

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190139

基于 MO-APSO 的含风电场电力系统动态环境经济调度

田壁源¹, 戚红艳¹, 张新燕², 何峰¹, 彭建¹, 常喜强¹

(1. 国网乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要: 为综合考虑碳排放权交易对风火联供模式的影响, 基于节能减排、发电效益、机组运行 3 个方面约束条件, 引入碳排放权交易成本函数, 构建了考虑发电成本、碳交易成本、环境成本的风火联供系统多目标动态环境经济调度(DEED)模型。提出一种多目标自适应粒子群优化(MO-APSO)算法求解该 DEED 问题。根据寻优过程中粒子当前的适应度函数值, 对惯性权重及学习因子进行自适应修正, 进一步改善早熟的缺陷, 增强全局搜索能力。含风电场的 10 机电力系统仿真结果表明: 所提方法能同时优化成本和排放这 2 个冲突的目标, 且获得了比其他算法更为宽广和均匀的 Pareto 前沿, 有效降低了联供系统的碳排放量及综合运行成本。

关键词: 风电; 动态环境经济调度; 多目标优化; 调度模型; MO-APSO; 最优折中解

Dynamic environmental economic dispatch of power system containing wind farms based on MO-APSO

TIAN Biyuan¹, QI Hongyan¹, ZHANG Xinyan², HE Feng¹, PENG Jian¹, CHANG Xiqiang¹

(1. State Grid Urumqi Power Supply Company, Urumqi 830011, China;

2. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, China)

Abstract: In order to comprehensively consider the impact of carbon emissions trading on wind-fire co-generation model, and based on the constraints of energy saving and emission reduction, power generation efficiency and unit operation, the carbon emission trading cost function is introduced. A multi-objective Dynamic Environmental Economic Dispatch (DEED) model of wind-fire combined power system considering generation cost, carbon trading cost and environmental cost is constructed. A multi-objective adaptive particle swarm optimization algorithm is proposed to solve the DEED problem. According to the current fitness function of particles in the optimization process, the inertia weight and learning factor are adaptively modified to further improve the premature defects and enhance the global search ability. The simulation results of 10-machine power systems with wind farms show that the proposed method can simultaneously optimize the two conflicting objectives of cost and emission, and obtain a wider and more uniform Pareto frontier than other algorithms, which can effectively reduce the carbon emissions and integrated operation costs of the combined generation system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51667018 and No. 51367015).

Key words: wind power; dynamic environmental economic dispatch; multi-objective optimization; dispatching model; MO-APSO; optimal compromise solution

0 引言

近年来, 随着能源需求的持续增长, 伴随着能源危机、环境污染及全球气候变暖等问题的日益凸显, 发展低碳绿色经济, 持续推进清洁能源开发与利用是推动经济社会发展、应对气候变暖及保护生态环境的有效措施^[1-2]。因此, 发展低碳电力, 建立

完善的碳排放管理机制, 是发展低碳电网的必由之路, 受到社会各界广泛关注^[3-4]。由于发电调度模式决定系统总的碳排放水平, 节能调度与碳排放权交易得到广泛应用。近年来, 碳排放约束、配额制及排放权交易等调控手段和经济机制的引入和推广, 迫使发电企业采用技术改造提高机组热效率, 通过调整发电布局等措施来减少碳排放成本^[5-7]。文献[8]研究了以能耗成本和碳排放成本最小为目标的节能调度模式, 并从 3 个方面构建了调度效果评价指标。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51667018, 51367015)

文献[9]研究了碳排放权交易在现货市场和期货市场的运行模式,以社会效益最大和能耗成本最低为双重目标建立环境经济调度模型。上述文献为研究环境经济调度提供了良好的理论基础,但均未考虑风电、光伏等清洁能源对碳排放权交易的影响。

