



研究与开发

基于DG不确定仿射模型的综合能源系统低碳优化规划方法

江涛¹, 徐聪¹, 贾少辉¹, 王深^{1,2}, 张亚健³

(1. 中远海运(天津)有限公司, 天津 300010;

2. 天津鲲鹏信息技术有限公司, 天津 300010;

3. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 针对风电、光伏等新能源分布式发电系统(distributed generator, DG)受环境因素变化导致出力不确定、现有碳交易模型交易价格固定导致减碳成本增多的问题, 提出基于DG不确定仿射模型的综合能源系统低碳优化规划方法。首先, 根据环境条件建立基于矩阵形式仿射算法的DG出力模型, 降低DG出力不确定性对综合能源系统优化规划的影响。其次, 将碳排放量作为惩罚措施引入综合能源系统优化规划中, 改进传统碳交易模型, 降低综合能源系统碳排放量。然后, 基于差分进化粒子群优化算法, 对建立的综合能源系统低碳规划模型求解, 避免算法在寻优过程陷入局部最优。最后, 在IEEE 33节点系统上的仿真结果表明, 所提规划方法比传统随机优化和区间优化规划方法分别降低了8.68%和2.93%的总投资成本, 比传统固定碳交易价格模型降低了6.28%的碳排放量。

关键词: 阶梯式碳交易; 综合能源系统; 仿射模型; 差分进化粒子群算法; 区间优化

中图分类号: TM73

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024162

Low-carbon optimization planning method for integrated energy system based on DG uncertainty affine model

JIANG Tao¹, XU Cong¹, JIA Shaohui¹, WANG Shen^{1,2}, ZHANG Yajian³

1. COSCO Shipping (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300010, China

2. Tianjin Keepsens Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300010, China

3. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract: Aiming at the problem that the output of distributed generators (DG) of new energy sources such as wind power and photovoltaic is uncertain due to changes in environmental factors, and the transaction price of the existing carbon trading model is fixed, resulting in increased carbon reduction costs, an integrated energy system optimization

收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-05-08

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (No.62103254); 中国远洋海运集团“十四五”第一批科研项目 (No.2023-1-Z010-02)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China Youth Project (No.62103254), The First Batch of Scientific Research Projects of China COSCO Shipping Group in the “14th Five-Year Plan” (No.2023-1-Z010-02)

planning method that takes into account dynamic carbon emission constraints and DG uncertainty was proposed. Firstly, a DG output model based on matrix affine algorithm was established according to environmental conditions to reduce the impact of DG output uncertainty on the optimization planning of the integrated energy system. Secondly, carbon emissions was introduced as a punitive measure into the optimization planning of the integrated energy system to improve the traditional carbon trading model and reduce the carbon emissions of the integrated energy system. Then, based on the differential evolution-particle swarm optimization algorithm, the established low-carbon planning model of the integrated energy system was solved to avoid the algorithm from falling into local optimality during the optimization process. Finally, the simulation results on an IEEE 33 node system show that the proposed planning method reduces the total investment cost by 8.68% and 2.93% respectively compared with the traditional stochastic optimization and interval optimization planning methods. Compared with the traditional fixed carbon trading price model, carbon emissions are reduced by 6.28%.

Key words: ladder carbon trading, integrated energy system, affine model, differential evolution particle swarm algorithm, interval optimization

0 引言

综合能源系统 (integrated energy system, IES) 可以有效利用电、热、气等多种能源, 促进可再生能源消纳并减少碳排放, 是加速实现“碳中和”目标的重要途径^[1]。然而, 由于 IES 中分布式发电系统 (distributed generator, DG) 的不确定性, 给系统运行带来了挑战。一些国家、地区关于能源系统碳排放的新政策也对 IES 未来的发展提出了新要求^[2]。

为应对 IES 优化规划中的挑战, 专家学者做了广泛的研究。文献[3]总结了能源互联网的特征和结构, 能源互联网是规划和管理未来综合能源系统的一个有效框架。文献[4]根据燃气电力基础设施的要求, 提出了一种燃气和电力网络联合扩建的规划模型, 以降低扩建成本。文献[5]提出了一种综合天然气和电力系统的双层多阶段规划方案, 基于运行约束下的最优经济调度模型来最小化投资和运行成本。上述研究聚焦在降低综合能源系统的安装和运营成本, 对能源类型考虑有限。对于具有显著间歇性和不确定性的可再生能源而言, DG 来源的多样性会影响 IES 的效率和可靠性^[6]。

为了解决这一问题, 文献[7]提出了一种基于

概率区间的 IES 规划方法, 通过分段线性化来解决非线性积分项, 提高了计算效率, 减少了风电 (wind turbine, WT) 不确定性的影响。文献[8]提出了一种气-电-热综合能源系统分层协同优化调度的方法, 利用混合粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法对优化目标进行求解。文献[9]提出了一种包含热电联产机组、电锅炉、风力涡轮机和储能的综合能源系统优化规划方案, 使用蒙特卡罗算法模拟生成 DG 的各种场景以研究其不确定性。上述研究采用概率函数、场景生成和输出预测等多项技术, 建立 DG 模型并减少其输出不确定性对 IES 规划的影响。然而, 在 IES 优化规划中使用 DG 输出的确定性数据在处理长期不确定性信息方面有较大的局限性^[10], 需要准确有效的优化策略来对不确定性进行建模并保证 IES 长期运行的经济性。近年来, 基于区间优化的不确定性建模方法被广泛关注, 该方法建立的区间模型基于不确定性上限和下限, 在运行约束下寻找最优和最差场景以获得最优解^[11]。然而, 区间模型通常具有很强的局限性, 由于乘法的固有限制, 经过几次计算后, IES 规划成本的结果范围会扩大。考虑到上述局限性, 本文优化了一种矩阵形式的仿射模型, 以解决现有 IES 最优规划方法中确定性数据和算法局限性的



问题。

为应对气候变化,实现“双碳”目标,IES规划中需要面对的一个新兴挑战是减少碳排放^[12]。电动汽车和可再生资源等可持续能源将在减少碳排放中扮演重要角色^[13]。为此,文献[14]将能源中心矩阵模型作为复杂网络,以优化不同情景下的经济可行性并减少温室气体排放。文献[15]引入了阶梯式奖惩碳交易模型进行电-燃气一体化能源系统规划,以降低碳排放。文献[16]提出了一种适用于电力系统调度的用户侧碳排放惩罚方案,其目标函数中使用固定碳排放惩罚来优化系统运行成本。文献[17]提出了电力和天然气系统的共同规划建设框架,通过混合整数非线性优化来降低建设和减碳成本。尽管上述研究将碳排放作为IES规划的一个因素,但惩罚机制和由此产生的碳减排效果仍然相对有限。

