

基于电-碳协同管控的新型电力系统 低碳调度技术

乔继斌^{1,✉}, 范新野¹, 刘戡¹, 刘东²

(1. 南瑞集团有限公司 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: [目的]随着“双碳”目标和以新能源为主体的新型电力系统建设的不断推进, 电力系统运行方式变得复杂多变, 其安全稳定运行面临巨大的挑战, 亟须对多发电方式下的电力系统多目标综合优化协同调度技术进行深入研究提升电网对大规模清洁能源的消纳能力以及电力系统低碳经济安稳运行水平。[方法]针对以上问题, 文章提出了基于电-碳协同管控的新型电力系统低碳调度技术实现电网清洁低碳经济稳定运行。文章首先分析了新型电力系统多时间尺度调控机制, 以电力系统运行和碳排放成本综合最优为目标, 综合考虑系统运行的各种约束条件构建了综合考虑电力系统运行成本、碳排放成本的多目标综合优化调度模型, 基于改进 NSGA-II 算法对机组出力进行优化算法实现新型电力系统运行成本与碳排放达到最优平衡。[结果]然后通过对算法的收敛性能及目标结果等方面进行了验证分析, 结果表明, 在不造成过多经济压力的前提下, 文章算法可有效降低 7.2% 的碳排放量, 实现经济-环境协同的电网资源最优配置。[结论]文章提出的电-碳协同多目标优化调度模型能够实现运行成本、碳交易成本与碳捕捉成本的最优平衡, 支撑“双碳”目标。

关键词: 双碳; 电-碳协同; NSGA-II 算法; 低碳调度; 新型电力系统

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-391

文章编号: 2095-8676(2025)

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-391

中图分类号: TK01; TM73

The Low Carbon Dispatch Technology for New Power Systems Based on Electricity Carbon Collaborative Control

QIAO Jibin^{1,✉}, FAN Xinye¹, LIU Jian¹, LIU Dong²

(1. Nari Group Corporation, Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd, Beijing 100192, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: [Objective] With the continuous promotion of the dual carbon target and the construction of a new type of power system dominated by new energy, the operation mode of the power system has become complex and varied, and its safe and stable operation faces enormous challenges. It is urgent to conduct in-depth research on multi-objective comprehensive optimization and collaborative scheduling technology for power systems under multiple power generation modes to enhance the grid's ability to absorb large-scale clean energy and the low-carbon and stable operation level of the power system. [Method] In response to the above issues, this article proposes a new low-carbon dispatch technology for power systems based on electricity carbon collaborative control to achieve clean, low-carbon, and stable operation of the power grid. This article first analyzes the multi time scale regulation mechanism of the new power system, with the goal of achieving comprehensive optimization of power system operation and carbon emission costs. Taking into account various constraints of system operation, a multi-objective comprehensive optimization scheduling model that comprehensively considers power system operation costs and carbon emission costs is constructed. Based on the improved NSGA-II algorithm, the unit output is optimized to achieve the optimal balance between the operating costs and carbon emissions of the new power system. [Result] Then, the convergence performance and target results of the algorithm were verified and analyzed. The results showed that, without causing excessive economic pressure, the algorithm proposed in this paper can effectively reduce carbon emissions by 7.2%, achieving the optimal allocation of power grid resources through economic environmental synergy. [Conclusion] The multi-objective optimization

收稿日期: 2024-11-18 修回日期: 2025-03-02

基金项目: 国家自然科学基金“涂层超导复合结构三维电-磁-热有限元仿真模型研究”(51907180)

scheduling model for electricity carbon collaboration proposed in this article can achieve the optimal balance of operating costs, carbon trading costs, and carbon capture costs, supporting the "dual carbon" goal.

