

碳交易机制下计及需求响应的动态环境经济优化调度

郑婷婷

上海工程技术大学管理学院, 上海

收稿日期: 2022年7月15日; 录用日期: 2022年8月9日; 发布日期: 2022年8月17日

摘要

在低碳背景下, 动态环境经济调度作为实现“双碳”目标的有效途径, 需要在满足电力供应的基本需求的基础上, 保证经济效益、环境利益与低碳化。本文提出了一种阶梯型碳交易机制下计及价格型需求响应的动态环境经济优化调度模型, 并采用改进的算术优化算法对优化模型进行求解。经验证, 改进的算术优化算法相较于其他经典算法具有显著寻优性能, 重新构建的优化调度可以促进智能电网的优化运行, 有效降低运行成本、碳交易成本及环境污染。

关键词

动态环境经济优化调度, 阶梯型碳交易机制, 价格型需求响应, 改进算术优化算法

Dynamic Environmental Economic Optimization Dispatch Considering Demand Response under Carbon Trading Mechanism

Tingting Zheng

School of Management, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Jul. 15th, 2022; accepted: Aug. 9th, 2022; published: Aug. 17th, 2022

Abstract

In the context of low carbon, as an effective way to achieve the goal of “carbon peaking and carbon neutrality”, dynamic environmental economic dispatch needs to ensure economic benefits, environmental benefits and low carbon on the basis of meeting the basic needs of power supply. This

paper proposes a dynamic environmental economic optimal scheduling model considering price-based demand response under the stepped carbon trading mechanism, and uses the improved arithmetic optimization algorithm to solve the optimization model. It is proved that the improved algorithm has remarkable optimization performance compared with other classical algorithms. The optimal scheduling in this paper can promote the optimal operation of smart grid, effectively reduce the operation cost, carbon transaction cost and environmental pollution.

Keywords

Dynamic Environmental Economic Optimization Dispatch, Ladder-Type Carbon Trading Mechanism, Price-Based Demand Response, Improved Arithmetic Optimization Algorithms

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“双碳”目标下，随着经济增长、环境恶化两者之间的矛盾日益凸显，如何建设更加经济、环保和低碳的电力系统已成为全球电力行业的共同课题[1] [2] [3] [4] [5]。在电力系统优化运行中，环境经济调度(Economic Emission Dispatch, EED)因其综合了经济效益与环境影响得到了众多研究者的青睐[6] [7] [8] [9] [10]。EED是一个复杂的含有约束的多目标优化问题，运行成本 and 环境保护成本同时最小化为其目标，目标间相互冲突，且受到各种运行条件的约束[11]，但传统 EED 为确定性的静态调度，调度过程没有考虑机组的负荷变化等实际情况以及环境指标的变化，不能很好地反映实际调度要求。因此，环境经济调度的研究热点逐渐转向考虑随机性影响因素的动态环境经济调度(Dynamic Economic Emission Dispatch, DEED)，DEED 兼顾了总调度周期内总成本中相互竞争的目标，在满足各种等式和不等式约束的前提下，分时段优化机组分配，达到经济效益和环境利益两者的平衡，具有重要的现实意义。国内外对此热点课题进行研究[12]-[18]，并提出了许多解决方案，主要包括智能优化算法。

目前，在许多文献[19] [20] [21] [22]中，碳交易机制被引入到动态环境经济调度模型，以达到节能减排的目的，但未对系统排放量具体划分区间，限制了其在电力系统优化运行的实际应用。与此同时，碳交易机制的引入增加了调度成本，若仅考虑供给侧的环境效益(碳排放量)，需求侧的需求响应(demand response, DR)在 DEED 中的作用会被忽略。传统的需求响应中负荷往往被认为是刚性的，调度者默认用户不愿意或者没有能力改变他们的用电行为，偏重于发电侧的行为将其视作发电机对负荷的响应[23]。然而，实际生活中用户侧的用电行为同样会影响环境经济调度对电力系统的优化运行，如何协同组合碳交易机制与需求响应策略以协调环境经济调度的经济性与低碳性仍是研究热点。

因需要综合考虑多种不确定性因素，DEED 成为一个典型的高维数、强耦合、非线性和非凸的多目标优化问题，传统的数学优化算法在求解过程中将会出现非可行解，并且运算时间过长，也难以得到满意解。智能算法较传统算法具有较强的优势，文献[24]引入记忆反馈机制和化速率概念改进人工蜂群算法，提高解决方案的质量的同时平衡算法开发能力和搜索能力；文献[25]采用一种新的双局部最优策略引导粒子群算法的粒子进行搜索，在问题求解速度、解的多样性和精度等方面均取得了较好的结果。不过随着市场环境以及自然环境的不确定性因素与日俱增，面对更为复杂的 DEED 问题，智能优化算法也存在运行时耗较大、难以收敛、参数的设置等问题[26] [27] [28] [29] [30]。

算术优化算法[31] (The Arithmetic Optimization Algorithm, AOA)是从算术运算符在解决算术问题中的使用受到启发而提出的一种新兴的群智能算法,已成功应用于多目标优化[32]、特征选择[33]、改进人工神经网络[34]中。尽管 AOA 在许多优化问题中具有一定优势,但其仍然存在求解精度不高等不足。