随着清洁能源规模的大幅增长及其战略地位的逐步上升,风电装机容量的迅速增加,碳排放权交易成本给电力企业带来了较大的成本压力,高渗透率风电集中并网给系统带来了显著的波动性和随机性^[10],属于典型的高维度、强约束、非线性且非凸的多目标优化问题,使得含风电场电力系统动态环境经济调度建模较为复杂。因此,在综合节能减排、发电效益、机组运行3个约束的基础上,实现电力系统碳排放控制是当前动态环境经济调度(DEED)优化决策中亟待解决的重大课题。DEED是在以污染排放和发电成本为目标的环境经济调度(EED)基础上进一步考虑不同时间断面的爬坡约束、机组启停效应及系统网损等约束,使得其调度策略更符合电网的实际运行情况。针对DEED的非线性、强约束及高维性的特点,传统方法的DEED求解思路是将多目标转化成单目标,其优点在于求解效率高,速度快,目前也已经有了很多商业型求解器可以供给研究者使用(如混合整数线性规划(MILP)商用求解器 CPLEX、GUROB 等),但其要求目标函数可微、初值对解的影响较为灵敏,易陷入局部最优。而智能算法无此要求,只需要不断更新种群,从而在整个解空间中搜索最优解。求解DEED更多的智能算法如遗传进化算法(EA)^[11]和粒子群优化算法(PSO)^[12]等。以(EA)为核心的NSGA-II是目前最优秀的多目标算法之一,文献[13]建立了基于NSGA-II算法求解动态环境经济调度模型,可以获得分布更为广泛的Pareto最优解,利于制定最优策略。文献[14]提出将多目标粒子群优化和自适应参数的差分进化2种算法的优点混合的算法来求解动态环境经济调度问题。文献[15]研究了一种模糊自修正粒子群算法,在迭代中根据粒子自身适应度隶属函数来修正惯性权重值。以上文献中提出的算法虽然都可以对两个目标同时优化,但以EA为核心的NSGA-II算法存在全局寻优能力不足及Pareto前沿分布范围小且不均匀的缺点,多目标粒子群算法(MO-PSO)虽然操作简单鲁棒性强,但对参数的设置十分敏感,需要设置的参数较多。

针对上述问题,本文首先从机组发电运行经济性和碳排放权交易成本的双重目标出发,考虑发电成本、环境成本以及启停效应等约束条件,构建了考虑碳排放权交易的含风电场电力系统动态多目标

环境经济调度模型。然后,通过对多目标粒子群算法中惯性权重系数及学习因子沿着适应度函数收敛曲线随着自身适应度值变化进行动态调整,增强全局搜索能力,得到的帕累托最优前沿更加靠前。最后采用含风电场的10机电力系统进行仿真测试,并与其他算法进行了对比分析。

1 碳排放交易下风火联供 DEED 数学模型

1.1 发电成本

1) 火电机组发电费用

本文考虑火电机组节能调度,并以系统能耗成本与碳排放权交易成本之和的最小值为目标,如式(1)。

$$\min f_1 = C_{\text{fuel}} + C_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

发电能耗成本由发电煤耗成本与机组启停能耗成本组成,如式(2)。

$$C_{\text{fuel}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \left[P_{\text{coal}} u_{i,t} f_i(Q_{i,t}) + u_{i,t} (1 - u_{i,t-1}) S_{U_i} + u_{i,t-1} (1 - u_{i,t}) S_{D_i} \right] \quad (2)$$

式中: N 为发电机组台数; T 为调度期时段数。

2) 碳排放权交易成本

参照火电机组污染物排放参数,按一定额度对其进行初始碳排放权免费配置,其余部分将通过碳排放权交易获。计算公式为

$$\min f_2 = P_{\text{CO}_2} E_{\text{CO}_2} (1 - b) = P_{\text{CO}_2} \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N E_i(Q_{i,t}) \times (1 - b) \right] \quad (3)$$

$$E_i(Q_{i,t}) = c_{0,i} + c_{1,i} Q_{i,t} + c_{2,i} Q_{i,t}^2 \quad (4)$$

$$E_0 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \eta Q_{i,t} \quad (5)$$

式中: P_{CO_2} 为碳排放权交易价格; E_{CO_2} 为机组总碳排放量; b 为初始碳排放权免费配额率; η 为区域电网基准线排放因子。式(5)为电碳函数,其参数由机组历史数据拟合而成。碳排放权价格易受外界因素影响,波动性较大,可参照文献[12]中的方法进行估算。

1.2 环境成本

在实际运行过程中,燃煤机组运行时产生的污染气体主要为二氧化碳(CO_2)、二氧化硫(SO_2)及氮氧化物(NO_x)^[16],可通过对比单位产能时这3类污染气体的排放量,将 SO_2 和 NO_x 排放量折算成当量的 CO_2 ,并将折算后得到的 CO_2 排放量与机组有功出力进行单独建模。综合排放模型为

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i (P_{i,t})^2 + \xi_i \exp(\lambda_i P_{i,t}) \quad (6)$$

式中, a_i 、 β_i 、 γ_i 、 ξ_i 和 λ_i 为机组 i 单位时间内污染气体排放曲线函数的系数, 可根据电厂的有害气体排放检测数据采用拟合方法得到。

