

# 考虑风光发展趋势与碳排放评估的多能源系统优化运行模型

步天龙<sup>1</sup>, 寇汉鹏<sup>1</sup>, 张大沛<sup>1</sup>, 聂伟峰<sup>1</sup>, 宁昭军<sup>1</sup>, 王健<sup>2</sup>

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司 呼伦贝尔供电公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021100; 2. 沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 开展多能源系统碳排放量化评估是实现能源系统低碳运行的关键环节, 因此, 文章提出了一种考虑风光发展趋势与碳排放评估的多能源系统优化运行模型。首先, 通过分析火电机组、燃气轮机、电转气、多能源储能等设备的能量输入输出特性, 建立多能源系统拓扑结构和多能源功率平衡模型; 其次, 采用广义巴斯模型对风电、光伏发展趋势进行量化, 在此基础上, 建立考虑风光发展趋势的多能源系统碳排放评估模型; 再次, 以包含多能源系统能量调节收益、碳配额交易收益和运行成本的总收益最大为目标, 提出考虑风光发展趋势与碳排放评估的多能源系统优化运行模型; 最后, 进行算例仿真分析。分析结果表明, 文章提出的多能源系统优化运行模型能够有效提升系统的运行收益和降低系统的碳排放。

**关键词:** 多能源系统; 碳排放评估; 可再生能源; 储能设备

**中图分类号:** TK51; TM81; TM72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)02-0260-08

## 0 引言

随着全球化石能源危机和环境污染的日益加剧, 能源系统发展将面临越来越多的挑战, 推动新能源产业发展和构建多能源系统是推动新型电力系统建设、促进能源结构绿色低碳转型的重要途径<sup>[1,2]</sup>。在新型电力系统建设的过程中, 风电、光伏等新能源电源比例迅速增长, 新形态负荷和多能源储能设备不断接入, 对电力系统的能量传输、存储和消费方式带来了巨大影响<sup>[3,4]</sup>。因此, 在具有多种能源供能、转换与存储设备协调互补特征的多能源系统中, 考虑风电、光伏发展趋势对多能源系统碳排放的影响, 通过对多能源系统碳排放的合理评估, 提升多能源系统运行的经济性和低碳性成为目前亟须解决的问题。

目前, 国内外许多文献研究了考虑经济性和低碳性的多能源系统优化运行方法。文献[5]通过对单一能源系统的碳排放数据, 以及含电、热、气耦合的多能源系统碳排放数据进行对比分析, 验证了多能源系统能够实现碳排放量降低, 并在此基础上构建了多能源系统的碳排放评价模型。文献[6]将碳排放权交易引入多能源系统的调峰交易, 通过计算调峰产生的碳排放量, 提出了考虑

环境成本的多能源系统调峰交易优化调度模型。文献[7]在考虑低温余热回收的分布式多能源系统优化运行模型中引入经济与环境评价指标, 在最优决策方案下实现了能源效益提升和碳排放量下降。文献[8]分析了电动汽车和多能源储能系统的可调度能力, 提出了一种考虑碳排放权交易机制的多能源系统与负荷聚合商收益最大的多主体低碳优化运行策略。文献[9]构建了计及碳捕集装置和碳交易机制的工业园区多能源系统低碳经济优化调度模型, 增加了新能源的利用途径和降低了碳排放量。文献[10]考虑了多能源系统能源转换和存储设备的复杂性和能源多样性, 采用生命周期分析法将不同能源转换过程的碳排放系数进行量化, 建立了多能源系统的经济和环境效益分析模型。以上研究成果对于促进多能源系统经济性提升和低碳化发展具有一定意义, 为解决考虑风光发展趋势与碳排放评估的多能源系统运行优化问题提供了一定的理论指导, 但仍存在一些问题须要解决。低碳政策、区域经济水平、碳减排相关技术对多能源系统的风电、光伏发展具有较大影响, 如何充分考虑风光的发展趋势及其对多能源系统碳排放的影响, 通过多能源转换与存储设备的高

收稿日期: 2023-12-11。

基金项目: 国家电网公司科技项目(526630220007)。

作者简介: 步天龙(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事多能源系统优化运行研究。E-mail: butianlong106@126.com

效协调来实现多能源系统的运行效益和碳减排能力的提升,是目前多能源系统低碳运行须要解决的主要问题之一。

### 1 多能源系统模型

本文研究的多能源系统是一个以热电联产机组、风力发电机组、光伏发电机组为电源,以电力系统、热力系统和天然气系统为能源分配网络,以电、热、气多种能源消费单元为负荷,以储电、储热、储气为多种能量存储单元,包含多能源生产、输运、转换、分配、存储和消费环节的整体。多能源系统的拓扑结构如图1所示。