基于上述考虑,DEED 在环境保护、低碳和经济的角度以微电网运行成本、环境保护成本及碳交易成本总和最小化为目标,建立一种阶梯型碳交易机制下考虑价格需求响应的动态环境经济优化调度模型,引入改进 AOA 算法进行求解,利用优化模型仿真实验和结果对比分析可以验证模型和算法的有效性和优越性。

2. 动态环境经济调度设备

本文中动态环境经济调度设备由具有不同运行特性的微电源组成,主要为:光伏(photovoltaic, PV)发电数学模型、风力发电机(wind turbine, WT)模型、柴油发电机(Diesel-Electric Engines, DE)模型、蓄电池模型及微型燃气轮机(micro-turbines, MT)模型。相应模型如图 1 所示[35] [36] [37] [38] [39]。

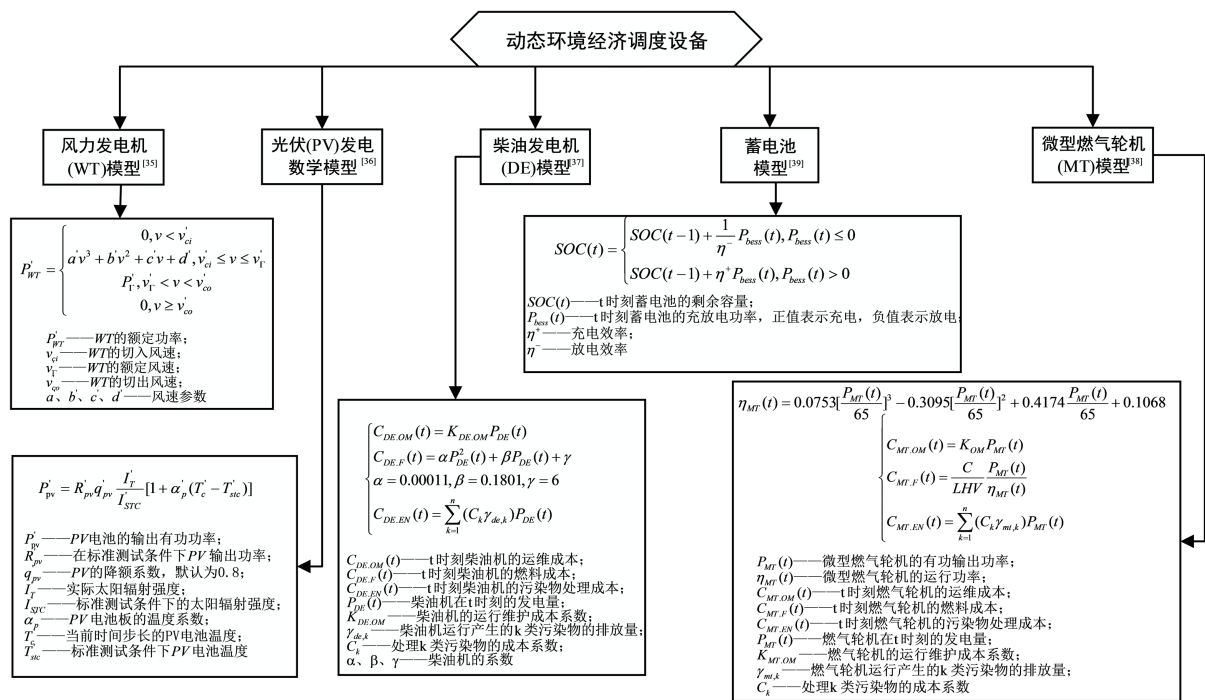


Figure 1. Dynamic environmental economic dispatch model

图 1. 动态环境经济调度模型

3. 价格型 DR 建模

本文采用价格型 DR 建模法,在确保加强环境经济调度经济性的同时提高调度的运行可靠性。DR 建模法中,DR 特性由电量电价弹性指标 $E(t, j)$ 描述,其中第 t 行第 j 列元素 $e_{i,j}$,即 t 时刻负荷对 j 时刻电价的弹性系数为:

$$e_{i,j} = \frac{\Delta P_{L,T}^e / P_{L,t}^{e0}}{\Delta \rho_j / \rho_j^0} \quad (3-1)$$

式中: $\Delta P_{L,T}^e$ ——DR 用电需求变化量; $P_{L,t}^{e0}$ —— t 时刻原用电量(需求量); $\Delta \rho_j$ ——DR 电价变化量; ρ_j^0 —— j 时刻初始电价。

在此基础上，DR 建模法可进一步分为可削减负荷(curtailable load, CL)建模和可转移负荷(shiftable load, SL)建模。

3.1. CL 建模

CL 通过对比 DR 前后本时段电价变化，从而选择是否削减自身负荷。CL 建模中， t 时刻的可削减负荷变化量 $\Delta P_{CL,t}^e$ 为：

$$\Delta P_{CL,t}^e = P_{CL,t}^{e0} \left[\sum_{j=1}^{24} E_{CL}(t, j) \frac{\rho_j - \rho_j^0}{\rho_j^0} \right] \quad (3-2)$$

式中： ρ_j —— j 时刻电价； $P_{CL,t}^{e0}$ —— t 时刻初始可削减负荷量； $E_{CL}(t, j)$ ——CL 价格需求弹性矩阵，为对角阵。