针对DG不确定性问题和降碳减排需求,本文提出了基于DG不确定仿射模型的综合能源系统低碳优化规划方法。首先,建立计及DG不确定仿射模型和阶梯式碳交易的IES多能耦合模型,与随机优化和区间方法相比,仿射算法可以根据环境条件对DG输出进行建模,从而有效解决DG输出的不确定性对IES规划的影响。然后,基于阶梯式碳交易模型,将碳排放量作为惩罚措施引入IES优化规划中,以总运营成本最低为目标建立IES优化规划模型。接着,提出一种差分进化粒子群(differential evolution particle swarm optimization, DE-PSO)算法对IES优化规划模型求解,保证对所提复杂问题的全局优化能力。最后,在IEEE 33节点网络拓扑上进行仿真分析,验证了所提方法的有效性。

1 计及DG不确定仿射模型和阶梯式碳交易的IES多能耦合模型

1.1 IES多能耦合模型

综合能源系统可以充分调动各能源子系统参

与电、热、气资源的优化配置,有效提高系统运行经济性和可再生能源利用率。IES架构如图1所示,IES架构主要包括可再生能源、能源耦合设备和储能设备,碳排放是由于耦合设备和使用负载上的能源消耗而产生的。

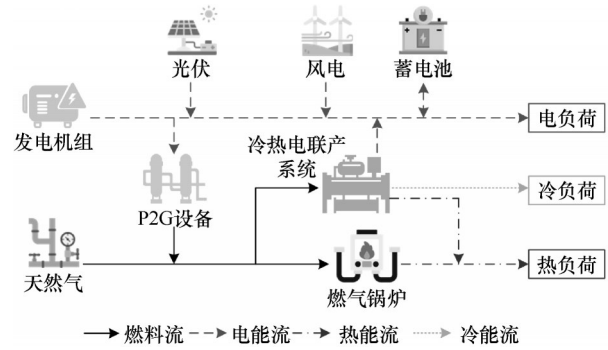


图1 IES架构

IES的能量输出部分包括传统发电机组、风电、光伏(photovoltaic, PV)、天然气以及冷热电联产(combined cooling heating and power, CCHP)系统、电转气(power to gas, P2G)设备、燃气锅炉(gas boiler, GB)等设施。为了有效表征电、热、气、冷的动态平衡,构建IES能源耦合数学模型来表示输入和输出平衡特性,即:

$$\begin{cases} P_{WT} + P_{PV} - P_{P2G} + P_{CCHP} \pm P_{GRID} \pm P_S = P_L \\ H_{CCHP} + H_B = H_L \\ G_{P2G} - G_{CCHP} - G_B \pm G_{NET} = G_L \\ C_{CCHP} = C_L \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_{WT} 和 P_{PV} 分别表示风电和光伏的输出功率, P_{P2G} 、 P_{CCHP} 分别表示P2G设备、CCHP系统的电功率, P_{GRID} 表示电网的功率, P_S 表示储能设备的电功率, H_{CCHP} 和 H_B 分别表示CCHP系统和燃气锅炉的输出热能, G_{P2G} 表示P2G设备的输出天然气量, G_{CCHP} 表示CCHP系统的消耗天然气量, G_B 表示燃气锅炉的用气量, G_{NET} 表示天然气网用气量, C_{CCHP} 表示CCHP系统的冷输出功率, P_L 、 H_L 、 G_L 、 C_L 分别表示电、热、天然气和冷的负荷大小。

IES 中考虑了能量转换设备 (GB、P2G、CCHP) 进行电、热、气、冷的转换效率, GB、P2G、CCHP 的具体转换效率方程为:

$$\begin{bmatrix} P_{CCHP} \\ H_{CCHP} \\ C_{CCHP} \\ G_{P2G} \\ H_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{CCHP_P} & 0 & 0 \\ \eta_{CCHP_H} & 0 & 0 \\ \eta_{CCHP_C} & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{P2G} & 0 \\ 0 & 0 & \eta_B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G_{CCHP} \\ P_{P2G} \\ G_B \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, η_{CCHP_P} 、 η_{CCHP_H} 、 η_{CCHP_C} 分别表示 CCHP 系统输出电、热、冷的转换效率, η_{P2G} 、 η_B 分别表示 P2G 设备、燃气锅炉的转换效率。

1.2 基于改进仿射算法的 DG 不确定性模型

风电和光伏的不确定性主要由风速和太阳辐射强度的波动引起, 区间数学可以表达 DG 输出的不确定性。在系统规划中采用矩阵形式的仿射模型来考虑 DG 出力不确定性, 可以降低 DG 出力不确定性对 IES 优化规划经济性的影响。

(1) 矩阵形式的改进仿射算法

定义一个二元高阶多项式如下:

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} x^i y^j = \mathbf{X} \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix} \mathbf{Y} = \mathbf{XAY} \quad (3)$$

其中, $A_{ij}=a_{ij}$, $\mathbf{X}=[1, x, \dots, x^n]$, $\mathbf{Y}=[1, y, \dots, y^m]^T$, x^i 和 y^j 分别是 x 的 i 次方和 y 的 j 次方, x 和 y 的区间数分别为 $x \in [x^-, x^+]$ 和 $y \in [y^-, y^+]$, x^+ 和 x^- 分别是 x 的上界和下界, y^+ 和 y^- 分别是 y 的上界和下界。 x 和 y 的仿射形式为:

$$\begin{cases} x' = x_0 + x_1 \phi_x, x_0 = (x^+ + x^-)/2, x_1 = (x^+ - x^-)/2 \\ y' = y_0 + y_1 \phi_y, y_0 = (y^+ + y^-)/2, y_1 = (y^+ - y^-)/2 \end{cases} \quad (4)$$

其中, ϕ_x 和 ϕ_y 是噪声。 x 和 y 的仿射形式可以进一步表示为如下向量:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}' &= (1, \phi_x, \dots, \phi_x^n) \\ \mathbf{Y}' &= (1, \phi_y, \dots, \phi_y^m)^T \end{aligned} \quad (5)$$

为了将式 (3) 重写为仿射形式, 定义两个变换矩阵 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{C}$ 来更新矩阵 $\mathbf{A}$, 如下所示。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{i1} & \cdots & B_{ij} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{i1} & \cdots & C_{ij} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,

$$B_{ij} = \begin{cases} \binom{j}{i} x_0^{j-i} x_1^i, i \leq j \\ 0, i > j \end{cases}, i=0, 1, \dots, n, j=0, 1, \dots, n \quad (8)$$

$$C_{ij} = \begin{cases} \binom{j}{i} y_0^{j-i} y_1^i, i \leq j \\ 0, i > j \end{cases}, i=0, 1, \dots, m, j=0, 1, \dots, m \quad (9)$$

