

# 考虑碳排放的综合能源系统经济优化调度

左明乐, 李培强

(福建工程学院 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 以经济性最优为目标, 在满足系统的热电负荷需求的基础上, 搭建了综合能源系统的低碳经济调度模型, 重点分析系统运行中各设备的碳排放, 特别是储电设备的碳排放, 通过改进的粒子群算法进行实例检验。结果验证了该模型结构的合理性和调度的经济性, 对系统内所有设备的碳排放具体分析, 验证了系统的低碳运行。

**关键词:** 综合能源系统; 粒子群算法; 储能系统; 风电

中图分类号: TM9

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)01-0083-06

## Economically optimized scheduling of an integrated energy system considering carbon emissions

ZUO Mingle, LI Peiqiang

(School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** With economic optimization as the goal, a low carbon economic scheduling model of an integrated energy system was constructed on the basis of meeting the requirements of the thermoelectric load of the system. The carbon emissions of each equipment in the operation of the system, especially that of the power storage equipment, were analyzed, and specific calculations were carried out through the improved particle swarm algorithm. Results verify the rationality of the model structure and the economics of scheduling, and the carbon emissions of all equipment in the system are analyzed specifically, which verifies the low-carbon operation of the system.

**Keywords:** integrated energy system; particle swarm algorithm; energy storage system; wind power

综合能源系统(integrated energy system, IES)可利用一定区域内的电能、风能、光能等多种能源,实现能量阶梯利用,以满足该区域对电能、热能和冷能的负荷需求。IES接入了分布式储能设备(energy storage system, ESS),增加了系统运行灵活性和用户的用电灵活性。在当前“双碳”背景下,引进IES对电力系统减少二氧化碳排放、实现碳排放目标具有明显的促进作用。

目前国内学者针对IES开展了很多研究。文献[3-4]研究了分布式发电系统的能源、环境效

益和IES的低碳经济调度,建立低碳调度模型,提高IES的经济性;文献[5]提出了共享储能电站的架构,能够节约储能费用,实现用户与储能服务商的合作共赢;文献[6]提出了可转移可中断电和不可中断电负荷、冷负荷和热负荷等多种负荷的综合响应的模型,同时优化多个用户之间统一电价和多个微网内的各种能源耦合设备的输出;文献[7]建立了冷热电系统的基本结构,以经济性和环境治理费用为目标函数,构建的IES在经济、环保和能效这3个方面的优化程度都比单供

收稿日期: 2021-12-01

第一作者简介: 左明乐(1998—),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向:综合能源系统经济优化调度。

通信作者: 李培强(1975—),男,山西忻州人,教授,博士,研究方向:电力系统运行与控制及负荷建模。

和“以热定电”的冷热电联供系统高。文献[8]加入了能源集线器,对 IES 进行建模,引入了储热因子作为描述储能系统状态的参数,并建立了一种分层调度策略。文献[9]以电价激励型需求响应和二氧化碳排放最小两个目标函数对并网型 IES 建立双目标优化模型,对于 IES 的容量配置和年规划成本及二氧化碳排放等环境效益完成分析评价。文献[10]提出描述综合能源联供系统的组成和结构,根据该系统结构设计了微电网的调度模型,并建立 IES 的 0-1 混合整数线性规划的日前经济调度模型。

本研究以低碳排放为目标,搭建一个 IES 的结构模型,并优化各时段的 IES 与主网之间的交换功率,利用改进的粒子群算法,针对典型天气情况下的负荷变化进行调度。

## 1 系统结构模型

### 1.1 系统构成

IES 一般是在某区域内由分布式电源(光伏阵列、风电机组等)、储能电站和综合能源负荷(供热负荷、空调负荷等)通过电力传输线连接组成<sup>[11-14]</sup>。IES 往往在建筑物屋顶装设光伏阵列,光伏发电优先满足用电需求,如果有剩余电量,可以售给大电网。由于风电和光伏发电有波动性和随机性,IES 为了系统稳定必须和电网连接。当系统内负荷处于低谷时,若风能、光能较为充足,则相应的燃气轮机的出力减小,同时 P2G 机组(power to gas)和蓄电池开始工作;当负荷处于峰值阶段,若风力和光伏发电不足,则燃气轮机加大出力,储能系统同时放电支援,系统光能和风能若有剩余,可并入电网,充电到储能系统。