3.2. SL 建模

SL 使用峰平谷分时电价作为信号，将高峰时段负荷转移到平谷时段。SL 建模中， t 时刻的可转移负荷变化量 $\Delta P_{SL,t}^e$ 为：

$$\Delta P_{SL,t}^e = P_{SL,t}^{e0} \left[\sum_{j=1}^{24} E_{SL}(t, j) \frac{\rho_j - \rho_j^0}{\rho_j^0} \right] \quad (3-3)$$

式中： $E_{SL}(t, j)$ ——SL 价格需求弹性矩阵； $P_{SL,t}^{e0}$ —— t 时刻初始可转移负荷量。

4. 碳交易机制

许多国家目前正在试验碳交易市场，在这些国家，健康的碳交易市场可以在一定程度上有助于减少所有行业的二氧化碳排放。我国在实施碳减排政策初期，大部分碳配额都是免费分配的。

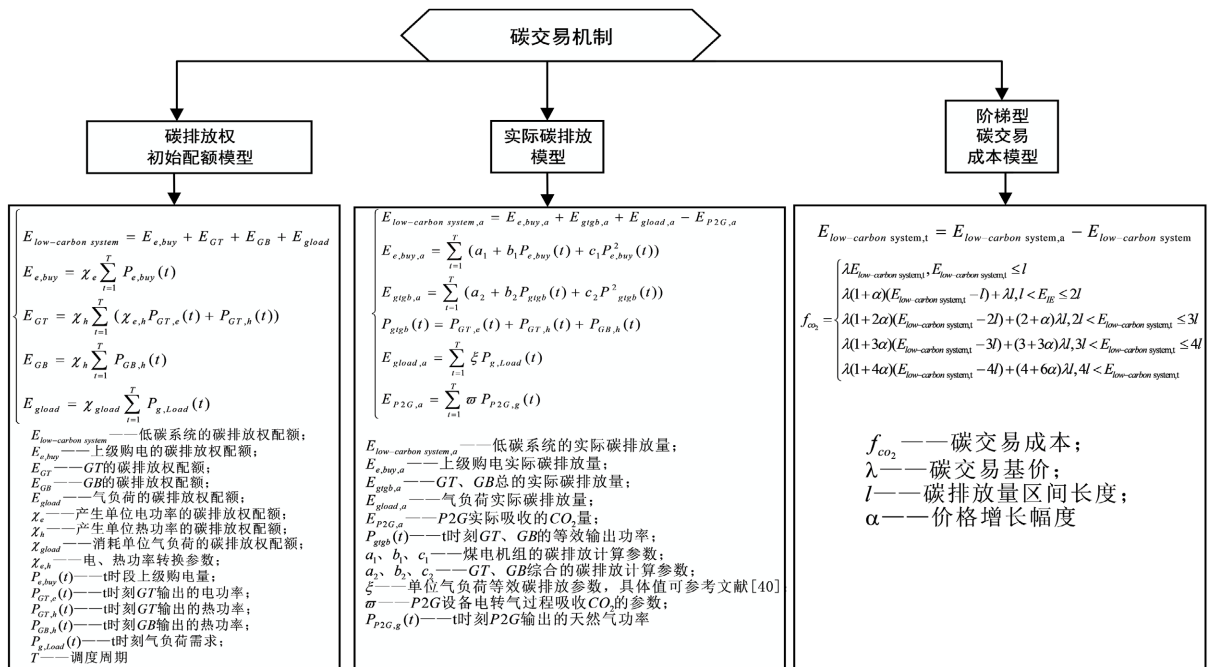


Figure 2. Carbon trading mechanism
图 2. 碳交易机制

为了优化体系自身的经济效益和低碳化，通过调整各种燃料主要有燃气轮机(gas turbine, GT)、上级煤电机组、燃气锅炉(gas boiler, GB)、气负荷、电转气设备(power to gas, P2G)，以期适应体系内的多元负荷要求。同时，在传统碳交易成本模式的基础上，将逐步降低碳排放量，并建立阶梯式的碳交易成本模式。

5. DEED 优化模型

DEED 优化模型以运行成本、环境保护成本、碳交易成本为目标，在常规约束条件的基础上考虑动态因子即爬坡速率约束及需求侧用电方式满意度约束，充分匹配机组运行的真实形态，以获得更加精确的最优解。

5.1. 目标函数

1) DEED 的运行成本

$$f_1 = \sum_{t=1}^T C_{grid}(t) + C_{MT}(t) + C_{DE}(t) \tag{5-1}$$

$$\begin{cases} C_{grid}(t) = C_{buy}(t) + C_{sell}(t) \\ C_{buy}(t) = c_{buy}(t)P_{buy}(t) \\ C_{sell}(t) = c_{sell}(t)P_{sell}(t) \\ C_{DE}(t) = C_{DE.OM}(t) + C_{DE.F}(t) \\ C_{MT}(t) = C_{MT.OM}(t) + C_{MT.F}(t) \end{cases} \tag{5-2}$$

式中： $C_{grid}(t)$ —— t 时段 DEED 与主电网相互作用过程中运行总成本； $C_{MT}(t)$ —— t 时段 MT 的总运行成本； $C_{DE}(t)$ —— t 时段 DE 总运行成本； $P_{sell}(t)$ —— t 时刻售电功率； $P_{buy}(t)$ —— t 时刻购电功率； $c_{buy}(t)$ 、 $c_{sell}(t)$ —— t 时刻购售电价。