函数 $f(x, y)$ 的仿射形式可以表示为以下矩阵形式:

$$f(x', y') = \mathbf{X}'(\mathbf{BAC})\mathbf{Y}' \quad (10)$$

利用式 (10) 中的修正矩阵, 可以将不确定变量的二元多项式转化为仿射形式, 从而提高计算精度和速度。

(2) 矩阵仿射形式的 DG 输出模型

光伏发电的输出主要受太阳辐射的影响, 可以建模为:

$$P_{PV} = RS\eta_{PV} \quad (11)$$

其中, R 为太阳辐射强度, S 为太阳能电池板面积, η_{PV} 为光电转换效率。

风电输出的不确定性主要是由风速的变化引起的, 可以建模为:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ P_{ra} \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_{ra}^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} \leq v < v_{ra} \\ P_{ra}, & v_{ra} \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (12)$$

其中, v_{ci} 、 v_{ra} 和 v_{co} 分别是切入风速、额定风速和切出风速, v 为实际风速, P_{ra} 为 WT 的额定功率。

在本文考虑的 IES 中, DG 的不确定性主要源于风速和太阳辐射率的变化。风速遵循正态分布用式 (13) 表示, 太阳辐射强度可以用式 (14) 中的 $R(\delta, T_p)$ 函数来近似^[18]。DG 的不确定性可以



描述为:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (13)$$

$$R(\delta, T_p) = \frac{8\pi hc}{\delta^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\delta kT}} - 1} \quad (14)$$

其中, μ 是均值, σ 是标准差, δ 是波长, T_p 是绝对温度, h 是普朗克常数, c 是光速, k 是玻尔兹曼常数。

IES 的 DG 输出可由式 (11) 和式 (12) 得出:

$$\begin{aligned} P_{DG} &= P_{WT} + P_{PV} \\ &= \frac{P_{ra}}{v_{ra}^3 - v_{ci}^3} v^3 - \frac{P_{ra} v_{ci}^3}{v_{ra}^3 - v_{ci}^3} + RS\eta_{PV} \quad (15) \\ &= k_1 v^3 + k_2 R + a \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{cases} v_{ci} \leq v \leq v_{ra} \\ k_1 = \frac{P_{ra}}{v_{ra}^3 - v_{ci}^3} \\ k_2 = S\eta_{PV} \\ a = -\frac{P_{ra} v_{ci}^3}{v_{ra}^3 - v_{ci}^3} \end{cases} \quad (16)$$

要将式 (15) 转化为仿射形式, A 、 B 、 C 还需根据式 (3)、式 (8)、式 (9) 进行如下变换。

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} a & k_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ k_1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & v_0 & v_0^2 & v_0^3 \\ 0 & v_1 & 2v_0v_1 & 3v_0^2v_1 \\ 0 & 0 & v_1^2 & 3v_0v_1^2 \\ 0 & 0 & 0 & v_1^3 \end{bmatrix}, C = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ R_0 & R_1 \end{bmatrix} \quad (17) \end{aligned}$$

其中, $V' = (1, \phi_v, \phi_v^2, \phi_v^3)^T$, $R' = (1, \phi_R, \phi_R^2, \phi_R^3)^T$, $v_0 = (v_{ra} + v_{ci})/2$, $v_1 = (v_{ra} - v_{ci})/2$, $R_0 = (R_{\max} + R_{\min})/2$, $R_1 = (R_{\max} - R_{\min})/2$, $R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ 分别为当地太阳辐射强度范围的上限和下限值。

基于矩阵形式仿射模型的 DG 不确定性模型可由式 (18) 得到:

$$P_{DG} = V'(BAC)R' \quad (18)$$

1.3 阶梯式碳交易模型

合理的碳交易模型能够降低 IES 的碳排放量。IES 中 DG 并网和 P2G 运行降低的碳排放量可以

表示为:

$$E_{DG}^{CO_2} = \frac{\delta_{GEN} P_{DG}}{\eta_{GEN}} \quad (19)$$

$$E_{P2G}^{CO_2} = \delta_{P2G} P_{P2G} \quad (20)$$

其中, $E_{DG}^{CO_2}$ 和 $E_{P2G}^{CO_2}$ 分别为 DG 并网和 P2G 运行的碳排放减少量, δ_{GEN} 和 δ_{P2G} 分别为传统发电机和 P2G 的碳排放和碳捕获系数, η_{GEN} 是传统发电机的发电效率。

为了量化碳排放成本, 减少碳排放量, 本文根据不同碳排放量设定了 3 个区间的阶梯式碳交易价格。随着碳排放量的增加, 碳交易价格也随之提高, 以减少碳排放。阶梯式碳排放交易模型可表示为:

$$M_{car} = \begin{cases} p_M E_{rl}, E_{rl} \leq E_{\min} \\ p_F (E_{rl} - E_{\min}) + p_M E_{\min}, E_{\min} \leq E_{rl} \leq E_{\max} \\ p_D (1 + \gamma e^{\frac{E_{rl}}{E_{\max}} - 1}) (E_{rl} - E_{\min}) + \\ p_F (E_{\max} - E_{\min}) + p_M E_{\min}, E_{rl} > E_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

$$E_{rl} = E_{CO_2} - E_{DG}^{CO_2} - E_{P2G}^{CO_2} \quad (22)$$

其中, M_{car} 为碳交易成本, p_M 、 p_F 、 p_D 分别为最低碳交易价格、固定碳交易价格、阶梯碳交易价格初值, $E_{\min}$ 和 $E_{\max}$ 分别是最小和最大允许排放量, γ 为可调参数, E_{rl} 是实际碳排放量, E_{CO_2} 是理论碳排放量。

2 IES 低碳优化规划方法

2.1 IES 优化规划目标

IES 优化规划的目标是在确保所有运营约束的同时最小化运营总成本。因此, 目标函数 F 可表示为:

$$\min F = (1 + I_r)^{-n} \cdot$$

$$\sum_{t=1}^T [M_{inv}(t) + M_{ope}(t) + M_{car}(t) + M_{lck}(t)] \quad (23)$$

其中, I_r 表示贴现率, n 表示计息周期数, T 是规划期限 (以年为单位), $M_{inv}(t)$ 、 $M_{ope}(t)$ 、 $M_{car}(t)$ 、 $M_{lck}(t)$ 分别为投资成本、运行成本、碳排放成本、