### 1.2 光伏发电模型

光伏发电机组的输出功率为:

$$P_{PV}(t) = \frac{P_{STC}G(t)[1 + k(T(t) - T_{STC})]}{G_{STC}} \quad (1)$$

式中,  $P_{PV}(t)$ 、 $G(t)$  和  $T(t)$  为光伏机组在当前条件下的输出功率、光照强度和温度;  $T_{STC}$  为标准测试条件下的温度(25°C);  $P_{STC}$ ,  $G_{STC}$  为标准测试条件下最大输出功率和光照强度,  $k$  为温度系数。

### 1.3 风力发电模型

风力发电模型为:

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & v < v_{in} \\ K_1 v^2 + K_2 v + K_3 & v_{in} \leq v \leq v_0 \\ P_e & v_0 \leq v \leq v_{out} \\ 0 & v \geq v_{in} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $P_{WT}(t)$  为风电的实时出力;  $v$ 、 $v_{in}$ 、 $v_{out}$  和  $v_0$  分别为风电机组的实时、切入、切出和额定风速,  $P_e$  为风电机组的额定输出功率,  $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  为出力参数,风电机组的输出功率满足上述函数。

### 1.4 微型燃气轮机

微型燃气轮机机(micro turbine, MT)的出力模型为:

$$Q_{MT}(t) = \frac{P_{MT}(t)[1 - \eta_{MT}(t) - \eta_L]}{\eta_{MT}(t)} \quad (3)$$

式中,  $Q_{MT}(t)$ 、 $P_{MT}(t)$  分别为燃机的余热量和输出功率;  $\eta_{MT}(t)$ 、 $\eta_L$  为  $t$  时段燃气轮机的出力效率和散热损失率。

微型燃气轮机的发电成本为:

$$C_{MT}(t) = \frac{C_{CH_4}P_{MT}(t)\Delta t}{\eta_{MT}(t)L_{HV}} \quad (4)$$

式中,  $C_{MT}(t)$  为燃气轮机的天然气单位时间成本;  $C_{CH_4}$  为天然气的单价;  $L_{HV}$  为低热值。

### 1.5 储能系统模型

储能装置是 IES 的重要组成部分,能够平抑风电和光伏出力的波动性,同时利用峰谷电价套利降低 IES 的运行成本。铅酸蓄电池的技术成熟,成本更低,所以采用铅酸蓄电池作为储能装置。 $t$  时刻储能装置的充放电公式为:

$$E(t) = (1 - \delta_{dis})E(t-1) + \left[ \eta_{ch}P_{ch} - \frac{P_{dis}}{\eta_{dis}} \right] \Delta t \quad (5)$$

式中,  $E(t)$  为电池的剩余电量;  $\delta_{dis}$  为自放电系数;  $P_{ch}$ 、 $P_{dis}$  为电池充电放电功率;  $\eta_{ch}$ 、 $\eta_{dis}$  分别为电池的充电、放电效率。

荷电状态(SOC)是蓄电池的主要的评定参数,它能准确的显示蓄电池的剩余容量,荷电状态的数学模型为:

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t (I_b - I_{loss}) d\tau \quad (6)$$

式中,  $SOC_0$  为初始荷电状态,  $C$  为额定容量,  $I_b$ 、 $I_{loss}$  是电池充放电电流和损耗反应电流,  $d\tau$  为电池充放电时间。

## 2 IES 低碳经济调度模型

### 2.1 碳排放分析

以碳排放效益为依据,分析系统是否低碳运行。碳排放来源包括电网购电、燃气机组和系统运行的耗能。IES的碳排放量包括各分布式设备的碳排放量以及耦合设备的间接碳排放量,各机组碳排放量与其出力的大小呈线性关系。

实际碳排放量计算公式为:

$$N_{\text{CO}_2} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \varepsilon_n P_{n,t}^{\text{CO}_2} \Delta t \quad (7)$$

式中,  $N_{\text{CO}_2}$  为实际碳排放量;  $M$  为碳排放设备数量;  $T$  为调度周期时段数;  $\varepsilon_n$  为第  $n$  台碳排放设备的碳排放系数;  $P_{n,t}^{\text{CO}_2}$  为  $t$  时刻第  $n$  台碳排放设备的输出功率。