1.3 考虑碳排放权交易下的 DEED 模型

1.3.1 目标函数

多目标优化的目标函数设定为在整个调度周期 $T(T=24\text{ h})$ 内, 使风火联供的碳排放权交易成本、燃料成本和环境成本最小, 总的综合成本 f 为

$$f = f_1 + f_2 + f_3 \quad (7)$$

1.3.2 约束条件

1) 系统功率平衡约束

电力系统功率平衡是保证系统稳定运行的前提条件, 因此, 实际运行中各时刻的发电功率和负荷功率都将达到平衡, 如式(8)。

$$\sum_{i=1}^{N_W} P_{W,i,t} + \sum_{i=1}^{N_W} P_{H,i,t} + \sum_{i=1}^{N_W} P_{G,k,t} = P_{D,t} + P_{\text{loss},t} \quad (8)$$

式中: $P_{D,t}$ 为系统在 t 时刻实际消耗的负荷总功率; $P_{\text{loss},t}$ 为系统在 t 时刻实际损耗的功率; N_W 为系统风电场的数目。

2) 发电机组有功出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max}, \quad i=1,2,\dots,N; \quad t=1,2,\dots,T \quad (9)$$

式中, $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 为常规机组 i 的出力上、下限。

3) 系统旋转备用容量约束

风电随机波动性和间歇性对电力系统的冲击与风电穿透率是有关的。旋转备用容量主要应对风电高穿透率以及负荷的波动性而引起的机组出力波动, 系统的正、负旋转备用容量约束如式(10)。

$$\begin{cases} U_{i,t} = \min(P_{i,\max} - P_{i,t}, U_{Ri}T_{10}) \\ D_{i,t} = \min(P_{i,t} - P_{i,\max}, D_{Ri}T_{10}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $U_{i,t}$ 、 $D_{i,t}$ 为系统在时段 t 由第 i 台常规火电机提供的正、负旋转备用容量。

2 多目标优化问题

多目标问题中, 由于目标的度量往往不一致, 而且目标间是互斥的, 因此为达到同时优化的目的, 需要探索出它们之间此消彼长的关系, 进而做出科学决策。一般地, 含 D 维变量的 N_0 个目标的多目标优化问题可以描述为

$$\begin{aligned} \min F(\mathbf{X}) &= \{F_1(\mathbf{X}), F_2(\mathbf{X}), \dots, F_{N_0}(\mathbf{X})\} \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} g_i(\mathbf{X}) \leq 0, & i \in [1, N_i] \\ h_j(\mathbf{X}) = 0, & j \in [1, N_e] \\ \mathbf{X} \in R^D, & F(\mathbf{X}) \in R^{N_0} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: \mathbf{X} 表示多目标优化问题潜在解决方案的 D 维

决策向量; g_i 、 h_j 分别为等式约束与不等式约束。

多目标优化问题的最优解通常为一解集, 称为非支配解或 Pareto 最优解^[17]。关于多目标最小化问题, 当且仅当下列条件成立时, 解才称为支配解。

$$\begin{cases} \forall m \in [1, N_0], F_m(X_1) \leq F_m(X_2) \\ \exists m \in [1, N_0], F_m(X_1) < F_m(X_2) \end{cases} \quad (12)$$

式中: F_m 为第 m 个目标函数; N_0 为目标函数个数; X_1 称为非支配解、 X_2 称为支配解, 当一个可行解不被其他任何解支配时, 称之为 Pareto 最优解。所有的非支配个体构成 Pareto 最优解集 S , 解集中的最优解对应目标向量构成曲面, 对应向量集合即称之为 Pareto 最优前沿 P_F 。从图 1 中可以看出, 在两个目标中, 解决方案 A 优于解决方案 C; 然而与方案 B 相比, 方案 A 在目标 f_1 中更好, 但在目标 f_2 中较差, 这意味着解 A 和 B 是非支配的, 而解 C 是支配的。可见, 对于多目标优化问题的求解, 就是找到尽可能多的 Pareto 最优解, 并使得其对应的目标向量在 P_F 上均匀分布。

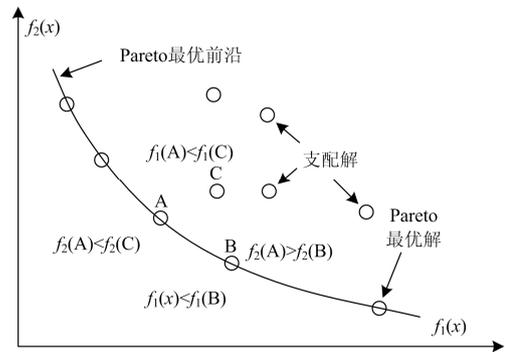


图 1 Pareto 优势关系示意图

Fig. 1 Sketch map of Pareto dominance relationship

3 MO-APSO 算法

3.1 经典粒子群优化算法

粒子群优化算法通过模拟鸟群觅食发展而来, 属于一种群体协作搜索的智能算法, 在各工程领域的应用中均取得了良好的效果^[18]。PSO 算法思想基于迭代原理, 所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值, 通过中粒子间的合作与竞争来获得优化的搜索路径。标准粒子群算法的进化公式为

$$v_{i,j}^{k+1} = \omega v_{i,j}^k + c_1 r_1 (P_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + c_2 r_2 (g_j^k - x_{i,j}^k) \quad (13)$$