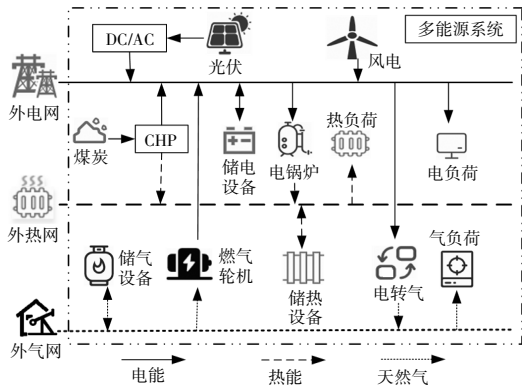


图1 多能源系统结构图

Fig.1 Structure diagram of multi-energy system

已有相关文献研究建立了燃煤热电联产机组(Combined Heat and Power, CHP)、电锅炉、电转气、燃气轮机等能量转换设备,以及电、热、气储能设备的模型<sup>[11,12]</sup>。在多能源供能、转换与存储设备的能量输入输出特性的基础上,本文以电、热、气为能源输入和能源输出,建立多能源系统的输入、转换、分配、存储、输出环节的功率平衡模型:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & \varepsilon_5 \eta_{CT}^E \\ \varepsilon_2 \eta_{EB} & \varepsilon_4 & \varepsilon_6 \eta_{CT}^H \\ \varepsilon_3 \eta_{EG} & 0 & \varepsilon_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_t^{E-in} \\ P_t^{H-in} \\ P_t^{G-in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_t^{E-out} \\ P_t^{H-out} \\ P_t^{G-out} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} P_t^{E-in} = P_t^{W} + P_t^{PV} + P_t^{E-CH} + P_t^{E-S} + P_t^{E-buy} + P_t^{E-ex} \\ P_t^{H-in} = P_t^{H-EB} + P_t^{H-CH} + P_t^{H-S} + P_t^{H-buy} + P_t^{H-ex} \\ P_t^{G-in} = P_t^{G-EG} + P_t^{G-S} + P_t^{G-buy} + P_t^{G-ex} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_t^{E-in}, P_t^{H-in}, P_t^{G-in}, P_t^{E-out}, P_t^{H-out}, P_t^{G-out}$ 分别为多能源系统电、热、气的输入、输出功率; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别为

输入的电分配到供电、电锅炉、电转气装置的系数; $\varepsilon_4$ 为输入的热能分配到供热装置的系数; $\varepsilon_5, \varepsilon_6$ 分别为输入的天然气分配到燃气轮机和供气装置的系数; $\eta_{CT}^E, \eta_{CT}^H$ 分别为燃气轮机的气转电、气转热效率; $\eta_{EB}, \eta_{EG}$ 分别为电锅炉、电转气的转换效率; $P_t^W, P_t^{PV}$ 分别为风电、光伏出力; $P_t^{E-CH}, P_t^{H-CH}$ 分别为CHP的供电、供热出力; $P_t^{H-EB}$ 为电锅炉的供热出力; $P_t^{G-EG}$ 为电转气设备的供气出力; $P_t^{E-buy}, P_t^{H-buy}, P_t^{G-buy}$ 分别为多能源系统向外电、热、气网的购能需求; $P_t^{E-S}, P_t^{H-S}, P_t^{G-S}$ 分别为储电、储热、储气设备的输出; $P_t^{E-ex}, P_t^{H-ex}, P_t^{G-ex}$ 分别为多能源系统与外电、热、气网的能源交互。

### 2 考虑风光发展趋势的多能源系统碳排放评估模型

#### 2.1 风光发展趋势预测模型

不同区域的低碳政策、经济水平、碳减排技术等外部因素均会对风电和光伏装机容量的增长趋势造成一定的影响,因此,本文考虑这些外部因素影响,通过广义巴斯模型分别对风电和光伏的发展趋势进行量化<sup>[13,14]</sup>:

$$E_t^W = \frac{1 - e^{-(m_1+n_1) \int_0^t u_1(t) dt}}{- (m_1+n_1) \int_0^t u_1(t) dt} k_1, 0 \leq t \leq +\infty \quad (3)$$

$$1 + \frac{n_1 e^{- (m_1+n_1) \int_0^t u_1(t) dt}}{m_1}$$

$$E_t^{PV} = \frac{1 - e^{-(m_2+n_2) \int_0^t u_2(t) dt}}{- (m_2+n_2) \int_0^t u_2(t) dt} k_2, 0 \leq t \leq +\infty \quad (4)$$

$$1 + \frac{n_2 e^{- (m_2+n_2) \int_0^t u_2(t) dt}}{m_2}$$

式中: $E_t^W, E_t^{PV}$ 分别为 $t$ 时段风电和光伏的装机容量; $m_1, n_1, m_2, n_2$ 分别为多能源系统风力、光伏发电技术的创新和模拟系数; $k_1, k_2$ 分别为多能源系统风光发展潜力; $u_1(t), u_2(t)$ 分别为外部因素对风光发展趋势的影响情况,均为可积函数,积极影响下取值大于1,消极影响下取值小于1,当取值等于1时不考虑外部因素影响。