2) DEED 的环境保护成本(f_2)

$$f_2 = \sum_{t=1}^T C_{GRID.EN}(t) + C_{MT.EN}(t) + C_{DE.EN} \tag{5-3}$$

$$C_{GRID.EN}(t) = \sum_{k=1}^n (c_k \gamma_{grid,k}) P_{buy}(t)$$

式中： c_k ——主电网处理 k 类污染物的成本系数； $\gamma_{grid,k}$ ——主电网产生的 k 类污染物的排放量； $C_{GRID.EN}(t)$ ——主电网污染物处理成本。

3) DEED 的碳交易成本

碳交易成本计算详见图 2 中 f_{co_2} 。

5.2. 约束条件

1) 功率平衡约束：

$$P'_{PV}(t) + P'_{WT}(t) + P_{grid}(t) + P_{DE}(t) + P_{MT}(t) + P_{bess}(t) = P_L(t) \tag{5-4}$$

2) 柴油发电机出力约束：

$$\begin{cases} P_{DE}^{min}(t) \leq P_{DE}(t) \leq P_{DE}^{max}(t) \\ |P_{DE}(t) - P_{DE}(t-1)| \leq r_{DE} \end{cases} \tag{5-5}$$

3) 微型燃气轮机出力约束:

$$\begin{cases} P_{MT}^{\min}(t) \leq P_{MT}(t) \leq P_{MT}^{\max}(t) \\ |P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1)| \leq r_{MT} \end{cases} \quad (5-6)$$

4) 联络线传输功率约束:

$$P_{grid}^{\min}(t) \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{\max}(t) \quad (5-7)$$

5) 储能装置约束:

$$\begin{cases} P_{bess}^{\min}(t) \leq P_{bess}(t) \leq P_{bess}^{\max}(t) \\ SOC^{\min}(t) \leq SOC(t) \leq SOC^{\max}(t) \end{cases} \quad (5-8)$$

6) 需求侧用电方式满意度约束:

$$s = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |P_{L,t}^{e0} + \Delta P_{CL,t}^e + P_{SL,t}^e + \Delta L_t^{r,e}|}{\sum_{t=1}^T P_{L,t}^{e0}} \geq s_{\min} s \quad (5-9)$$

式中: $P_{DE}^{\max}(t)$ 、 $P_{DE}^{\min}(t)$ ——DE 出力上下限; $P_{MT}^{\max}(t)$ 、 $P_{MT}^{\min}(t)$ ——MT 出力上下限; $P_{bess}^{\max}(t)$ 、 $P_{bess}^{\min}(t)$ ——储能装置出力上下限, 其下限正值表示功率输入, 负值表示功率输出; r_{DE} ——DE 爬坡功率上限; r_{MT} ——MT 爬坡功率上限; $P_{grid}^{\max}(t)$ 、 $P_{grid}^{\min}(t)$ ——联络线传输功率上下限; $SOC^{\max}(t)$ 、 $SOC^{\min}(t)$ —— t 时刻储能容量的上下限; s ——需求侧用电方式满意度; s_{\min} ——需求侧用电方式满意度最小值。

5.3. 求解 DEED 优化模型的算法描述

AOA 算法的参数较少且优化能力较强[32], 其机制图如图 3 所示, 可较好地解决多目标优化问题, 但在具有非线性、高维数等特点的 DEED 下, 其含大规模方程和不等式约束, 若采用现有方法通常较不易解决。本文评估求解 DEED 非线性和多维数问题的复杂度, 求解本文提出的优化模型过程中利用文献[40]中改进的算术优化算法: 利用引入自适应 t 分布变异策略提高种群的多样性和质量可以有效提升算法的收敛速度, 有助于更加高效地求解 DEED 优化模型; 同时通过引入余弦控制因子的动态边界策略优化 AOA 的寻优过程, 从而协调 AOA 算法的全局勘探和局部开发能力, 在问题维度较大的情况下有效提升算法的求解效率。由于篇幅所限, 算法优化的改进部分不再重新表述。

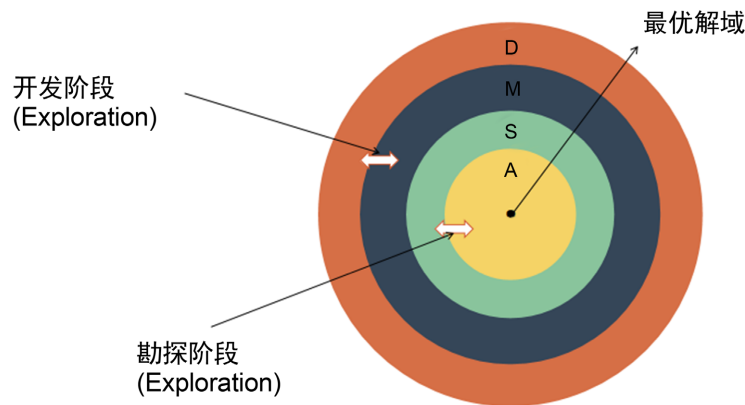


Figure 3. AOA algorithm mechanism diagram [40]

图 3. AOA 算法机制图[40]