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1} \quad (14)$$

式中: ω 、 c_1 、 c_2 为惯性权重和学习因子; k 为迭代次数; r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 内相互独立的随机数; $p_{i,j}^k$ 、 $g_{i,j}^k$ 分别为单个粒子 i 和全体粒子第 j 维的最优解;

$v_{i,j}^k$ 、 $x_{i,j}^k$ 分别为粒子 i 第 k 代迭代时第 j 维速度和位置。由进化公式(14)可知, 粒子的飞行速度的更新系数均为常数, 这将使得在整个寻优过程的后期进化速度明显变慢、精度较差并容易陷入局部最优解。因此, 惯性权重及学习因子的自适应调整对 PSO 算法的寻优性能有着很重要的影响。

3.2 惯性权重和学习因子的自适应调整

1) 惯性权重的自适应调整

权重的大小代表了进行全局和局部寻优能力的大小, 经典 PSO 算法中通常采用线性递减修正方式来更新惯性权重 ω ^[19], 使得同一代粒子使用相同的 ω 值, 并未考虑同一代粒子间的差异性, 而且对迭代次数依赖较高。因此, 针对算法在寻优过程后期进化精度较差并容易陷入局部最优解的特点, 需要根据粒子进化状态对惯性权重 ω 进行自适应调整。

在自适应粒子群算法中, 每个粒子 x_i 第 k 代对应的目标函数值为 f_i^k , 其值越小, 适应度也就越大, 表示粒子越优秀。第 k 次寻优完成的历史适应度均值 $\bar{f}^{k,0}$ 可以表示为

$$\bar{f}^{k,0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i^k \quad (15)$$

适应度优于 $\bar{f}^{k,0}$ 的粒子数为 N_1^k , 均值为 $\bar{f}^{k,1}$; 非优于的粒子为 N_2^k , 均值为 $\bar{f}^{k,2}$ 。

$$\begin{cases} \bar{f}^{k,1} = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} f_i^k, & (f_i^k < \bar{f}^{k,0}) \\ \bar{f}^{k,2} = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} f_i^k, & (f_i^k \geq \bar{f}^{k,0}) \end{cases} \quad (16)$$

本文采用权重系数在 [0.3, 0.9] 内随着适应度值动态变化的方式进行自适应调整, 其公式为

$$\omega_i^{k+1} = \begin{cases} 0.3, & (f_i^k \geq \bar{f}^{k,1}) \\ \exp\left(-\frac{f_i^k - f_{\min,i}^k}{f_{\min,i}^k}\right), & (\bar{f}^{k,1} < f_i^k < \bar{f}^{k,2}) \\ 0.9, & (f_i^k \leq \bar{f}^{k,2}) \end{cases} \quad (17)$$

式中: f_i^k 、 $f_{\min,i}^k$ 分别表示粒子 i 在第 k 次寻优完成时所对应的适应度值与当前历史最优适应度值; ω_i^{k+1} 表示粒子在第 $k+1$ 次寻优时对应的惯性权重。

惯性权重系数 ω 的自适应有以下优点: 在同一代粒子中, 根据粒子的自身特点, 适应度相对较低的, 有较大的 ω 与之对应, 使得该粒子能够有较快

的飞行速度, 加快全局搜索; 反之, 由于已经接近或达到最优解附近, 可以采用较小的 ω , 增强局部寻优能力; 当接近迭代后期时, 局部搜索能力转而增强, 促进算法在全局搜索与局部搜索之间的协调性, 使得整个种群的寻优能力大大提高。

2) 学习因子的自适应调整

学习因子决定了粒子对自身经验和群体经验的学习属性, 体现了粒子间的信息交互和算法的智能性^[12]。认知系数 c_1 体现了粒子对自身的学习能力, 社会系数 c_2 体现粒子对群体的学习能力 c_1 、 c_2 的动态调整有利于算法初期粒子的自我探索能力及算法后期群体认知能力。根据 Eberhart 的结论, 只要 c_1 、 c_2 在收敛域内沿着某一曲线运行, 且 c_1 随着进化时间递减, c_2 随着进化时间递增, 即可保证算法收敛。这是因为进化初期 G_{best} 离收敛值有一段距离, 较大的 c_1 可以使所有粒子进行快速的个体寻优, 同时较小的 c_2 又能够保持粒子的多样性。而进化后期 G_{best} 已经接近收敛值, 为了增加求解精度, 需要各粒子在最优解附近寻优, 此时需要较小的 c_1 及较大的 c_2 。本文采用学习因子 c_1 、 c_2 在 [0.5, 3.5] 内随着适应度值动态变化的方式进行自适应调整, 其公式为

$$\begin{cases} c_1 = 1/(0.2 + 0.1e^{2t}) \\ c_2 = \sqrt{R^2 - c_1^2}, & (c_1 + c_2 \leq 4) \\ c_i = 4c_i / \sum_{i=1}^2 c_i, & (c_1 + c_2 > 4) \\ R = 2\sqrt{2} \cos^{-1}(4/\pi - \gamma_{\min}) \end{cases} \quad (18)$$