$$\begin{cases} u_1(t) = 1 + x_1 e^{z_1^1 (t-y_1^1)} R_1^1 + x_1^2 R_2^1 \\ R_1^1 = 1, y_1^1 \leq t \\ R_2^1 = 1, y_1^2 \leq t \leq z_1^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_2(t)=1+x_2^1 e^{z_2^1(t-y_2^1)} R_2^1+x_2^2 R_2^2 \\ R_2^1=1, y_2^1 \leq t \\ R_2^2=1, y_2^2 \leq t \leq z_2^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $u_1(t), u_2(t)$  包含指数冲击影响部分和矩形冲击影响部分，分别表示低碳政策力度加大、区域经济水平提升、碳减排相关技术突破等外部因素对风电、光伏发展趋势在某一时间和某一段时间下产生的影响； $x_1^1, x_2^1, y_1^1, y_2^1, z_1^1, z_2^1$  分别表示指数冲击的冲击强度、冲击时间、衰减速度； $x_1^2, x_2^2, y_1^2, y_2^2, z_1^2, z_2^2$  分别表示矩形冲击的强度和起、止时间。

### 2.2 考虑风光发展趋势的多能源系统碳排放评估模型

风电和光伏的装机容量在多能源系统发电总装机中的占比与多能源系统的碳排放量密切相关，须要在考虑风光发展趋势下量化分析多能源系统的碳排放量，因此，本文构建了考虑风光发展趋势的多能源系统碳排放评估模型。多能源系统的碳排放主要源自设备循环和能源循环两个方面，设备循环的碳排放是多能源系统内多能源供能、转换与存储设备在生产、运输、运行和处理 4 个环节下产生的，能源循环的碳排放主要是多能源系统消耗的煤炭和天然气在生产、运输、供能和废气处理 4 个环节下产生的。

#### ① 设备循环的碳排放评估系数

设备  $i$  的单位供能量碳排放评估系数  $\gamma_i$  可表示为

$$\gamma_i = \frac{\sum_{s=1}^4 E_i^s W_i}{\delta_L S_i \alpha_i} \quad (7)$$

式中：设备  $i$  包括风电、光伏、CHP、燃气轮机、电锅炉、电转气、电热气储能设备， $i \in \{W, PV, CH, GT, EB, EG, E-S, H-S, G-S\}$ ； $E_i^s$  为设备  $i$  在环节  $s$  的能耗； $\delta_L$  为负荷系数； $W_i, S_i, \alpha_i$  分别为设备  $i$  的碳排放强度、供能量、使用寿命； $\gamma_i$  的单位为  $\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

#### ② 能源循环的碳排放评估系数

$$\begin{aligned} \gamma_{co} = & W_{co}^1 (R_{co}^1 + \beta_{co}^1 + \beta_{co}^2) + \\ & \sum_{a=1}^A (R_{co}^a W_{co}^a \varphi_{co}^a S_{co}) + R_{co}^3 W_{co}^3 + \gamma_{co}^4 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\gamma_{ch} = W_{ch}^1 (R_{ch}^1 + \beta_{ch}^1) + R_{ch}^2 W_{ch}^2 \varphi_{ch} S_{ch} + R_{ch}^3 W_{ch}^3 + \gamma_{ch}^4 \quad (9)$$

式中： $R_{co}^1, W_{co}^1, \beta_{co}^1, \beta_{co}^2$  分别为煤炭生产的单位损失、碳排放强度、自燃损失率、洗选损失率； $R_{ch}^1, W_{ch}^1, \beta_{ch}^1$  分别为天然气生产的单位损失、碳排放强度、自逸率； $R_{co}^a, W_{co}^a, \varphi_{co}^a, S_{co}$  分别为煤炭在运输方式  $a$  下的单位损失、碳排放强度、运输距离与总循环距离的比值、平均运输距离； $R_{ch}^2, W_{ch}^2, \varphi_{ch}, S_{ch}$  分别为天然气运输的单位损失、碳排放强度、运输距离与总循环距离的比值、平均运输距离； $R_{co}^3, W_{co}^3, R_{ch}^3, W_{ch}^3$  分别为煤炭、天然气在供能环节的单位损失、碳排放强度； $\gamma_{co}^4, \gamma_{ch}^4$  分别为煤炭、天然气在废气处理环节的单位碳排放系数。