### 2.2 目标函数

根据第1节的单元模型,建立含储能电站的IES优化调度模型,不仅考虑系统成本费用最低,还要考虑低碳环保,系统将多目标转换为单目标,目标函数包括经济性与环保性两方面,目标函数为:

$$\min C = C_E + C_G + C_{\text{RUN}} + C_{\text{CO}_2} \quad (8)$$

式中,  $C_E$  为从电网购电费用;  $C_G$  为购气费用;  $C_{\text{RUN}}$  为系统运行费用;  $C_{\text{CO}_2}$  为系统排放二氧化碳产生的环保费用。

系统从电网购电费用  $C_E$  为:

$$C_E = \sum_{t=1}^T c_e^t P_{\text{buy},e}^t \Delta t \quad (9)$$

式中,  $c_e^t$  为单位时段的从大电网购电价格,单位为元/kW·h;  $P_{\text{buy},e}^t$  为单位时段从大电网的购电功率,单位为kW;  $\Delta t$  为一个时段长度,  $\Delta t = 1$  h。

购气费用  $C_G$  为:

$$C_G = c_g \sum_{t=1}^T V_{\text{buy},g}^t \quad (10)$$

式中,  $c_g$  为一个时段内从天然气网购电的价格,  $c_g = 3$  元/ $\text{m}^3$ ;  $V_{\text{buy},g}^t$  为一个时段内系统从天然气网购气量。

系统运行费用  $C_{\text{RUN}}$  为:

$$C_{\text{RUN}} = \sum_{m=1}^n c_m P_m \quad (11)$$

式中,  $c_m$ 、 $P_m$  分别为系统内第  $m$  个设备的运行单位成本和出力大小。

环保费用  $C_{\text{CO}_2}$  为:

$$C_{\text{CO}_2} = \sum_{t=1}^T c_{\text{GRID},e}^t + \beta \varepsilon_g \sum_{t=1}^T (V_{\text{GT},g}^t + V_{\text{GB},g}^t) \quad (12)$$

式中,  $\beta$  为排放  $\text{CO}_2$  的单位成本;  $\beta = 0.06$  元/kg;  $c_{\text{GRID},e}^t$  为一个时段内从电网购电产生的排放  $\text{CO}_2$  的环保费用;  $\varepsilon_g$  为单位体积天然气下  $\text{CO}_2$  排放系数;  $V_{\text{GT},g}^t$ 、 $V_{\text{GB},g}^t$  分别为一个时段内燃气轮机耗气量和燃气锅炉耗气量

### 2.3 约束条件

功率平衡约束为:

$$P_{\text{grid}} + P_{\text{pv}} + P_{\text{wt}} + P_{\text{mt}} = P_{\text{load}} - P_{\text{bess}} \quad (13)$$

式中,  $P_{\text{grid}}$  为主网对系统的输入功率,  $P_{\text{load}}$  为用户负荷功率,  $P_{\text{bess}}$  为储能设备出力。

传输线交换功率约束为:

$$-P_{\text{line,max}} \leq P_{\text{grid}} \leq P_{\text{line,max}} \quad (14)$$

式中,  $P_{\text{line,max}}$  为传输线允许的最大交换功率。

设备出力约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{GT}} \leq P_{\text{GT}}^{\text{max}} \\ 0 \leq Q_{\text{AC}} \leq Q_{\text{AC}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{EC}} \leq P_{\text{EC}}^{\text{max}} \\ 0 \leq Q_{\text{GB}} \leq Q_{\text{GB}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $P_{\text{GT}}^{\text{max}}$ 、 $Q_{\text{AC}}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{EC}}^{\text{max}}$  和  $Q_{\text{GB}}^{\text{max}}$  为燃气轮机、吸收式制冷机、电制冷机和燃气锅炉的最大输出功率。

蓄电池容量和充电次数约束:

$$\text{SOC}_{\text{min}} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\text{max}} \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^{24} \lambda(t) \leq \lambda_{\text{max}} \quad (17)$$

式中, SOC 为蓄电池的荷电状态,  $\lambda$  表示储能电站的充放电次数。

## 3 求解算法

针对式(8)~式(17),采用粒子群算法对IES进行优化。粒子群算法是一种通过群体中个体之间的交流与合作来搜索最优解,标准公式为:

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (18)$$

$$v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_1 r (P_{ij}^{\text{pbest}} - x_{ij}^t) + c_2 r (P^{\text{gbest}} - x_{ij}^t) \quad (19)$$