式中: γ_{\min} 为收敛曲线初始角; c_1 、 $c_2 \in [0.5, 3.5]$, 当 $c_1 + c_2 \leq 4$ 时, 收敛曲线 L 是以直角坐标系原点为圆心, 半径为 R 的一段弧, 当 $c_1 + c_2 > 4$ 时, 需要对其值进行标准化调整。

3.3 多目标自适应粒子群优化策略

多目标 PSO 算法寻优是一个逐步迭代逼近真实帕累托前沿的过程, 如何构建非支配解及选取最优粒子, 并随机进行个体最优粒子的更新, 是保证全局最优粒子选取的客观性和有效性的主要途径。

为帮助算法获得更好的帕累托前沿, 采用基于拥挤度的排序策略进行外部归档集的维护和更新操作, 在每个计算周期使用一个精英存档集来存放在算法迭代过程中所找出的 Pareto 最优解并消除劣解, 同时存放一组精英解决方案, 当学习不同的最优解时, 个体会被不同的精英个体吸引, 保证了解的分布性和多样性。精英存档中粒子的拥挤度计算步骤如下:

- 1) 初始化当前外部归档集, 设置当前目标函数;
- 2) 设置第 1 个和最后 1 个粒子的拥挤度为无穷大, 从第 2 个粒子开始按照下式计算拥挤度距离:

$$Dis[i] = Dis[i] + \frac{f_{i+1}^m - f_{i-1}^m}{\max(f^m) - \min(f^m)} \quad (19)$$

- 3) 判断当前计算粒子是否大于 $L-1$, 若是, 则进行下一步, 否则返回到 2);
- 4) 令 $j = j + 1$, 判断当前目标函数是否大于 M , 若是, 则停止, 否则返回到 2);
- 5) 令 $i = i + 1$, 判断当前目标函数是否大于 L , 若是, 则停止, 否则返回到 2)。

3.4 多目标自适应粒子群优化算法流程

多目标自适应粒子群优化算法(MO-APSO)流程图如图 2 所示。

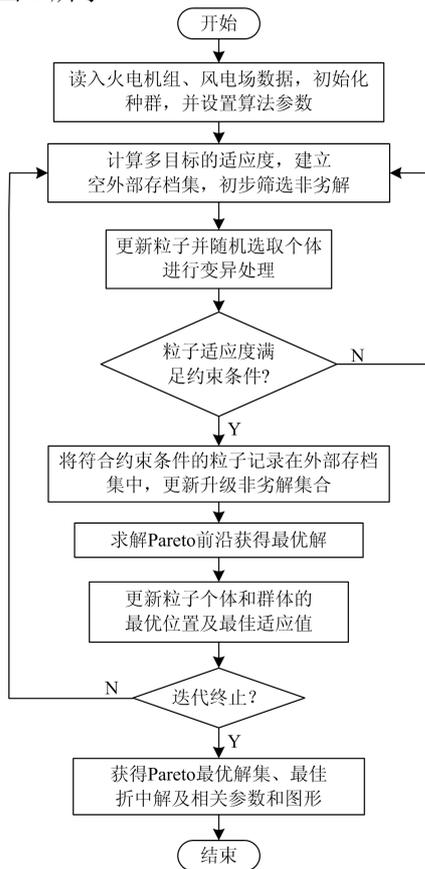


图 2 MO-APSO 流程

Fig. 2 Flowchart of MO-APSO

4 算例分析

4.1 系统描述及算法参数设置

为验证本文提出调度模型的合理性及提出 MO-APSO 算法的有效性, 在含有 2 个并网风电场的 10 机组电力系统^[20]进行实例研究。算例中常规机组煤耗参数、污染排放参数、出力限制、爬坡速

率及各时段负荷预测数据等见文献[21], 风电出力日预测曲线取自文献[22], 常规机组碳排放权免费配置额度如表 1 所示。每个并网风电场均含 100 台风机, 每台风机额定出力 2.5 MW。MO-APSO 算法参数设置如下: 种群规模为 $N=30$, 最大迭代次数 k_{max} 为 300, 纵向交叉率 $P_v=0.8$, 外部存档容量 $N_c=50$, 迭代终止判据为最优个体连续 30 代保持不变或达到最大迭代次数 300 次。调度期长为 24 h, 以 1 h 为单位分为 24 个时段, 每个时段风电场总输出功率的预测值以及负荷需求的预测值见图 3。