在计算多能源系统设备循环的碳排放和能源循环碳排放评估系数的基础上，考虑风光发展趋势影响，多能源系统在实际运行周期  $T$  内的碳排放量量化结果  $C_{all}$  如式(10)、(11)所示。 $C_{all}$  主要包括可再生能源设备的碳排放  $C_{re}$ 、多能源转换设备的碳排放  $C_{co}$ 、多能源存储设备的碳排放  $C_{st}$ 、多能源系统与外能源网的能源交互和外购能的碳排放  $C_{out}$ 。

$$C_{all} = C_{re} + C_{co} + C_{st} + C_{out} \quad (10)$$

$$\begin{cases} C_{re} = \sum_{t=1}^T (\gamma_W P_t^W + \gamma_{PV} P_t^{PV}) \\ C_{co} = \sum_{t=1}^T \left[ (\gamma_{CH} + \gamma_{co}) P_t^{CH} + (\gamma_{GT} + \gamma_{ch}) P_t^{GT} + \right. \\ \left. \gamma_{EB} P_t^{EB} + \gamma_{EG} P_t^{EG} \right] \\ C_{st} = \sum_{t=1}^T (\gamma_{E-S} P_t^{E-S} + \gamma_{H-S} P_t^{H-S} + \gamma_{G-S} P_t^{G-S}) \\ C_{out} = \sum_{t=1}^T \left[ \mu_{co} \gamma_{co} (\mu_e^{ex} P_t^{E-ex} + \mu_e^{buy} P_t^{E-buy}) + \right. \\ \left. \mu_{co} \gamma_{co} (\mu_h^{ex} P_t^{H-ex} + \mu_h^{buy} P_t^{H-buy}) + \right. \\ \left. \mu_{ch} \gamma_{ch} (P_t^{G-buy} + P_t^{G-ex}) \right] \\ \mu_{co} = E^{CH} / (E_t^W + E_t^{PV} + E_t^{CH} + E_t^{GT}) \\ \mu_{ch} = E^{GT} / (E_t^W + E_t^{PV} + E_t^{CH} + E_t^{GT}) \end{cases} \quad (11)$$

式中： $P_t^W, P_t^{PV}, P_t^{CH}, P_t^{GT}, P_t^{EB}, P_t^{EG}$  分别为风电、光伏、CHP、燃气轮机、电锅炉、电转气在  $t$  时刻的运行功率； $\mu_e^{ex}, \mu_h^{ex}, \mu_e^{buy}, \mu_h^{buy}$  分别为多能源系统与外

能源网进行电能、热能交互和外购电能、热能中燃煤机组供能量占总能量的比值; $E_t^{CH}$ ,  $E_t^{GT}$ ,  $\mu_{co}$ ,  $\mu_{ch}$  分别为 CHP、燃气轮机在多能源系统中的总装机容量及其占总发电容量的比值。

### 3 计及风光发展趋势与碳排放评估的多能源系统优化运行模型

#### 3.1 目标函数

多能源系统运行的总效益  $F$  主要包括多能源系统为外能源网提供能量调节获得的收益  $F_1$ 、碳配额交易收益  $F_2$ 、总运行成本  $F_3$ , 可表示为

$$\max F = \max(F_1 + F_2 - F_3) \quad (12)$$

##### ① 能量调节收益 $F_1$

$$F_1 = \sum_{t=1}^T (f_1^E + f_1^H + f_1^G)$$

$$f_1^E = [\varphi_{EC_{RI}}^E + (1 - \varphi_E) c_{RE}^E] \cdot |P_t^{E-ex}|$$

$$f_1^H = [\varphi_{HC_{RI}}^H + (1 - \varphi_H) c_{RE}^H] \cdot |P_t^{H-ex}|$$

$$f_1^G = [\varphi_{GC_{RI}}^G + (1 - \varphi_G) c_{RE}^G] \cdot |P_t^{G-ex}|$$
(13)

式中:  $f_1^E$ ,  $f_1^H$ ,  $f_1^G$  分别为多能源系统对外电网、外热网、外气网提供能量调节获得的收益;  $\varphi_E$ ,  $\varphi_H$ ,  $\varphi_G$  为 0/1 变量, 当多能源系统调节外电网、外热网、外气网需要输入能量时取 1, 否则取 0;  $c_{RE}^E$ ,  $c_{RE}^H$ ,  $c_{RE}^G$  分别为调节外能源网时输入、输出单位电能、热能、天然气获得的收益。

##### ② 碳配额交易收益 $F_2$

碳交易机制能够促进多能源系统内新能源机组和多能源转换与存储设备以碳排放更低的组合方式运行, 促进新能源系统清洁低碳化建设, 使碳排放更具有经济价值。因此, 本文构建了多能源系统碳配额交易收益模型:

$$F_2 = c_{CQ} \left[ \sum_{t=1}^T \sum_k (\lambda_k P_t^k) - C_{all} \right] \quad (14)$$