负荷断电惩罚费用, 分别定义如下:

$$M_{\text{inv}}(t) = \sum_{i \in \Omega_{\text{DG}}} N_i P_{i,t} y_{t,i} + \sum_{j \in \Omega_{\text{GEN}}} G_j P_{j,t} y_{t,j} + \sum_{l \in \Omega_{\text{CCHP}}} C_l P_{l,t} y_{t,l} + \sum_{m \in \Omega_{\text{GB}}} \text{GB}_m P_{m,t} y_{t,m} \quad (24)$$

$$M_{\text{ope}}(t) = \sum_{h=1}^{8760} \left(\sum_{i \in \Omega_{\text{DG}}} N_i P_{i,h,t} + \sum_{j \in \Omega_{\text{GEN}}} G_j P_{j,h,t} + \sum_{l \in \Omega_{\text{CCHP}}} C_l P_{l,h,t} + \sum_{m \in \Omega_{\text{GB}}} \text{GB}_m P_{m,h,t} \right) \quad (25)$$

$$M_{\text{car}}(t) = \sum_{t=1}^T M_{\text{car}} \quad (26)$$

$$M_{\text{lck}}(t) = \sum_{h=1}^T \sum_{h=1}^{8760} P_{\text{lck},h,t} y_{\text{lck-pun}} \quad (27)$$

在式 (24) ~ 式 (27) 中, N_i 、 N_j 、 C_l 、 GB_m 分别为 DG、传统发电机、CCHP、GB 单位容量的投资成本, $P_{i,t}$ 、 $P_{j,t}$ 、 $P_{l,t}$ 和 $P_{m,t}$ 分别为 t 年时第 i 台 DG、第 j 台传统发电机、第 l 台 CCHP、第 m 台 GB 的装机容量, $y_{t,i}$ 、 $y_{t,j}$ 、 $y_{t,l}$ 和 $y_{t,m}$ 分别表示在第 t 年是否安装 DG、传统发电机、CCHP 和/或 GB 的二元变量, $y_{\text{lck-pun}}$ 是单位负荷功率不足的惩罚费用, Ω_{DG} 、 Ω_{GEN} 、 Ω_{CCHP} 和 Ω_{GB} 分别是 DG、传统发电机、CCHP 和 GB 的集合。

2.2 优化规划模型约束

优化规划模型的约束条件主要包括 4 部分: 投资约束、输出电功率约束、运行约束和能源耦合约束。

(1) 投资约束

$$y_{a,t} \leq y_{a,t+1} \quad \forall a \in \Omega_{\text{DG}}, \Omega_{\text{GEN}}, \Omega_{\text{CCHP}}, \Omega_{\text{GB}}, t < T \quad (28)$$

$$y_{a,t} = 0 \quad \forall a \in \Omega_{\text{DG}}, \Omega_{\text{GEN}}, \Omega_{\text{CCHP}}, \Omega_{\text{GB}}, t < T_{a,\text{com}} \quad (29)$$

其中, $y_{a,t}$ 为二元变量, 表示是否在 t 年安装候选设备, $T_{a,\text{com}}$ 是每个候选设备的第 1 个使用年份; $y_{a,t}=0$ 表示设备尚未安装, $y_{a,t}=1$ 表示在剩余规划年限内已安装。

(2) 输出电功率约束

$$P_{\text{GEN},i}^{\min} \leq P_{\text{GEN},i} \leq P_{\text{GEN},i}^{\max} \quad (30)$$

$$P_{\text{DG},i}^{\min} \leq P_{\text{DG},i} \leq P_{\text{DG},i}^{\max} \quad (31)$$

$$P_{\text{CCHP},i}^{\min} \leq P_{\text{CCHP},i} \leq P_{\text{CCHP},i}^{\max} \quad (32)$$

$$P_{\text{P2G},i}^{\min} \leq P_{\text{P2G},i} \leq P_{\text{P2G},i}^{\max} \quad (33)$$

其中, $P_{\text{GEN},i}$ 、 $P_{\text{DG},i}$ 、 $P_{\text{CCHP},i}$ 和 $P_{\text{P2G},i}$ 分别是第 i 个传统发电机、DG、CCHP 和 P2G 的输出电功率,

上标 min 和 max 分别表示相应输出的下限和上限。

(3) 运行约束

$$P_{\text{GEN}} + P_{\text{DG}} + \Delta P_{\text{CCHP}} - P_{\text{P2G}} - P_{\text{los}} = P_{\text{lod}} - P_{\text{lck}} \quad (34)$$

$$H_{\text{Ther}} + H_{\text{GB}} + \Delta H_{\text{CCHP}} - H_{\text{los}} = H_{\text{lod}} \quad (35)$$

$$C_{\text{CCHP}} - C_{\text{los}} = C_{\text{lod}} \quad (36)$$

$$G_{\text{NG}} + G_{\text{P2G}} - G_{\text{CCHP}} - G_{\text{GB}} = G_{\text{lod}} \quad (37)$$

$$\begin{cases} 0 \leq G_i \leq L_G \\ 0 \leq C_i \leq L_C \\ 0 \leq H_i \leq L_H \end{cases} \quad (38)$$

其中, P_{GEN} 和 P_{DG} 分别是传统发电机和 DG 的总电力输出, ΔP_{CCHP} 为所有 CCHP 机组输入与输出电功率之差, P_{P2G} 是所有 P2G 单元输入的总功率, P_{los} 是网络中的电功率损耗, P_{lod} 为总用电负荷, P_{lck} 是负荷断电功率, H_{Ther} 和 H_{GB} 分别是所有传统发电机和 GB 产生的总热量, ΔH_{CCHP} 是所有 CCHP 机组的总输入和输出加热功率之差, H_{los} 是网络中的热功率损耗, H_{lod} 为总热负荷, C_{CCHP} 是所有 CCHP 机组产生的总制冷功率, C_{los} 是网络中的冷功率损耗, C_{lod} 为总冷负荷功率, G_{NG} 和 G_{P2G} 分别为所有天然气厂和 P2G 机组的天然气输入总量, G_{CCHP} 和 G_{GB} 分别是流入 CCHP 机组和 GB 的天然气总量, G_{lod} 是天然气总负荷, G_i 、 C_i 和 H_i 分别是流经系统中的各个节点气体、热量和冷功率, L_G 、 L_C 、 L_H 分别是系统中天然气、热力和冷却管线的最大传输功率。

(4) 能源耦合约束

电、热、天然气之间的耦合约束如式 (28) ~ 式 (38)。

2.3 基于 DE-PSO 求解 IES 优化规划模型

本文提出的 IES 优化模型是一个混合整数非线性规划 (mixed integer nonlinear programming,



MINLP) 问题。粒子群优化算法 PSO 是一种广泛使用的求解 MINLP 问题的智能算法, 它不需要分析目标函数和约束条件。然而, PSO 算法存在过早收敛和陷入局部最优的缺点。本文中的 IES 优化规划是一个具有多个决策变量的高维问题, 这使得 PSO 优化过程需要大量的计算, 并且很难