表 1 常规机组碳排放权配置额度

机组	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇	G ₈
额度	0.90	0.90	0.85	0.80	0.80	0.75	0.85	0.75

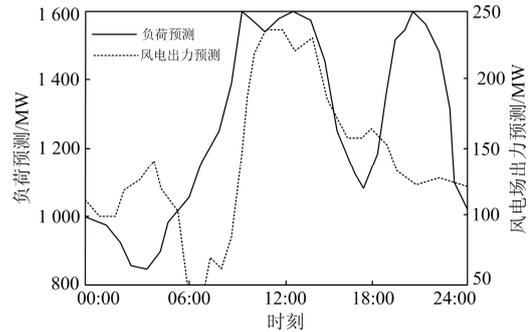


图 3 负荷及风电出力预测曲线

Fig. 3 Load and wind power output prediction curve

4.2 结果分析

基于以上数据, 当碳交易价格取 20 \$/t 时, 应用本文所提的 MO-APSO 算法求解 DEED 模型得到的 Pareto 最优前沿(含 40 个非劣解)如图 4 所示。

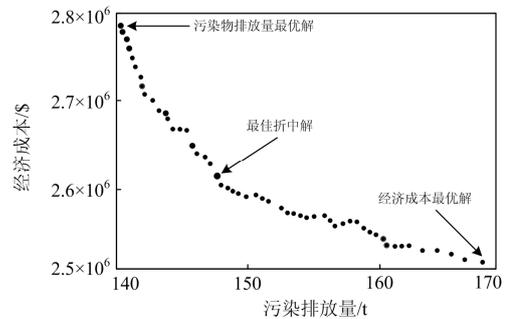


图 4 MO-APSO 得到的 Pareto 前沿

Fig. 4 Pareto frontier obtained by MO-APSO

由图 4 可以看出, Pareto 最优前沿给出了碳排放量与含碳排放权交易的经济成本间负相关的制约关系, 当经济成本减小时, 由于碳排放权支出减少, 将造成污染物排放量增大, 反之亦然。

为了充分证明 MO-APSO 算法的效果, 分别应

用 NSGA-II、MODE、MO-PSO 对测试进行求解，各种算法所得 Pareto 前沿如图 5 所示，可以看出提出的算法所得到的帕累托最优前沿相比于其他算法更加靠前，解集更具有多样性且分布更均匀。本文将不同算法的计算时间进行了横向比较，并统计 20 次运行时间的平均值列于表 2。

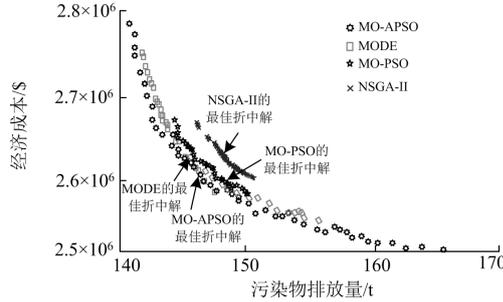


图 5 MO-APSO 得到的 Pareto 前沿

Fig. 5 Pareto frontier obtained by MO-APSO

表 2 不同算法所需时间

Table 2 Time required for different algorithms

算法	本文算法	NSGA-II	MODE	MO-PSO
时间/s	82.58	99.82	106.35	136.22

对本文所建的考虑碳排放权交易的动态环境经

济调度模型进行优化求解，优化结果如表 3 所示。可以看出：受环境成本的影响，碳排放量及污染物排放量较小或碳排放权配置额度较高的常规火电机组具有优先调度权；尽管风电场出力有风险成本，由于碳排放权交易成本的存在，风电场风电出力基本上实现了全消纳，最大程度上保证了系统的低碳性和经济性。因此本文的调度方案在保证机组安全稳定运行的前提下，满足了动态环境经济调度的目的，更大程度地调用风电机组的出力，在实现了降低碳排放的目的。

为了说明本文所建模型特性，将传统的经济调度模型 1 和本文所建的环境经济调度模型 2 进行比较，其结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出，在模式 1 中，仅以系统经济成本最小为调度目标，火电机组相对于风电机组优先发电，使得系统总经济成本最小。在调度过程中考碳排放权交易机制后，由于风电机组的发电成本比火电机组的发电成本较高，导致模式 2 虽然较之模式 1 经济成本增加了 4.41%，但是其污染物排放量降低了 10.37%。模式 2 在保证系统调度经济性的同时，也使得系统的污染物排放量有一定的减少，为社会带了巨大的环境效益。