式中:  $k \in \{W, PV, CH, GT, EB, EG\}$ ;  $c_{CQ}$  为碳市场交易价格;  $\lambda_k$  为设备  $k$  的单位碳配额系数。

##### ③ 总运行成本 $F_3$

多能源系统在实际运行周期  $T$  内的总运行成本  $F_3$  包括多能源系统的运维成本  $f_3^1$  和购能成本  $f_3^2$ :

$$F_3 = \sum_{t=1}^T (f_3^1 + f_3^2)$$

$$f_3^1 = c_{ma} |P_t^{ma}|$$

$$f_3^2 = c_{buy}^E P_t^{E-buy} + c_{buy}^H P_t^{H-buy} + c_{buy}^G P_t^{G-buy}$$
(15)

式中:  $c_{ma}$  为单位运维成本;  $P_t^{ma}$  为单个维护周期内截至  $t$  时刻多能源供给累计值;  $c_{buy}^E$ ,  $c_{buy}^H$ ,  $c_{buy}^G$  分别为外购电、热、气的单位成本。

#### 3.2 约束条件

##### ① 功率平衡约束

$$L_t^E = P_t^W + P_t^{PV} + P_t^{E-CH} + P_t^{E-S} + P_t^{E-buy} + P_t^{E-ex} - P_t^{EB} - P_t^{EG}$$

$$L_t^H = P_t^{H-EB} + P_t^{H-CH} + P_t^{H-S} + P_t^{H-buy} + P_t^{H-ex}$$

$$L_t^G = P_t^{G-EG} + P_t^{G-S} + P_t^{G-buy} + P_t^{G-ex} - P_t^{G-CH}$$
(16)

##### ② 多能源转换设备的功率约束

$$P_{min}^{GT} \leq P_t^{GT} \leq P_{max}^{GT}$$

$$P_{min}^{CH} \leq P_t^{CH} \leq P_{max}^{CH}$$

$$P_{min}^{EB} \leq P_t^{EB} \leq P_{max}^{EB}$$

$$P_{min}^{EG} \leq P_t^{EG} \leq P_{max}^{EG}$$
(17)

式中:  $P_{max}^{GT}$ ,  $P_{min}^{GT}$ ,  $P_{max}^{CH}$ ,  $P_{min}^{CH}$ ,  $P_{max}^{EB}$ ,  $P_{min}^{EB}$ ,  $P_{max}^{EG}$ ,  $P_{min}^{EG}$  分别为燃气轮机、CHP、电锅炉、电转气设备运行功率的上限和下限。

##### ③ 联络线的功率约束

$$P_{min}^{E-ex} \leq P_t^{E-ex} \leq P_{max}^{E-ex}$$

$$P_{min}^{H-ex} \leq P_t^{H-ex} \leq P_{max}^{H-ex}$$

$$P_{min}^{G-ex} \leq P_t^{G-ex} \leq P_{max}^{G-ex}$$
(18)

式中:  $P_{max}^{E-ex}$ ,  $P_{min}^{E-ex}$ ,  $P_{max}^{H-ex}$ ,  $P_{min}^{H-ex}$ ,  $P_{max}^{G-ex}$ ,  $P_{min}^{G-ex}$  分别为电、热、气联络线功率的上限和下限。

##### ④ 储能设备的功率约束

$$\sigma_{s,t}^x P_{s,min}^x \leq P_{s,t}^x \leq \sigma_{s,t}^x P_{s,max}^x$$

$$\sigma_{r,t}^x P_{r,min}^x \leq P_{r,t}^x \leq \sigma_{r,t}^x P_{r,max}^x$$

$$0 \leq \sigma_{s,t}^x + \sigma_{r,t}^x \leq 1$$
(19)

式中:  $x \in \{E-S, H-S, G-S\}$ ;  $P_{s,t}^x$ ,  $P_{r,t}^x$  分别为  $t$  时刻设备  $x$  的充、放功率;  $P_{s,max}^x$ ,  $P_{s,min}^x$ ,  $P_{r,max}^x$ ,  $P_{r,min}^x$  分别为设备  $x$  充、放能的上限和下限;  $\sigma_{s,t}^x$ ,  $\sigma_{r,t}^x$  分别为  $t$

时刻储能设备  $x$  充、放能的运行状态, 停运状态取 0, 工作状态取 1。

多能源储能设备的充、放能功率与储能剩余容量关联约束可表示为

$$E_{s,t}^x = E_{s,t-1}^x + \sigma_{s,t}^x \tau_s^x P_{s,t}^x \Delta t - \frac{\sigma_{r,t}^x P_{r,t}^x \Delta t}{\tau_r^x} \quad (20)$$

式中:  $E_{s,t}^x, E_{s,t-1}^x$  分别为  $t$  和  $t-1$  时刻设备  $x$  的剩余容量;  $\tau_s^x, \tau_r^x$  分别为设备  $x$  的储、放能效率。