获得最优解。

因此, 本文选择差分进化 (differential evolution, DE) 算法与 PSO 进行组合, 降低算子的选择, 以减少计算时间并尽可能保证精度。DE-PSO 混合算法对 IES 优化规划模型的求解流程如图 2 所示。目标函数首先通过 DE 算子优化, 提

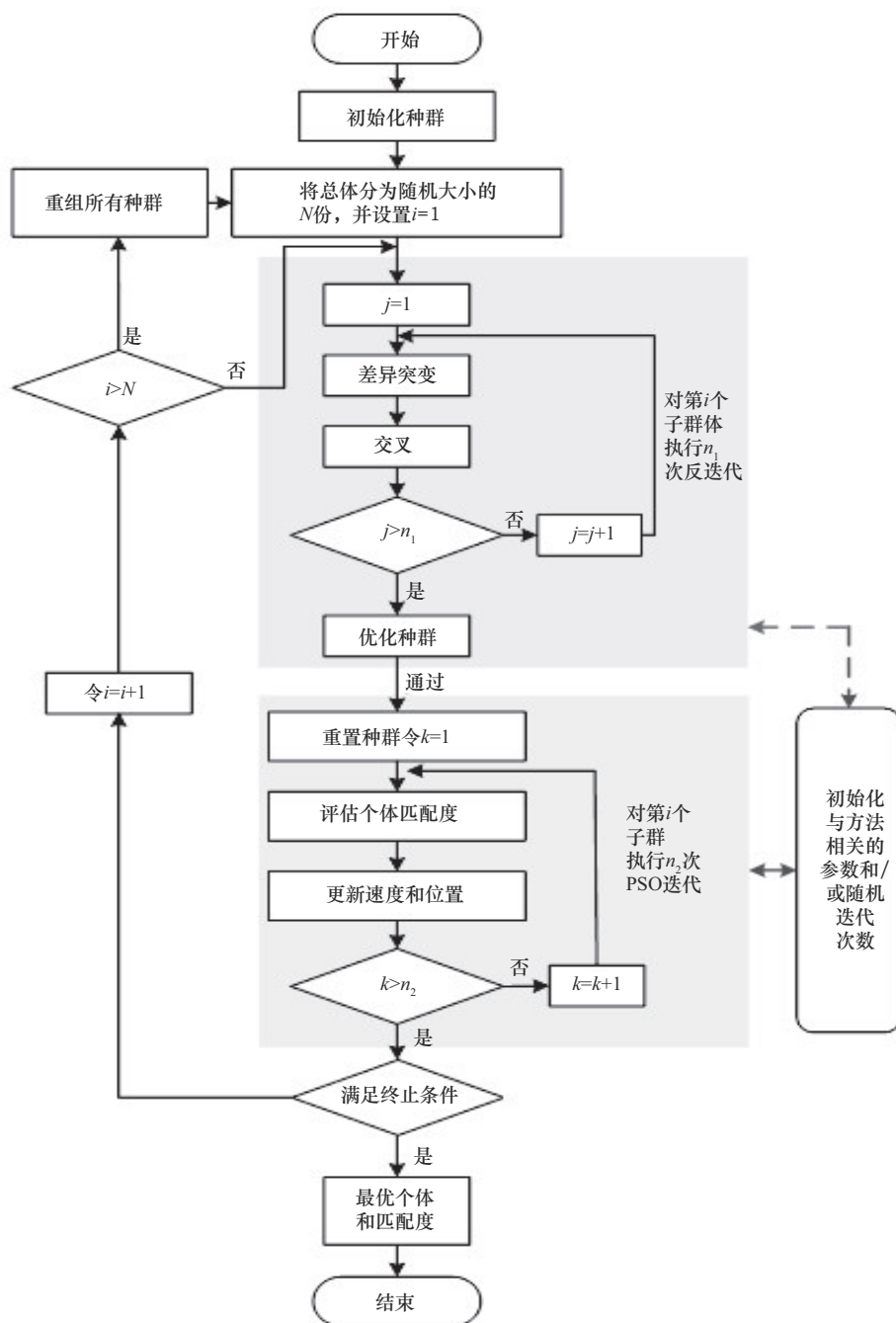


图2 DE-PSO混合算法对IES优化规划模型的求解流程

高种群多样性, 然后通过PSO算子优化, 保证全局收敛速度。具体步骤如下:

步骤1 随机选择初始种群, 并将种群分为 N 份;

步骤2 重复DE算子(差异变异、交叉、选择), 直至得到优化种群;

步骤3 将优化后的种群传递给PSO框架, 并初始化与PSO相关参数;

步骤4 重复PSO算子直至收敛或达到最大迭代次数;

步骤5 重复步骤1~步骤4, 直到满足终止条件(超过最大的迭代次数或目标函数最优解误差小于设置界限)。

3 IES优化规划算例分析

3.1 系统拓扑和案例设置

为了更好地验证所提方法的合理性, 使用了改进的IEEE 33节点系统, 具有IES网络的IEEE 33系统的拓扑如图3所示。改进后的IEEE 33节点系统是由4台传统发电机、2个天然气供应商(gas source, GS)、3个GB、1个WT和1个PV组成的IES网络。规划期间, 将3台传统发电机、

2台GB、3台CCHP机组、3台P2G站和3台DG(2个PV和1个WT)作为候选设备, 其参数基于文献[9]。IEEE 33系统中候选传统发电机、GB、CCHP、P2G和DG的参数见表1, IES参数见表2。本文将规划期限设定为7年, 通过4个案例分析比较, 案例特征见表3, 证明了所提规划方法的有效性。

表3中, 案例1为参考案例, 采用本文提出

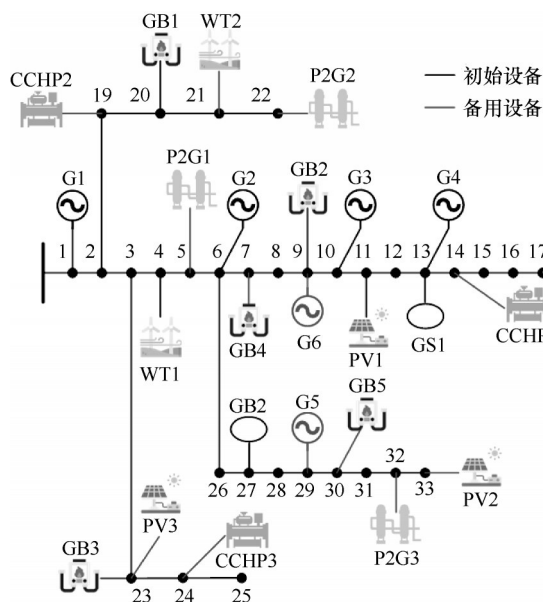


图3 具有IES网络的IEEE 33系统的拓扑

表1 IEEE 33系统中候选传统发电机、GB、CCHP、P2G和DG的参数

候选设备	节点	容量/kW	单位投资费用/(万元·MW ⁻¹)	单位运行费用/(万元·MW ⁻¹)
G5	29	420	630	0.105
G6	9	330	630	0.105
G7	17	420	630	0.105
GB4	7	320	560	0.022 4
GB5	30	320	560	0.022 4
CCHP1	14	350	420	0.059 5
CCHP2	19	350	420	0.059 5
CCHP3	24	280	420	0.059 5
P2G1	5	200	350	0.049
P2G2	22	250	350	0.049
P2G3	32	200	350	0.049
DG1(PV2)	33	300	560	0.65
DG2(PV3)	23	300	560	0.063
DG3(WT2)	21	300	420	0.056



