤岛微网多目标优化调度[J]. *高压电器*, 2020, 56(1): 162-168.  
HUANG Jingguang, CHEN Bo, LIN Xiangning, et al. Multi-objective optimal operation of islanded microgrid based on crow search algorithm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(1): 162-168.
- [22] QU M, ABDELAZIZ O, YIN H. New configurations of a heat recovery absorption heat pump integrated with a natural gas boiler for boiler efficiency improvement[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 87: 175-184.
- [23] FAVUZZA S, GRADITI G, IPPOLITO M G, et al. Optimal electrical distribution systems reinforcement planning using gas micro turbines by dynamic ant colony search algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(2): 580-587.
- [24] AL-FORAIH R, SREEKANTH K J, AL-MULLA A. A techno-economic analysis of the integration of energy storage technologies in electric power systems[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2018, 10(5).
- [25] 朱晔, 兰贞波, 隗震, 等. 考虑碳排放成本的风光储多能互补系统优化运行研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(10): 127-133.  
ZHU Ye, LAN Zhenbo, WEI Zhen, et al. Research on optimal operation of wind-PV-ES complementary system considering carbon emission cost[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(10): 127-133.

---

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-09-17

作者简介:

冯奕(1987—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为储能经济与电力市场。E-mail: fengyi@njit.edu.cn

(编辑 周金梅)