6. 算例分析

6.1. 算例参数

动态环境经济调度中的各个装置污染物排放及成本系数[41]见表 1，不同装置的运行参数与成本见表 2，储能参数见表 3。

Table 1. Discharge coefficient and cost of pollutants

表 1. 污染物成本及排放系数

污染物类型	成本系数(元/kg)	污染物排放系数(g/kW·h)			
		PV	DE	MT	Net
CO ₂	0.023	0	680	724	889
SO ₂	6	0	0.306	0.0036	1.8
NO _x	6	0	10.09	0.2	1.6

Table 2. Unit parameters

表 2. 机组参数

参数名称	DE	WT	PV	Net	MT
功率上限/kW	100	400	300	500	300
功率下限/kW	60	0	0	-500	100
爬坡功率上限/(kW/min)	40	200	150	400	200
运维单价/(元/kW·h)	0.128	0	0	0	0.0293

Table 3. Energy storage parameters

表 3. 储能参数

类型	蓄电池容量/kW	数值	最大充放电功率	数值
蓄电池	最大容量	200	初始储能容量	50
	最小容量	50	最大输出功率	30
	最大输入功率	30	充放率	0.9

6.2. 结果分析

1) 改进的算术优化算法与其他经典算法的比较分析

分别采用改进的 AOA 算法与基本 AOA 算法[32]、自适应人工蜂群算法(Adaptive ABC) [24]及双局部粒子群算法[25] (2lb-MOPSO)以总成本为适应度进行求解，验证本文算法在该应用问题上的有效性。实验过程中，迭代次数为 1000，种群大小为 100，四种算法的运行次数均为 100 次。改进的 AOA 算法与其他算法的运行结果比较可见表 4。

从表 4 可以看出，改进后的 AOA 算法在运行时间、最优值和平均值三个方面均优于其他算法。所以，在求解本文改进的 DEED 优化模型上，改进 AOA 具有更好的性能。更加直观的对比分析可见图 4，可见基本 AOA 算法与 2lb-MOPSO 更易早熟不利于全局探索，改进 AOA 算法相比其他算法能更好地找到全局最优值，验证了改进 AOA 算法的优越性。

Table 4. Algorithm comparison and analysis
表 4. 算法比较分析

	改进 AOA	基本 AOA [32]	Adaptive ABC [25]	2lb-MOPSO [26]
运行时间/s	0.77	0.90	0.85	0.79
最优值/元	6974.96	7275.58	7084.34	7298.14
平均值/元	7195.62	7299.96	7294.46	7923.22

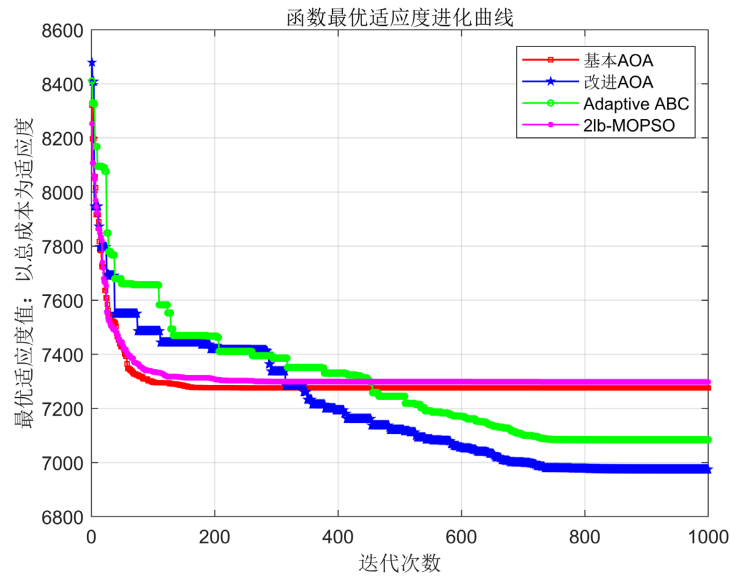


Figure 4. Comparison of algorithm convergence curves
图 4. 算法收敛曲线比较

2) 碳交易机制下考虑 DR 的运行结果分析

本文优化 DEED 模型的主要策略机制为碳交易机制/需求响应, 此小节对图 5 所示场景进行运行结果对比分析。

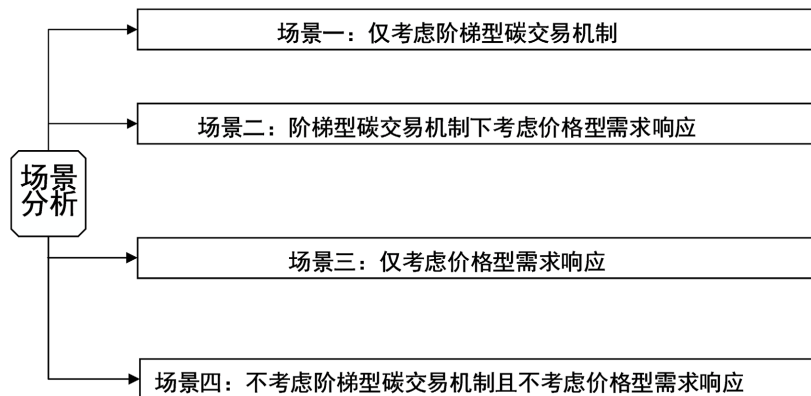


Figure 5. Four cases
图 5. 四种场景

各场景实际碳排放量和各成本如表 5 所示。实时电价参考文献[42]。

Table 5. Daily operation cost in 4 cases
表 5. 各场景成本

场景	总运行成本/元	环保成本/元	碳交易成本/元	运行成本/元	实际碳排放量/kg
1	15242.98	2801.54	332.91	12108.53	22641.96
2	14966.47	2757.68	311.66	11897.13	20880.55
3	16912.19	2881.45	2688.37	11342.37	29572.07
4	18150.31	2903.11	2481.45	12765.75	39703.2