⑤ 电网、热网、天然气的网络约束

电网、热网、天然气的网络约束参见文献[15]。

4 算例仿真

本文以我国蒙东某多能源系统的风电和光伏装机容量、各类型设备运行情况和碳排放量等数据为基础, 参考文献[16]来改进 IEEE33 节点电力系统、14 节点天然气系统、6 节点热力系统构成的仿真系统进行算例分析。基于 MATLAB R2018a 仿真平台实现本文所提考虑风光发展趋势与碳排放评估的多能源系统优化运行模型仿真, 并调用 CPLEX 进行求解。设备循环的碳排放参数、能源循环的碳排放参数、单位有功碳配额系数参考文献[17, 18]; 多能源转换与存储设备运行参数如表 1 所示, 广义巴斯模型内冲击函数的参数设置如表 2 所示, 表 2 中“-”表示未测得该项数据。

表 1 多能源系统的运行参数

Table 1 Operating parameters of multi-energy systems

设备	效率/%	单位运维成本	功率下限/MW	功率上限/MW
GT	40	460 元/MW	1	70
CH	58	250 元/MW	1	55
EG	75	68 元/MW	0	24
EB	96	240 元/MW	0	18
E-S	92	30 元/(MW·h)	0	30
H-S	91	24 元/(MW·h)	0	15
G-S	95	580 元/(MW·h)	0	20
W	-	750 元/MW	-	-
PV	-	600 元/MW	-	-

表 2 冲击函数的基本参数

Table 2 Basic parameters of bump function

参数	取值	参数	取值
$x_1^1$	2.2	$x_1^2$	2.5
$x_2^1$	2.6	$x_2^2$	2.4
$y_1^1$	1.5	$y_1^2$	2.0
$y_2^1$	1.0	$y_2^2$	1.8
$z_1^1$	-0.026	$z_1^2$	4.5
$z_2^1$	-0.03	$z_2^2$	5.0

根据前 12 a 的风电和光伏累计装机数据, 采用最小二乘法对广义巴斯模型参数进行估计的结果如表 3 所示。在此基础上, 对未来 4 a 能源系统内风电和光伏的发展趋势进行预测, 预测结果如图 2 所示。

表 3 广义巴斯模型的基本参数

Table 3 Basic parameters of the generalized Bass model

参数	$m_1$	$m_2$	$n_1$	$n_2$	$k_1$	$k_2$
取值	$5.6 \times 10^{-5}$	$4.42 \times 10^{-5}$	0.736 4	0.691 2	18 025	16 507

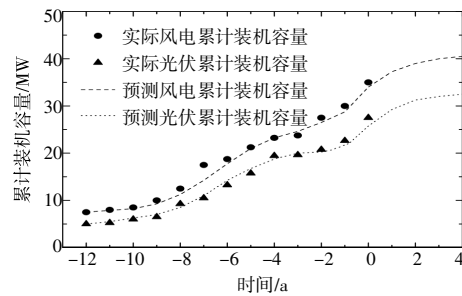


图 2 风电和光伏的发展趋势预测

Fig.2 Prediction of the development trends of wind power and PV

从图 2 中风电和光伏的发展趋势预测结果可以看出, 多能源系统内的新能源装机容量在前 8~5 a 呈快速增长趋势, 自前 4 a 后增长较为缓慢, 在低碳政策、经济发展和新能源相关技术的影响下, 自前 2 a 风电和光伏装机容量的增长速度加快, 在未来 2 a 随着风电和光伏技术发展逐渐成熟, 多能源系统内风电和光伏的装机容量基本达到阶段性峰值。

目前多能源系统内能源转换和存储设备的规划年限为 10 a, 在未来 4 a 内各类型设备的装机容量能够满足多能源系统的正常运行。因此, 为验证本文提出的考虑风光发展趋势与碳排放评估的多能源系统优化运行模型的有效性, 基于多能源系统内风电和光伏装机容量的预测结果, 设置以下 3 种场景。

场景 1: 以固定的风光增长率计算未来风电和光伏的装机容量, 不考虑风光发展趋势对碳排放量评估影响下的传统的多能源系统优化运行模型。

场景 2: 以固定的风光增长率计算未来风电和光伏的装机容量, 考虑风光发展趋势对碳排放量评估影响下的多能源系统优化运行模型。

场景 3: 采用广义巴斯模型对风电和光伏的

发展趋势进行量化,考虑风光发展趋势对碳排放量化评估的影响下多能源系统优化运行模型,即本文提出的考虑风光发展趋势与碳排放评估的多能源系统优化运行模型。

分别在3种场景下对多能源系统进行运行优化,得到场景1~3下多能源系统在未来4a的运行结果、碳排放量结果、弃风率与弃光率对比结果,分别如表4、图3和图4所示。

表4 3种场景下多能源系统运行结果对比

Table 4 Comparison of operating results of multi-energy systems in three scenarios