式中  $v_{ij}^t$ 、 $v_{ij}^{t+1}$ , 分别为粒子本次迭代与下次迭代的速度;  $x_{ij}^t$  为粒子本次迭代的位置;  $x_{ij}^{t+1}$  为粒子下次迭代的位置;  $P_{ij}^{\text{pbest}}$  为个体极值,  $P^{\text{gbest}}$  为群体极值;  $r$  为(0,1)的随机数。

惯性权重公式为:

$$\omega = \omega_{\min} + \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{N} N_k \quad (20)$$

学习因子公式为:

$$c_1 = c_{1s} + \frac{c_{1e} - c_{1s}}{N} N_k$$

$$c_2 = c_{2s} + \frac{c_{2e} - c_{2s}}{N} N_k \quad (21)$$

式中,  $N$  为迭代次数,  $N = 500$ ;  $N_k$  为目前的迭代次数;  $c_s$ 、 $c_e$  分别为  $c_1$  的起始值和终止值,  $c_{2s}$ 、 $c_{2e}$  为  $c_2$  的起始值和终止值。

## 4 算例分析

### 4.1 系统参数

本例将 IES 规划应用到某北方城市街区, 系统为该街区火车站和周围酒店提供冷、热和电负荷, 该系统只能从大电网购电, 不能向外输送。

基于中国当前发电结构下碳排放强度的平均水平, 风力或光伏每发出  $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$  电能, 平均可减少的  $\text{CO}_2$  排放量为  $0.872 \text{ kg}$ , 减少的  $\text{SO}_2$  排放量为  $0.026 \text{ kg}$ 。

以冬季典型为例, 对系统进行优化调度, 系统只含热、电负荷, 购电单价采用分时电价, 电价参数如表 1 所示。

表 1 电价参数

Tab.1 Electricity price parameters

时段/ h	价格/ (元 · kW · h)	时段/ h	价格/ (元 · kW · h)
00:00~07:00	0.418	13:00~15:00	0.843
08:00	0.843	16:00~20:00	1.292
09:00~12:00	1.292	21:00~24:00	0.418

### 4.2 场景设置及调度分析

图 1 为该系统冬季典型日 24 h 内的各类负荷需求和风力、光伏出力预测结果。

分析系统在冬季典型日的电热负荷预测图, 由于冬季多以取暖用热为主, 热负荷变化较为平缓, 中午 10:00~14:00 系统的用热需求较小, 其余时段热负荷会略有增加。

本研究设置 3 种场景分析不同设备对系统的经济性和环保性:

(1) 场景一: 未加 P2G 和储能设备, 以系统经

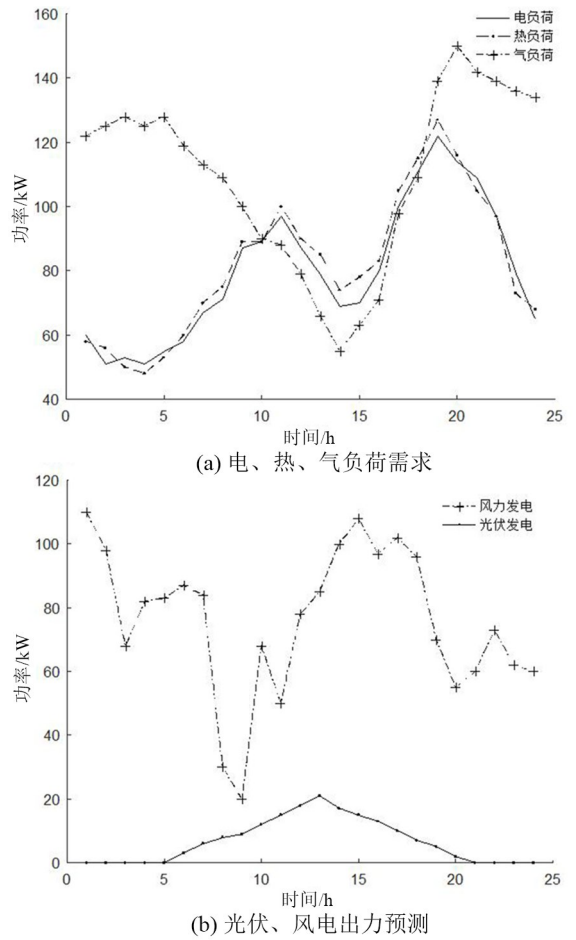


图 1 冬季负荷需求和光伏、风电出力预测

Fig.1 Winter load demand and PV and wind power output prediction

济性为目标;