由以上结果可见，场景 2 在各方面都优越于其他场景，验证了本文动态环境经济调度优化模型的合理性。

3) 目标函数的比较分析

由图 6~9 可见，在四个目标函数调度结果中，电储能的充电与放电起到调节的作用，电负荷低的时候

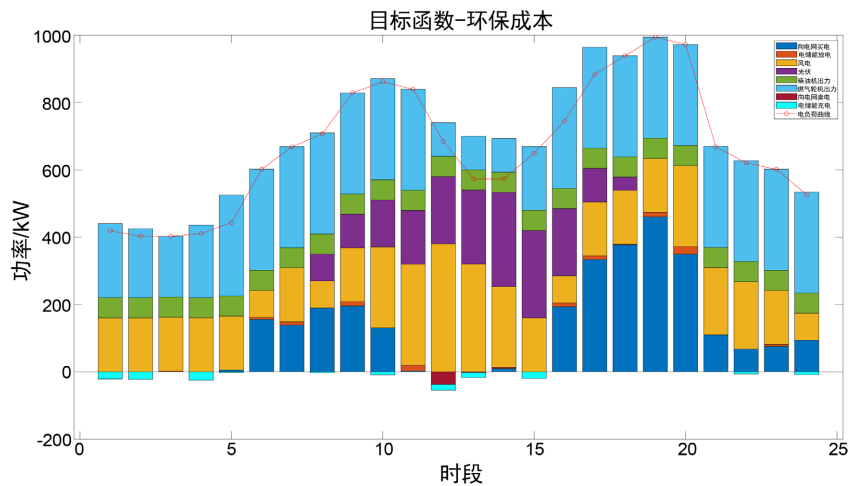


Figure 6. Environmental protection cost
图 6. 环保成本

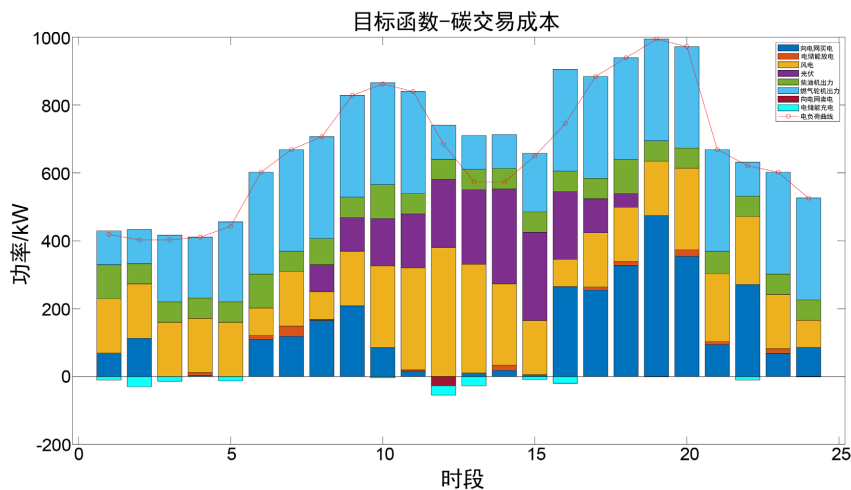


Figure 7. Carbon trading cost
图 7. 碳交易成本

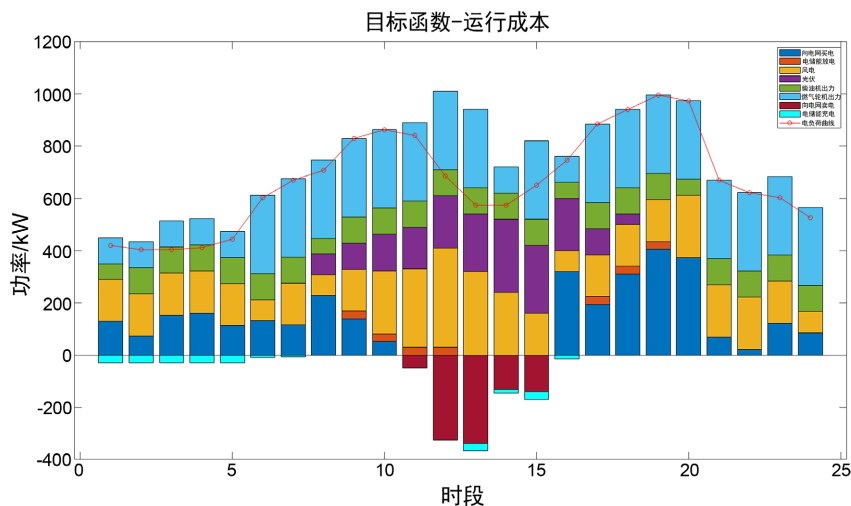


Figure 8. Operating cost
图 8. 运行成本

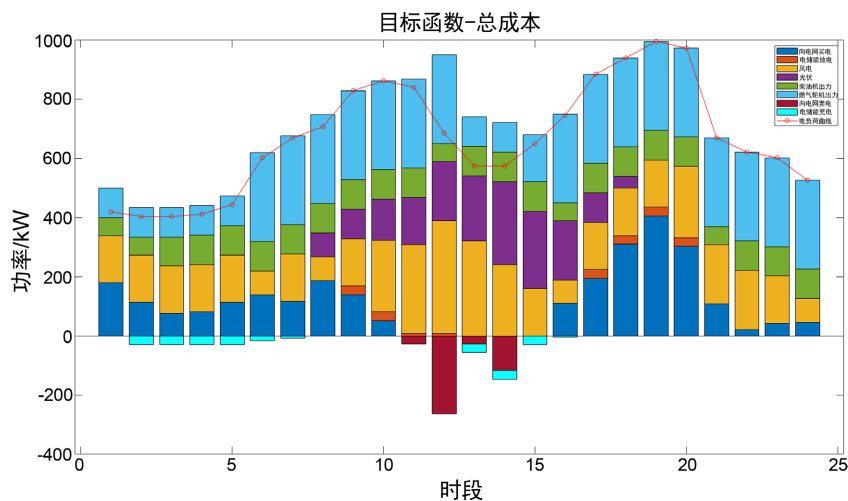


Figure 9. Total cost
图 9. 总成本

候充电，电负荷高的时候放电，保证了经济效益和环境利益。当目标函数为环保成本时，DE 的输出功率远远低于 MT 输出功率，而 MT 相应的污染物排放量远远小于其他设备，可降低污染物治理成本以环境保护成本最小化；当目标函数为碳交易成本时，在碳交易机制的影响下 DE 的输出功率较环保成本中的有一定幅度提升，DE 的 CO₂ 排放量小于 MT 和 Net (见表 1)，增大 DE 的使用可一定程度上降低碳交易成本；当目标函数为运行成本时，首先利用发电成本较低的 MT 发电满足电负荷需求；当目标函数为总成本时，WT、DE、MT、PV 基本满足符合电负荷需求，验证了改进 AOA 算法求解碳机制下考虑需求响应的 DEED 优化模型的显著性。

7. 结论

本文在传统 DEED 的基础上引入碳交易成本目标函数，同时也充分考虑了需求侧的用电情况并采用价格型 DR 方法，重新构建了阶梯式碳交易机制下计及价格型 DR 的动态环境经济调度模式，通过改进的算术优化算法对优化模型进行优化求解，结论如下：

1) 相比于单一恒定碳价的碳交换机制, 阶梯式碳交换机理可以进一步控制碳排放量和改善系统经济效益, 从而实现经济效益与低碳性的双赢。

2) 在阶梯型碳交易机制下, 引入价格型需求响应策略, 能够有效地缓解电力缺额, 激发用户侧响应潜力, 进一步降低运行成本, 优化系统运行的经济性。

3) 文中所提的阶梯型碳交易机制下考虑价格型需求响应的动态环境经济优化调度模型, 可以统筹考虑电力系统的碳排放量与能源总成本, 从而产生了良好的社会经济效果与环境效益, 更适合于实际项目应用。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(61673258, 61075115); 上海市自然科学基金(19ZR1421600)。

参考文献

- [1] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 1-25.
- [2] IPCC (2018) Special Report on Global Warming of 1.5°C. Cambridge University Press, Cambridge.
- [3] 康重庆, 杜尔顺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 821-833.
- [4] 胡志坚, 刘如, 陈志. 中国“碳中和”承诺下技术生态化发展战略思考[J]. 中国科技论坛, 2021(5): 14-20.
- [5] 安军, 陈启鑫, 等. 面向大气污染防治的电力绿色调度策略研究与实践[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 605-612. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0651>
- [6] Ramanathan, R. (1994) Emission Constrained Economic Dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, **9**, 1994-2000. <https://doi.org/10.1109/59.331461>
- [7] Talaq, J.H., El-Hawary, F. and El-Hawary, M.E. (1994) A Summary of Environmental/Economic Dispatch Algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, **9**, 1508-1516. <https://doi.org/10.1109/59.336110>