亿元

未来时间/a	1 (场景1/场景2/场景3)	2 (场景1/场景2/场景3)	3 (场景1/场景2/场景3)	4 (场景1/场景2/场景3)
能量调节的收益	1.260/1.300/1.350	1.320/1.347/1.405	1.346/1.398/1.435	1.362/1.425/1.478
碳配额交易收益	0.260/0.283/0.303	0.377/0.434/0.541	0.289/0.311/0.348	0.316/0.344/0.369
总运行成本	1.180/1.171/1.150	1.218/1.204/1.180	1.245/1.226/1.207	1.258/1.240/1.224
总收益	0.340/0.412/0.503	0.377/0.434/0.541	0.390/0.483/0.576	0.420/0.529/0.623

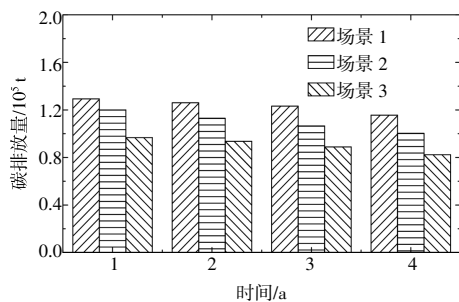
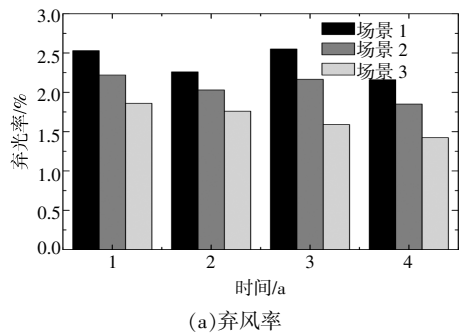
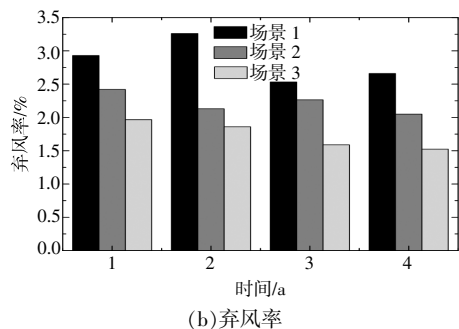


图3 3种场景下多能源系统的碳排放量对比

Fig.3 Comparison of carbon emissions of multi-energy systems in three scenarios



(a)弃风率



(b)弃光率

图4 3种场景下多能源系统弃风率与弃光率对比

Fig.4 Comparison of wind and light curtailment rate of multi-energy systems in three scenarios

由表4和图3的仿真结果进行对比分析可知,随着风电、光伏装机容量的逐年增加,3种场

景下多能源系统为外能源网提供的能量调节收益和碳配额交易收益均呈增长趋势,多能源系统整体的碳排放量均逐渐降低。场景1和场景2都是以固定的风光增长率计算未来风电和光伏的装机容量,但是结合图3,4和表4可以看出,与场景1相比,场景2中多能源系统运行优化策略考虑风光发展趋势对系统碳排放量的影响,通过多种类设备的协调运行使得系统整体的运行效益有所提升,碳排放量、弃风率和弃光率均有所降低。

另外,结合图3,4和表4可知,与场景1和场景2中基于固定风光增长率的多能源系统运行优化模型相比,场景3考虑了低碳政策、区域经济发展水平、碳减排相关技术等因素对风电和光伏发展趋势的影响,根据风电和光伏装机容量历史数据,通过广义巴斯模型能够更加准确地对风电和光伏的发展趋势进行量化,使得考虑风光发展趋势与碳排放评估的多能源系统优化运行模型具有更强的调节能力,能够促进多能源供给、转换、储能设备间的高效协同运行,明显提升了多能源系统的运行效益,降低了系统的碳排放量、弃风率、弃光率。

## 5 结束语

为促进多能源系统运行经济性提升和低碳性发展,本文提出了一种考虑风光发展趋势与碳排放评估的多能源系统优化运行模型。以我国蒙东某多能源系统的实际运行数据为基础,通过算例仿真对比分析可知,本文构建的综合考虑风光发展趋势和碳排放评估的影响,以包含多能源系统能量调节收益、碳配额交易收益和运行成本的总收益最大为目标的多能源系统优化运行模型,能够提升多能源系统整体的运行效益,降低多能源系统的碳排放量和弃风、弃光率。