表2 IES参数

参数	符号/单位	取值
电力负荷峰值	$P_{\text{load-max}}/\text{kW}$	1 600
电力负荷平均值	$P_{\text{load-avr}}/\text{kW}$	730
天然气负荷峰值	$G_{\text{load-max}}/\text{m}^3$	74.5
天然气负荷谷值	$G_{\text{load-min}}/\text{m}^3$	8.5
热负荷峰值	$H_{\text{load-max}}/\text{kW}$	1 006
热负荷谷值	$H_{\text{load-min}}/\text{kW}$	135
冷负荷峰值	$C_{\text{load-max}}/\text{kW}$	684
冷负平均谷值	$C_{\text{load-avr}}/\text{kW}$	248
发电机碳排放系数	$\delta_{\text{GEN}}/(\text{kg}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$	0.997
P2G碳捕获系数	$\delta_{\text{P2G}}/(\text{kg}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$	1.824
天然气热转化效率	η_{gh}	85%
电热转换效率	η_{ph}	96%
P2G转换效率	η_{pg}	65%
天然气最大传输功率	L_{G}/m^3	80
最大热传输功率	L_{C}/kW	800
发电机发电效率	η_{GEN}	30%
单位负荷电力短缺的惩罚成本	$y_{\text{lack-pun}}/(\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$	3
最低允许碳排放量	E_{min}/t	4 000
最高允许碳排放量	E_{max}/t	5 500
最低碳交易价格	$p_{\text{M}}/(\text{元}/\text{t})$	40
固定碳交易价格	$p_{\text{F}}/(\text{元}/\text{t})$	65
初始动态碳交易价格	$p_{\text{D}}/(\text{元}/\text{t})$	70
可调参数	γ	0.05
现值系数	ε_t	5%
规划年限	$T/\text{年}$	7
最大迭代次数	T_{max}	280
切入风速	$v_{\text{ci}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5
额定风速	$v_{\text{ra}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	8
切出风速	$v_{\text{co}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	17
形状参数	c	9.71
尺度参数	k	1.54
最大太阳辐射强度	R_{max}	2.7
最小太阳辐射强度	R_{min}	1.6
贝塔分布参数	a	7.5
贝塔分布参数	b	16.3

的阶梯式碳交易价格模型，并考虑分布式发电的规划；案例2没有考虑DG的规划，也没有考虑碳排放成本；案例3考虑了DG的规划，但碳交易遵循传统的固定碳价模式；案例4采用本文提

出的阶梯式碳交易价格模型，但没有考虑DG的规划。

表3 案例特征

案例	分布式发电	碳交易
1	考虑	阶梯式交易价格
2	不考虑	不考虑
3	考虑	固定交易价格
4	不考虑	阶梯式交易价格

3.2 IES优化规划结果分析

不同案例的优化规划见表4。在表4中， $X(x, y)$ 表示在第 y 年安装第 x 个候选设备 X ($X=\text{G}, \text{DB}, \text{P2G}, \text{CCHP}, \text{DG}$)。可以看出，案例1的传统发电机组数量比其他3个案例少，这是因为本文提出的阶梯式碳交易成本有效地减少了碳排放。然而，较低的碳排放也意味着案例1有更多的分布式发电来弥补电力缺口。同时，由于DG单元的增加，案例1中的GB和P2G的数量相对较少。

表4 不同案例的优化规划

设备	案例1	案例2	案例3	案例4
G	(6,1)	(5,1) (6,4) (7,6)	(7,1) (6,3)	(7,4) (5,5)
GB	(5,6)	(5,2) (4,7)	(5,2) (4,6)	(5,1) (4,5)
P2G	(2,2) (3,7)	(2,1) (3,4) (1,5)	(1,1) (2,5) (3,7)	(3,1) (2,3) (1,6)
CCHP	(2,3) (1,5)	(2,3) (3,5) (1,7)	(2,2) (3,6)	(3,4) (1,7)
DG	(1,2) (2,5) (3,7)	/	(1,4) (2,6)	(1,6)

不同案例的规划费用结果比较如图4所示。图4给出了不同条件下的最优规划方案和相关成本，包括投资、运营、碳交易、负荷断电惩罚费用和总成本。与案例2和案例3相比，案例1的总成本分别降低了13.09%和14.56%。案例1利用本