- [8] Geng, Z., Conejo, A.J., Chen, Q., et al. (2017) Electricity Production Scheduling under Uncertainty: Max Social Welfare vs. Min Emission vs. Max Renewable Production. *Applied Energy*, **193**, 540-549. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.051>
- [9] Sadeghian, H.R. and Ardehali, M.M. (2016) A Novel Approach for Optimal Economic Dispatch Scheduling of Integrated Combined Heat and Power Systems for Maximum Economic Profit and Minimum Environmental Emissions Based on Benders Decomposition. *Energy*, **102**, 10-23. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.044>
- [10] 于德鳌, 李慧, 等. 基于改进萤火虫算法的含风电系统环境经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 84-92. <https://doi.org/10.19781/j.issn.1673-9140.2020.02.011>
- [11] 夏爱明. 基于 MOMPA-DE 算法的含风电系统环境经济调度研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2021. <https://doi.org/10.27171/d.cnki.ghdcc.2021.000044>
- [12] Jebaraj, L., Venkatesan, C., Soubache, I., et al. (2017) Application of Differential Evolution Algorithm in Static and Dynamic Economic or Emission Dispatch Problem: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **77**, 1206-1220. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.097>
- [13] 朱永胜. 电力系统环境经济优化调度研究[D]: [博士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [14] 张磊, 向紫藤, 等. 基于绿色证书交易机制的含风电场电力系统动态环境经济调度[J]. 智慧电力, 2021, 49(10): 75-82.
- [15] 李笑竹, 王维庆, 徐其丹. 基于双群体伪并行 GA-DE 多目标算法的动态环境经济调度[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 42-49.
- [16] Elattar, E.E. (2018) Modified Harmony Search Algorithm for Combined Economic Emission Dispatch of Microgrid Incorporating Renewable Sources. *Energy*, **159**, 496-507. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.137>
- [17] 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): 1-7.
- [18] 武慧虹, 林好, 等. 自适应差分进化算法及对动态环境经济调度问题应用[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(5): 1443-1448+1454. <https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2020.05.0120>
- [19] 夏西强, 路梦圆, 徐春秋. 授权制造下碳交易对制造/再制造影响及协调机制研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(5):