(2) 场景二: 未加 P2G 和储能设备, 以系统经济环保最优为目标;

(3) 场景三: 加入 P2G 设备和储能设备后, 以系统经济环保最优为目标。

利用上节优化算法求解 IES 的调度优化结果如图 2 所示。

#### 4.2.1 调度结果分析

(1) 在未加入 P2G 机组和储能设备时, 光伏和风电的输出功率在不同时段差异明显, 燃气轮机的出力稳定。由于当地夜间风速较大, 所以夜间时段风力机组出力达到所有时段的最大值, 而光伏机组不出力。通过对不含 P2G 机组和储能设备的系统调度分析发现, 系统因缺少 P2G 机组和储能设备的削峰填谷作用, 在夜间和白天都不同程度上造成了弃风弃光现象。

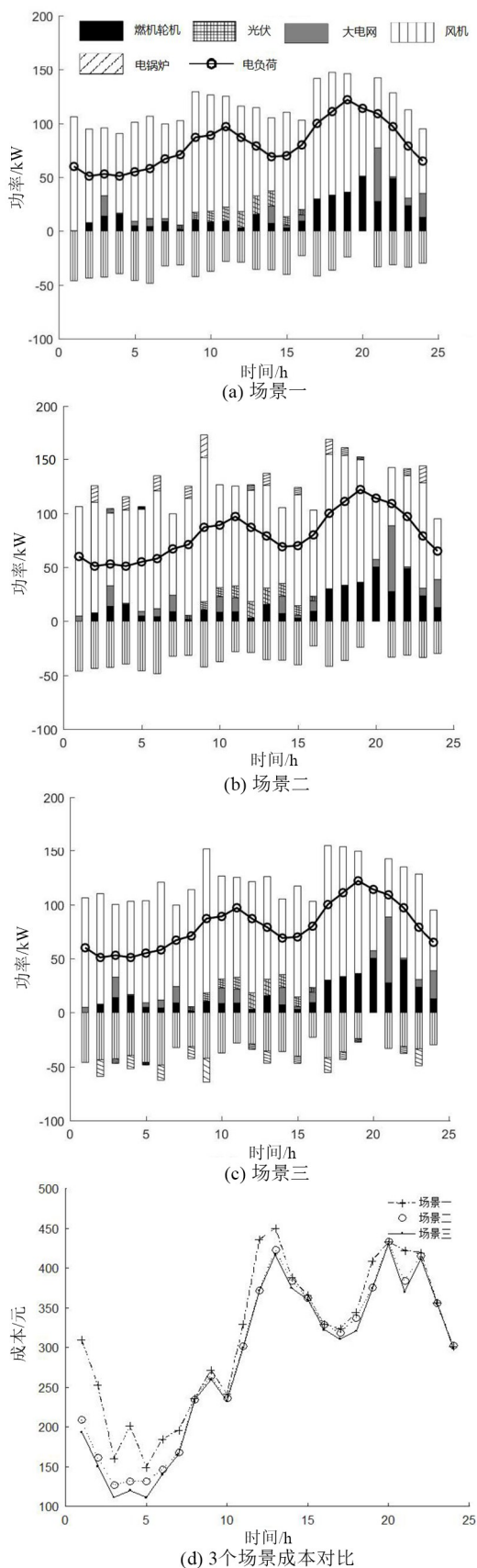


图 2 不同场景调度结果

Fig.2 Scheduling results of different scenarios

(2)加入 P2G 机组和储能设备后,在负荷低谷时段,由于负荷需求量较小,且系统购电价格较低,当风能、光能满足用户负荷时,由 P2G 机组优先出力,将电能转换成天然气储存;若 P2G 机组仍不能消纳多余电量,则由蓄电池将剩余电能储存起来。在用电高峰期,由于负荷需求急剧上升,燃机的出力不能满足需求,从大电网购电的费用较高,此时储能设备开始出力。