表 3 机组优化出力

Table 3 Unit optimized output

时段	机组出力/MW								风电场 1	风电场 2
	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇	G ₈		
1	209.895	70.348	55.046	55.541	96.348	79.809	213.359	52.172	66.371	42.150
2	215.357	71.583	56.016	55.862	66.296	74.615	168.415	41.041	53.260	45.274
3	228.041	71.104	55.573	54.572	108.843	92.903	228.539	60.906	71.896	60.283
4	263.985	76.047	57.188	60.628	127.533	91.106	266.501	75.823	85.585	69.275
5	284.355	80.162	61.068	66.371	135.251	97.381	291.837	90.842	46.256	35.472
6	342.019	92.561	74.752	59.322	146.866	112.792	299.314	88.135	27.036	23.176
7	355.847	93.074	74.871	76.187	158.457	115.105	342.869	93.374	25.665	24.788
8	411.302	98.558	80.266	88.075	168.407	122.607	360.117	108.168	40.365	32.127
9	365.883	114.084	95.347	94.803	196.785	144.091	404.844	94.931	55.923	52.381
10	388.205	101.234	89.138	111.407	203.192	124.825	357.618	101.238	87.415	57.091
11	392.157	106.818	88.252	99.736	183.547	134.038	355.348	103.338	100.324	81.207
12	401.291	109.173	90.847	103.649	187.955	131.177	345.125	96.065	120.451	108.529
13	372.856	101.376	82.954	105.998	173.674	126.306	265.204	118.353	122.586	99.591
14	369.907	131.237	104.548	97.823	168.066	170.109	236.802	85.657	112.036	92.473
15	334.074	89.862	71.807	88.024	152.631	112.302	266.476	69.351	107.306	77.719
16	267.461	73.674	56.102	85.454	123.383	88.352	308.922	58.903	105.605	86.741
17	237.826	70.127	55.093	69.115	142.724	85.527	359.302	70.125	104.577	82.461
18	271.709	73.721	56.398	58.547	192.577	89.263	338.591	79.356	94.502	82.629
19	307.802	84.528	66.109	69.095	179.265	103.477	288.855	105.387	88.171	79.903
20	401.755	111.073	93.177	99.324	180.332	130.825	250.334	99.014	79.103	66.876
21	376.254	104.472	86.005	101.147	133.906	96.574	258.263	85.326	75.348	62.173
22	299.968	80.295	61.975	74.625	127.377	93.801	228.414	55.203	69.123	58.786
23	264.351	73.199	56.296	58.188	125.151	79.256	263.415	49.834	65.842	57.043
24	246.957	70.286	55.107	49.176	106.442	70.114	203.439	43.218	64.217	55.742

表 4 不同调度模式下的 DEED 结果

Table 4 DEED results under different scheduling modes

模式	系统总经济成本/\$	污染物排放量/t
1	2 493 762.26	148.62
2	2 603 725.35	133.21

5 结论

本文构建了考虑发电成本、碳交易成本、环境成本的风火联供系统多目标动态环境经济调度 (DEED) 模型, 而且将系统总经济成本和碳排放量作为相互冲突的目标同时优化, 兼顾了 DED 和 EED 的优点。针对所建模型非线性、不可微和多峰值的特点, 提出一种改进多目标自适应粒子群算法求解该 DEED 问题, 通过对该算法中惯性权重系数及学习因子沿着收敛曲线随着时间进行动态调整, 增强全局搜索能力。仿真算例表明, 提出的多目标自适应粒子群算法可以同时优化经济成本和碳排放量排放量 2 个目标, 并从解的多样性、分散性及准确性方面相比 MO-PSO、MODE、NSGA-II 算法得到分布更为广泛、均匀的 Pareto 最优前沿, 该算法具有一定的优越性。