- 136-142.
- [20] 杨威, 龚学良, 等. 碳排放交易市场机制对电力市场的影响: 基于碳价需求响应的电力市场用户行为分析[J/OL]. 南方电网技术, 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20220519.1501.006.html>, 2022-06-01.
- [21] 张晓辉, 闫柯柯, 卢志刚, 等. 基于碳交易的含风电系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2697-2704.
- [22] 张刚, 张峰, 张利, 等. 考虑碳排放交易的日前调度双阶段鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5490-5499.
- [23] 贺鹏, 艾欣. 基于高级量测体系的用户主动需求响应特点分析[J]. 电气时代, 2013(8): 24-26.
- [24] 杨会艳. 基于自适应人工蜂群算法的环境经济调度研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [25] 瞿博阳, 梁静. 双局部粒子群算法解决环境经济调度问题[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(11): 1-6.
- [26] Guo, C.X., Zhan, J.P. and Wu, Q.H. (2012) Dynamic Economic Emission Dispatch Based on Group Search Optimizer with Multiple Producers. *Electric Power Systems Research*, **86**, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2011.11.015>
- [27] Wang, L. and Singh, C. (2008) Balancing Risk and Cost in Fuzzy Economic Dispatch Including wind Power Penetration Based on Particle Swarm Optimization. *Electric Power Systems Research*, **78**, 1361-1368. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2007.12.005>
- [28] Pandit, N., Tripathi, A., Tapaswi, S., et al. (2011) Static/Dynamic Environmental Economic Dispatch Employing Chaotic Micro Bacterial Foraging Algorithm. *2nd International Conference, SEMCCO 2011*, Visakhapatnam, 19-21 December 2011, 585-592. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27172-4_69
- [29] 张洪杰. 改进差分进化算法在电力系统经济调度中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020. <https://doi.org/10.27440/d.cnki.gysdu.2020.001178>
- [30] 肖俊明, 周谦, 等. 多目标进化算法及其在电力环境经济调度中的应用综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 1-9.
- [31] Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd, E.M. and Gandomi, A.H. (2021) The Arithmetic Optimization Algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **376**, Article ID: 113609. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609>
- [32] Manoharan, P., et al. (2021) A New Arithmetic Optimization Algorithm for Solving Real-World Multiobjective CEC-2021 Constrained Optimization Problems: Diversity Analysis and Validations. *Journals & Magazines*, **9**, 84263-84295. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3085529>
- [33] Bansal, P., Gehlot, K., Singhal, A. and Gupta, A. (2021) Automatic Detection of Osteosarcoma Based on Integrated Features and Feature Selection Using Binary Arithmetic Optimization Algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, **81**, 8807-8834. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-525421/v1>
- [34] Khatir, S., Tiachacht, S., Le Thanh, C., Ghandourah, E., Mirjalili, S. and Wahab, M.A. (2021) An Improved Artificial Neural Network Using Arithmetic Optimization Algorithm for Damage Assessment in FGM Composite Plates. *Composite Structures*, **273**, Article ID: 114287. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114287>
- [35] Lacal-Arantesgui, R. (2015) Materials Use in Electricity Generators in Wind Turbines State-of-the-Art and Future Specifications. *Journal of Cleaner Production*, **87**, 275-283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.047>
- [36] 王子龙, 于东立, 门向阳, 等. 含压缩空气储能的能源互联微网型系统优化配置[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(6): 40-45.
- [37] 甘阳. 考虑需求响应的独立微电网多目标优化配置研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [38] 李国庆, 翟晓娟, 李扬, 等. 基于改进蚁群算法的微电网多目标模糊优化运行[J]. 太阳能学报, 2018, 39(8): 2310-2317.
- [39] 赵国涛, 丁泉, 付军华, 等. 基于多市场联动的区域能源系统低碳路径研究[J]. 电力建设, 2021, 42(3): 19-26.
- [40] 郑婷婷, 刘升, 等. 自适应 t 分布与动态边界策略改进的算术优化算法[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(5): 1410-1414. <https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2021.09.0428>
- [41] Lu, X., Zhou, K. and Yang, S. (2017) Multi-Objective Optimal Dispatch of Micro-Grid Containing Electric Vehicles. *Journal of Cleaner Production*, **165**, 1572-1581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.221>
- [42] Amjad, A.M., Alireza, S., et al. (2011) Multi-Objective Operation Management of a Renewable MG (Micro-Grid) with Back-Up Micro-Turbine/Fuel Cell/Battery Hybrid Power Source. *Energy*, **36**, 6490-6507. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.017>