(3)燃机的出力与电网电价的波动有明显的相关性,当购电价格达到一天内最高时( 15:00~16:00、20:00~21:00) 由燃机尽可能多出力,电价较低时( 17:00~19:00、22:00~23:00) 燃机可减少出力。电网电价在 00:00 达到一天内最低时,燃机停止出力。由调度结果可知,在凌晨时,全部从电网购电以满足用电负荷;在白天,光伏、风电机组优先出力,如果风电和光伏出力无法满足电负荷,才由燃机出力。

#### 4.2.2 环境效益分析

表 2 为各时段的碳排放分析结果,根据分时电价表将一天分为 6 个时段。

表 2 各时段不同场景的 CO<sub>2</sub> 排放量

Tab.2 Emissions in different scenarios at each period

时段/h	场景一的 CO <sub>2</sub> 排放量/t	场景二的 CO <sub>2</sub> 排放量/t	场景三的 CO <sub>2</sub> 排放量/t
00:00~07:00	1.85	1.83	1.67
08:00	0.35	0.29	0.25
09:00~12:00	0.95	0.91	0.81
13:00~15:00	0.992	0.90	0.79
16:00~20:00	0.80	0.75	0.69
21:00~24:00	0.66	0.60	0.52

与场景一相比,场景二、场景三污染治理费用均大幅度下降,证明了所构建模型的环保性;其中场景二和场景三引入了碳排放评价指标和 P2G 机组及储能设备,没有造成弃风弃光现象,所以 CO<sub>2</sub> 排放量下降明显,说明引入储能设备配合清洁能源能使系统具有更佳的低碳性。因为储电的运行成本更高,且多次转化能量的储存形式存在能量浪费,所以优先运行 P2G 机组,蓄电池暂停运行。综合考虑系统运行成本和低碳效益,通过

储能设备平衡不同时段电价峰谷差,可提高系统的经济性和环保性。

由于调度过程中也要考虑电储能的碳排放,所以要减少储能设备的工作时间,避免消耗更多的电能,减少电能向另一种能量转化过程中的损耗。场景三与场景一相比,为了降低超过负荷需求的电能浪费,在用电低谷时避免储能设备工作,所以,燃机在夜间的出力达到了一天的最大值。而燃气锅炉的碳排放量比燃气轮机更大,所以燃机和电锅炉优先出力更加清洁,碳排放量快速下降。场景三考虑电储能设备的碳排放,当燃机的出力增加时,优先由 P2G 机组出力,风电和光伏的优势明显,因此在风电和光伏出力的各时段,环保成本更低。

## 参考文献:

- [1] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [2] 吴盛军,刘建坤,周前,等. 考虑储能电站服务的冷热电多微网系统优化经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 10-18.
- [3] 雷金勇,谢俊,甘德强. 分布式发电供能系统能量优化及节能减排效益分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 29-36.
- [4] 康丽虹,贾燕冰,田丰,等. 含 LNG 冷能利用的综合能源系统低碳经济调度[J/OL]. 高电压技术: 1-12 [2022-02-21]. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201844.
- [5] 吴盛军,李群,刘建坤,等. 基于储能电站服务的冷热电多微网系统双层优化配置[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3822-3832.
- [6] 李鹏,吴迪凡,李雨薇,等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1307-1321, 1538.
- [7] 蔡含虎,向月,杨昕然. 计及需求响应的综合能源系统容量经济配置及效益分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 186-194.
- [8] 王成山,洪博文,郭力,等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33, 3.
- [9] 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.
- [10] 王英瑞,曾博,郭经,等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2942-2951.
- [11] 杨经纬,张宁,王毅,等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 11-24.
- [12] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3306.
- [13] 辛禾. 考虑多能互补的清洁能源协同优化调度及效益均衡研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- [14] 程浩忠,胡泉,王莉,等. 区域综合能源系统规划研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 2-13.

## 5 结语

本研究基于 IES 结构,分析了 P2G、储气和储能电池构成的电气转换储能系统的适用性,构建了包含风电机组、光伏、和蓄电池的 IES 模型,建立了 IES 的经济优化调度模型,通过具体算例,对 3 种不同场景下系统的调度进行研究。结果表明:相对于系统中不含储能设备来说,在 IES 中同时采用 P2G 机组和蓄电池进行储能的调度方案在经济成本和环境保护方面均具有优势,能提高风电消纳,避免风能光能的浪费。加入碳排放的环境指标后,系统内的经济效益略有降低,但是碳排放量明显减低。

(责任编辑:方素华)