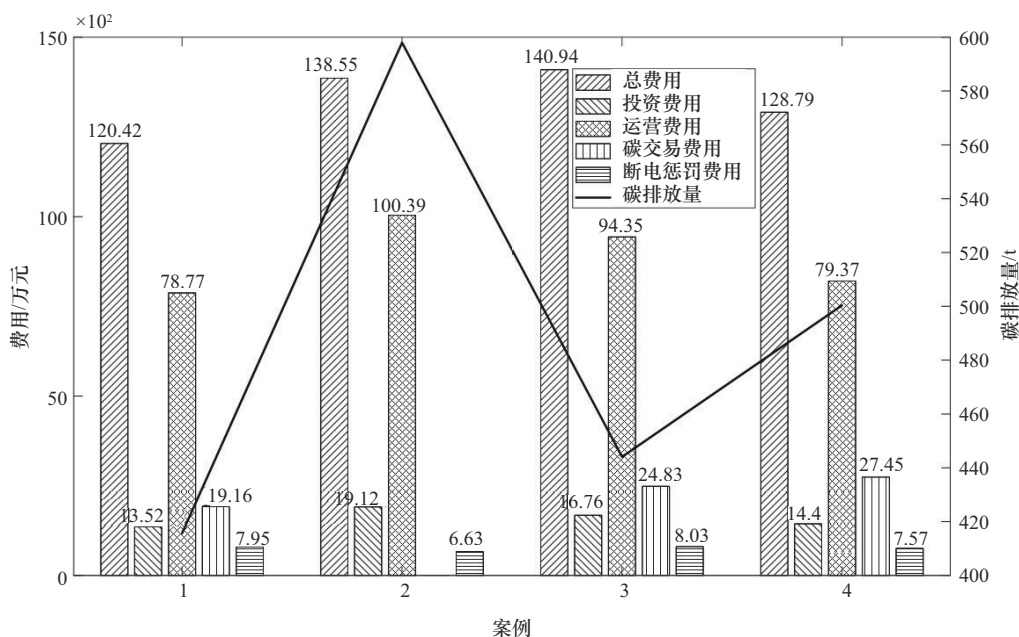


图4 不同案例的规划费用结果比较

文提出的阶梯式碳交易模型，降低了传统发电机组的容量和运营成本。案例2不考虑DG和碳排放成本，拥有最大的传统发电机容量和良好的负荷供电可靠性。然而，由于缺乏碳排放费用，案例2的运营成本和碳排放量最高。案例3采用固定碳交易价格模式，减碳能力不足，因此需要安装更多的传统发电机，运营成本也会上升。本文提出的优化规划方法比固定碳交易价格规划方法降低了6.28%的碳排放量。案例1的总投资成本比案例4低6.5%，说明DG的加入降低了碳排放和运营成本。此外，虽然案例4没有考虑DG，但阶梯式碳排放模型较案例2减少了16.32%的排放量和7.04%的总成本。

为验证所提DE-PSO算法的有效性，将其与PSO、量子粒子群（quantum particle swarm optimization, QPSO）算法和分支定界法^[19]进行对比分析，不同算法的计算结果比较如图5所示。图5显示了在案例1中4种算法经过200次迭代获得的IES优化模型的寻优结果。由于分支定界法依据不同的分支变量和子问题进行分支，因此可以用更少的迭代次数达到收敛。但在搜索空间

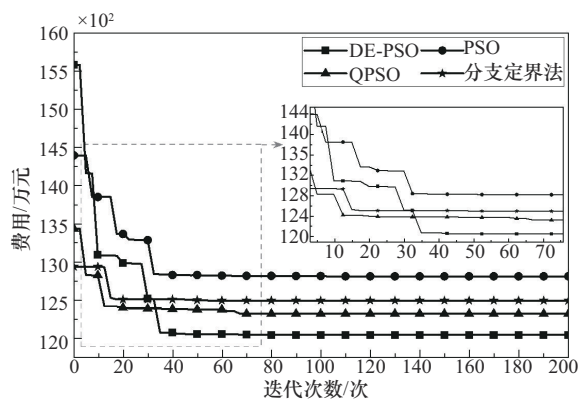


图5 不同算法的计算结果比较

较为复杂情况下，剪枝的效果不能完全体现，导致全局搜索能力不足，未能求出最优解。DE-PSO通过DE算子优化，提高种群多样性，因此全局可搜索性和搜索速度高于PSO、QPSO和分支定界法，能够获得全局最优解，得到更低的优化规划费用。

为了确保DE-PSO的有效性，每个算法分别进行了30次独立运行。不同算法运行时间对比见表5，显示了PSO、分支定界法、QPSO和DE-PSO在30次独立测试中运行时间的最大值、最小值和平均值。如表5所示，QPSO的运行时间是



最低的, 但 QPSO 和 DE-PSO 之间的差距很小, 因此 DE-PSO 的计算效率比较高。

表5 不同算法运行时间对比

优化算法	最大值/s	最小值/s	平均值/s
PSO	2 587.31	2 259.85	2 475.20
分支定界法	1 945.54	1 897.12	1 935.78
QPSO	1 675.32	1 620.14	1 648.37
所提DE-PSO	1 789.54	1 704.25	1 743.41

与传统的随机优化 (stochastic optimization, SO) [20] 和 区间优化 (interval optimization, IO) [21] 规划相比, 本文提出的基于矩阵形式仿射算法的 DG 不确定性模型可以减少 DG 出力不确定性对 IES 规划的影响, 提高 IES 规划的能力。在案例 1 下, 不同优化规划的结果比较如图 6 所示。图 6 显示了本文所提方法与 SO、IO 的规划总成本。可以看出, 本文所提方法的碳交易费用、负荷断电惩罚费用和总费用均低于两类传统规划方法 (SO 和 IO), 比 SO 和 IO 规划方法分别降低了 8.68% 和 2.93% 的总投资成本, 这表明该方法在总成本和降低碳排放方面具有更好的可靠性。

4 结束语

本文提出了基于 DG 不确定仿射模型的综合能源系统低碳优化规划方法, 以确定传统发电机组、燃气锅炉、电转气设备、冷热电联产系统和 DG 的最佳投入时间和容量。采用基于矩阵形式仿射算法来减少 DG 不确定性的影响。引入了阶梯式碳交易模型, 以减少综合能源系统长期运营中的碳排放。基于 DE-PSO 算法, 求解出所提模型的最优规划方案。与传统规划方法相比, 本文所提规划方法考虑了 DG 的不确定性和碳排放, 总投资成本比不考虑分布式发电案例减少了 6.5%, 比固定碳交易价格案例降低了 6.28% 的碳排放量。本文所提 DE-PSO 算法求解 IES 规划模型需要的算子少, 种群多样性强, 计算精度高。本文所提方法比传统随机优化和区间优化规划方法分别降低了 8.68% 和 2.93% 的总投资成本, 能够有效降低综合能源系统的长期规划成本和碳排放量。

参考文献:

- [1] 王莉, 陈东文, 李俊格, 等. 考虑蓄能热惯性的综合能源系统

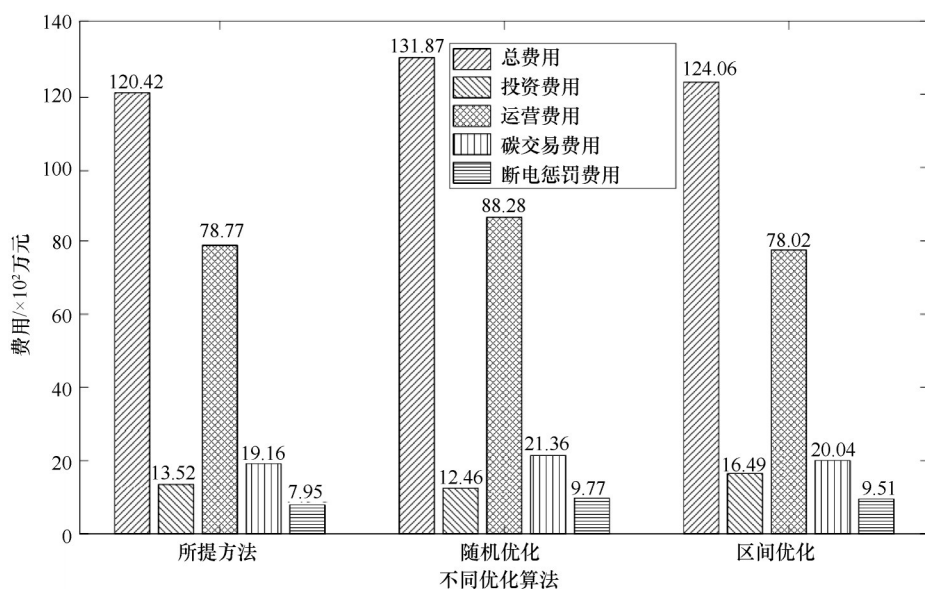


图6 不同优化规划算法的规划费用结果比较

- 阶段式故障优化供能策略[J]. 电信科学, 2019, 35(6): 33-40.
- WANG L, CHEN D W, LI J G, et al. Energy optimization strategy for integrated energy system considering energy storage thermal inertia[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(6): 33-40.
- [2] 高鹏, 肖子玉, 张晟. 信息能源融合发展策略和体系架构[J]. 电信科学, 2024, 40(2): 116-123.
- GAO P, XIAO Z Y, ZHANG S. Strategies and system architecture for the ICT-Energy convergence[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(2): 116-123.
- [3] 雍维桢, 王建学, 薛霖, 等. 面向区域能源互联网的水-能协同优化: 综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 185-199.
- YONG W Z, WANG J X, XUE L, et al. Water-energy collaborative optimization for regional energy Internet: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 185-199.
- [4] 林俐, 田欣雨, 蔡雪瑄. 考虑附加成本的燃气机组深度调峰及电力系统能源效率[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 16-23.
- LIN L, TIAN X Y, CAI X X. Gas unit deep peak regulation and power system energy efficiency in consideration of conditional cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 16-23.
- [5] 王晔, 李丰荣, 张少华. 考虑风电与能源转换和存储设备联营的电力和天然气市场均衡分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 64-74.
- WANG X, LI F Y, ZHANG S H. Equilibrium analysis of coupled electricity and gas markets considering joint operation of wind power with energy conversion and storage equipment[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 64-74.
- [6] 吉兴全, 刘健, 叶平峰, 等. 计及灵活性与可靠性的综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8): 132-144.
- JI X Q, LIU J, YE P F, et al. Optimal scheduling of integrated energy system considering flexibility and reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 132-144.
- [7] 伍惠铖, 王淳, 刘宽, 等. 电-热综合能源系统能流的区间计算算法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 91-99.
- WU H C, WANG C, LIU K, et al. An interval energy flow calculation method for integrated electro-thermal energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 91-99.
- [8] 郑超铭, 黄博南, 王子心, 等. 计及网络传输损耗的电热综合能源系统多目标优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 141-154.
- ZHENG C M, HUANG B N, WANG Z X, et al. Multi-objective Optimization Dispatch for Integrated Electro-heating Systems Including Network Transmission Losses [J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 141-154.
- [9] PAZOUKI S, HAGHIFAM M R. Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 80: 219-239.
- [10] WANG S X, HAN L, WU L. Uncertainty tracing of distributed generations via complex affine arithmetic based unbalanced three-phase power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3053-3062.
- [11] WANG B, ZHANG C, DONG Z Y. Interval optimization based coordination of demand response and battery energy storage system considering SOC management in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2922-2931.
- [12] 石琨, 刘朋矩, 杜治钢, 等. 数字孪生辅助的智能楼宇多模态通信资源管理方法[J]. 电信科学, 2023, 39(01): 60-71.
- SHI C, LIU P J, DU Z G, et al. Digital twin-assisted multi-mode communication resource management methods for smart buildings[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(01): 60-71.
- [13] 负保记, 张恩硕, 张国, 等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 11-19.
- YUN B J, ZHANG E S, ZHANG G, et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a "dual carbon" mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 11-19.
- [14] CHENG Y H, ZHANG N, ZHANG B S, et al. Low-carbon operation of multiple energy systems based on energy-carbon integrated prices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1307-1318.
- [15] 张玉敏, 孙鹏凯, 吉兴全, 等. 考虑扩展碳排放流的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3174-3191.
- ZHANG Y M, SUN P K, JI X Q, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system with augmented carbon emission flow[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3174-3191.
- [16] 李虹, 林兰心, 赵小军. 基于需求侧用户响应分析的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 97-105.
- LI H, LIN L X, ZHAO X J. Low carbon economic scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system based on demand-side user response analysis[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(5): 97-105.
- [17] 丁曦, 张笑演, 王胜寒, 等. 双碳目标下考虑最优建设时序的区域综合能源系统低碳规划[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2584-2596.
- DING X, ZHANG X Y, WANG S H, et al. Low-carbon planning of regional integrated energy system considering optimal construction timing under dual carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2584-2596.



- [18] 顾洁, 刘书琪, 胡玉, 等. 基于深度卷积生成对抗网络场景生成的间歇式分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1742-1751.

GU J, LIU S Q, HU Y, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation based on deep convolutions generative adversarial network in scenario generation[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1742-1751.

- [19] 杨若浦, 刘佳, 曾平良, 等. 考虑多元异质源荷相关性的区域综合能源系统规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 31-39.

YANG R P, LIU J, ZENG P L, et al. Planning of regional integrated energy system considering correlation of multiple heterogeneous sources and loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 31-39.

- [20] 张玉敏, 孙鹏凯, 吉兴全, 等. 基于并行多维近似动态规划的综合能源系统动态经济调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 60-68.

ZHANG Y M, SUN P K, JI X Q, et al. Dynamic economic dispatch for integrated energy system based on parallel multi-dimensional approximate dynamic programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 60-68.

- [21] 杜永峰. 计及风光不确定性的电气热综合能源系统日前区间优化[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 85-91.

DU Y F. Day-ahead interval optimization of electricity-gas-heat integrated energy system considering uncertainty of wind and PV[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 85-91.

[作者简介]



江涛 (1984-), 男, 中远海运 (天津) 有限公司经济师, 主要研究方向为可再生能源及数字技术管理。



徐聪 (1982-), 男, 中远海运 (天津) 有限公司工程师, 主要研究方向为信息技术。



贾少辉 (1993-), 男, 中远海运 (天津) 有限公司工程师, 主要研究方向为数据分析和应用。



王深 (1987-), 男, 中远海运 (天津) 有限公司高级工程师, 主要研究方向为人工智能。



张亚健 (1991-), 男, 博士, 上海大学机电工程与自动化学院副教授, 主要研究方向为电力系统优化运行、电力系统网络化控制。