参考文献

- [1] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Analysis of key factors of new energy consumption and Solutions[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [2] 赵晋泉, 胡佳, 王珂, 等. 一种日前发电调度与日前分时电价联合优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 56-63.
ZHAO Jinquan, HU Jia, WANG Ke, et al. A joint optimal model of day-ahead generation dispatch and day-ahead time-sharing price[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 56-63.
- [3] 黄煜, 徐青山, 蒋贤强, 等. 含新能源接入的区域电网低碳电力调度方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 25-32.
HUANG Yi, XU Qingshan, JIANG Xianqiang, et al. Low carbon power dispatching method for regional power grid with new energy access[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 25-32.
- [4] 王志军, 刘明波. 采用分布式单纯形法的微电网分散式动态经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 1-8.
WANG Zhijun, LIU Mingbo. Decentralized dynamic economic dispatch of microgrid using distributed simplex method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 1-8.
- [5] 郑宇, 赵俊华, 孟科, 等. 计及碳交易机制的电力系统随机优化调度[J]. 电力建设, 2017, 38(6): 21-27.
ZHENG Yu, ZHAO Junhua, MENG Ke, et al. Stochastic optimal dispatch of power system considering carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(6): 21-27.
- [6] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-19.
WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatching strategy of active distribution network based on source-network-load multilayer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-19.
- [7] 徐基光. 基于绿色证书交易的含风电系统低碳经济调度[J]. 中国电力, 2016, 49(7): 145-150.
XU Jiguang. Low carbon economic dispatch of wind power system based on green certificate transaction[J]. Electric Power, 2016, 49(7): 145-150.
- [8] 檀勤良, 丁毅宏. 考虑碳交易的火电节能调度优化模型及应对模式[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 180-186.
SHAN Qinliang, DING Yihong. Energy-saving dispatching optimization model of thermal power plants considering carbon trading and its response model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 180-186.
- [9] 江岳文, 张艺渊. 风火调峰权交易促进风电再次接纳研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 20-27.
JIANG Yuewen, ZHANG Yiyuan. Energy-saving dispatching optimization model of thermal power plants considering carbon trading and its response model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 20-27.
- [10] JIANG Xingwen. Dynamic environmental economic dispatch using multiobjective differential evolution algorithm with expanded double selection and adaptive random restart[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 49(1): 399-407.
- [11] LOKESHGUPTA B, SIVASUBRAMANI S. Multi-objective dynamic economic and emission dispatch with demand side management[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 97: 334-343.
- [12] 宋雨妍, 王渝红, 刘天宇, 等. 基于多目标离散粒子群算法的电容隔直装置优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 1-10.
SONG Yuyan, WANG Yuhong, LIU Tianyu, et al. Modeling and algorithm for dynamic economic dispatch

- of power systems with wind farms[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 1-10.
- [13] 朱志键, 王杰. 基于改进 NSGA-II 的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 176-183. ZHU Zhijian, WANG Jie. Economic dispatch of power system dynamic environment based on improved NSGA-II[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 176-183.
- [14] 刘刚, 朱永利, 蒋伟. 基于混合 DE-PSO 多目标算法的动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 65-72. LIU Gang, ZHU Yongli, JIANG Wei. Dynamic environmental economic dispatch based on hybrid DE-PSO multi-objective algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 65-72.
- [15] 陈功贵, 陈金富. 含风电场电力系统环境经济动态调度建模与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 27-35. CHEN Gonggui, CHEN Jinfu. Modeling and algorithm for dynamic economic dispatch of power systems with wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 27-35.
- [16] ALHAM M H, ELSHAHED M, IBRAHIM D K, et al. A dynamic economic emission dispatch considering wind power uncertainty incorporating energy storage system and demand side management[J]. Renewable Energy, 2016, 96: 800-811.
- [17] 王见. 基于模糊机会约束的含风电场的经济调度[D]. 吉林: 东北电力大学, 2018. WANG Jian. Economic dispatch of wind farms based on fuzzy chance constraints[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2018.
- [18] 程耀华, 张宁, 康重庆, 等. 考虑需求侧管理的低碳电网规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 61-69. CHENG Yaohua, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Low carbon grid planning considering demand side management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 61-69.
- [19] HEREDIA F J, CIFUENTES-RUBIANO J, CORCHERO C. Stochastic optimal generation bid to electricity markets with emissions risk constraints[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 207: 432-443.
- [20] 夏立荣, 李润学, 刘启玉, 等. 基于动态层次分析的自适应多目标粒子群优化算法及其应用[J]. 控制与决策, 2015, 30(2): 215-221. XIA Lirong, LI Runxue, LIU Qiyu, et al. Adaptive multi-objective particle swarm optimization algorithm based on dynamic analytic hierarchy process and its application[J]. Control and Decision, 2015, 30(2): 215-221.
- [21] 周任军, 李绍金, 陈瑞先, 等. 采用模糊自修正粒子群算法的碳排放权交易冷热电多目标调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 6119-6126. ZHOU Renjun, LI Shaojin, CHEN Ruixian, et al. Multi-objective scheduling for carbon emissions trading based on fuzzy self-modifying particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 6119-6126.
- [22] MA H, YANG Z, YOU P, et al. Multi-objective biogeography-based optimization for dynamic economic emission load dispatch considering plug-in electric vehicles charging[J]. Energy, 2017, 135: 101-111.

收稿日期: 2019-01-29; 修回日期: 2019-06-26

作者简介:

田壁源(1989—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为经济调度、新能源消纳、节能及电力需求侧管理。

E-mail: 2528586070@qq.com

(编辑 葛艳娜)