## 参考文献:

- [1] 张强,王超,李欣蔚,等.考虑典型电能替代的配电网新能源接纳能力研究[J].可再生能源,2023,41(10):1414-1420.
- [2] 关月,郑旭,徐敬友,等.规模新能源接入下考虑安稳风险评估的受端电网运行优化模型[J].可再生能源,2023,41(7):957-963.
- [3] 李庆生,李震,孙斌,等.计及不确定性的主动配电网分布式能源多时间尺度消纳方法[J].可再生能源,2023,41(5):692-698.
- [4] 柴瑞瑞,李纲.再生清洁能源与传统能源清洁利用:发电企业能源结构转型的演化博弈模型[J].系统工程理论与实践,2022,42(1):184-197.
- [5] 李彦吉,王鑫陶,康赫然,等.考虑效率、效益与碳减排提升的含可再生能源配电网投资优选模型[J].可再生能源,2021,39(12):1662-1668.
- [6] 王义军,孙健淳,高敏,等.考虑含HRD的光热电站和综合需求响应的综合能源系统低碳经济调度[J].东北电力大学学报,2024,44(1):72-82.
- [7] 李响,牛赛.双碳目标下源-网-荷多层评价体系研究[J].中国电机工程学报,2021,41(S1):178-184.
- [8] 李鹏,余晓鹏,周青青,等.计及风电不确定信息间隙的火电-储能-需求响应多源低碳调峰交易优化模型[J].电力建设,2022,43(12):131-140.
- [9] 韩俊涛,韩恺,王永真,等.低碳分布式综合能源系统的能值、经济和环境优化评价[J].动力工程学报,2022,42(11):1089-1098.
- [10] 章攀钊,谢丽蓉,马瑞真,等.考虑电动汽车集群可调度能力的多主体两阶段低碳优化运行策略[J].电网技术,2022,46(12):4809-4825.
- [11] 李嘉祺,陈艳波,陈来军,等.工业园区综合能源系统低碳经济优化运行模型[J].高电压技术,2022,48(8):3190-3200.
- [12] 王泽森,石岩,唐艳梅,等.考虑LCA能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J].中国电机工程学报,2019,39(6):1614-1626,1858.
- [13] 杨冬锋,冉子旭,姜超.面向规模化风电消纳的电-气-氢能源互联系统协同规划[J].东北电力大学学报,2023,43(3):91-100.
- [14] Z Y She, R Cao, B C Xie, et al. An analysis of the wind power development factors by generalized bass model: a case study of China's eight bases [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231(10): 1503-1514.
- [15] 朱继忠,何晨可,陈婧韵,等.综合能源系统环境下电动汽车充换电设施规划综述[J].南方电网技术,2022,16(1):14-32.
- [16] 杨子建,赵璐,王越超,等.计及厂用电不平衡状态感知与碳减排的多能源储能优化配置模型[J].可再生能源,2023,41(11):1512-1519.
- [17] X Zhou, Q Zhao, Y Zhang, et al. Integrated energy production unit: an innovative concept and design for energy transition toward low-carbon development [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(6): 1133-1139.
- [18] 初壮,赵蕾,孙健浩,等.考虑热能动态平衡的含氢储能的综合能源系统热电优化[J].电力系统保护与控制,2023,51(3):1-12.

## Optimization operation model of multi-energy system considering wind power and PV development trend and carbon emission assessment

Bu Tianlong<sup>1</sup>, Kou Hanpeng<sup>1</sup>, Zhang Dapei<sup>1</sup>, Nie Weifeng<sup>1</sup>, Ning Zhaojun<sup>1</sup>, Wang Jian<sup>2</sup>  
(1.Hulunbuir Power Supply Company of State Grid East Inner Mongolia Power Co.,Ltd., Hulunbuir 021100, China; 2.Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** With the construction of the energy internet and the proposal of the dual carbon goal, the quantitative assessment of carbon emissions of multi-energy systems is a key link to achieve low-carbon operation of the system. Therefore, an optimal operation model of multi-energy system considering wind power and PV development trend and carbon emission assessment is proposed in this paper. Firstly, by analyzing the energy input and output characteristics of thermal power units, gas turbines, P2G, and multi-energy storage equipment, the topology and multi-energy power balance model of the multi-energy system are established; Secondly, the generalized Bass model is used to quantify the development trend of wind power and photovoltaic. On this basis, a carbon emission assessment model of the multi energy system considering the development trends of wind power and photovoltaic is established; Then, with the goal of maximizing the total revenue including energy regulation revenue, carbon quota trading revenue and operating cost of multi-energy system, an optimal operation model of multi-energy system considering wind power and PV development trend and carbon emission assessment is proposed. Finally, the results of the example show that the optimization operation model of multi-energy system proposed in this paper can effectively improve the operational benefits and reduce carbon emissions of the multi-energy systems.

**Keywords:** multi-energy systems; carbon emission assessment; renewable energy; energy storage equipment