Key words: dual carbon; electricity carbon synergy; NSGA-II algorithm; low carbon scheduling; new power system

0 引言

我国碳达峰、碳中和战略目标的提出,为我国应对气候变化和引导能源系统绿色发展提供了指引。在我国全社会碳排放总量中,能源活动碳排放约占87%,其中电力二氧化碳排放占能源生产活动碳排放的40%。因此,电力系统在能源系统碳减排中发挥关键作用,是未来能源系统碳减排的主力。国家电网公司运营着全球电压等级最高、规模最大、保持安全运行纪录最长、清洁能源发展最快的电网^[1-2]。为此,电力系统从能耗双控向碳排放双控方式的转变势在必行,亟须构建清洁低碳安全高效的能源体系,控制化石能源总量,提高能源利用效能,实施可再生能源替代行动^[3-5]。

电碳协同是指电力交易和碳交易2个市场体系,在环境权益的核算核查、数据互通、统一认证等方面进行有效的统筹衔接,贯穿环境权益的开发、利用、管理各个环节^[6]。随着可再生能源的快速发展和智能电网技术的不断进步,电-碳协同联动不仅能够促进能源结构的优化,还能推动经济的绿色转型。

而当前电力调度向“电-碳”协同调度推进面临巨大挑战。

1) 碳核算能力不足

当前碳排放核算方法的时间分辨率、空间分辨率不够^[7-9],因此高比例新能源接入背景下,电力系统碳核算的时空分辨率需要进一步提升^[10-12]。目前在电网电-碳协同管控的过程中,碳排路径不明晰,各类资源的碳减排潜力不尽相同,碳减排潜力评估难度较大,无法准确解析电源与负荷节点间的电碳关系。

2) 碳预测水平不足

当前系统缺少多主体层级、全时间维度的碳排放精准预测能力,造成碳排放管控手段滞后,无法支撑电网调控机构开展基于碳排放预测结果的主动管控措施。

3) 供应链碳管理难

上下游供应链的碳足迹数据无法互通,导致碳

足迹溯源的“取碳能力”不足,无法有效挖掘电网运行的降碳潜力,进而无法基于电-碳耦合模型精准做出辅助决策。

4) 碳管控手段缺乏

当前电网运行方式中,未全面考虑机组碳排放信息,缺少以低碳为导向的优化调度新模式,发电侧碳排放管控手段缺乏。如何获取精确的电网运行火电机组实时碳排放量数据,并对影响火电机组碳排放量的影响因素进行分析,构建火电机组实时碳排放量和火电机组功率出力之间的电-碳耦合模型成为电网碳管控的难点。

以上问题导致电网低碳运行态势感知面临巨大的挑战,对有效推进“能耗双控”向“碳排双控”转变构成巨大威胁。因此在电-碳全生命周期管理中,亟须构建从发电侧至用户侧的碳流追踪溯源模型,挖掘调度数据碳价值,打通调度涉碳业务数据通道,建设电网各时间、空间维度里,不同业务场景下的区域电网碳监测、碳分析、碳决策等电碳协同能力,提供模型更优、过程更精、结果更细的数据算法支持,实现新型电力系统低碳调度目标。

面向新型电力系统,兼顾经济性、安全性的电网低碳调度运行控制需求愈发迫切。为提高新型电力系统新能源的消纳能力,降低碳排放量,越来越多的国内外科研工作者开始聚焦电网的低碳经济调度运行方式,文献[13]综合考虑了系统运行成本与运行风险值2个因素,设计了基于改进的WCVaR的电力系统低碳经济调度模型,有效提升了系统的灵活性及经济性调节能力。文献[14]基于地理信息,集电网模型、运行、环境、时空数据于一体,建立了一种“电力-气象一张图”的低碳调度模型,提升了电网应对极端气候的防御能力和精细化的管理能力。文献[15]联合碳交易系统和绿色证书系统,设计了一种面向综合能源系统的低碳调度模型,有效促进了清洁能源的高效利用和碳排放的高效管控,该模型显著提高了综合能源系统的效益和降低了电力碳排放指标。以上的研究均未能充分考虑清洁可再生能源的随机不确定性运行风险,迫切需要进行约束

条件下的多目标全局寻优优化调度方式来破解当前现状。

基于此, 本文提出了基于电-碳协同管控的新型电力系统低碳调度技术, 通过电-碳协同管控平台利用碳排放实时监测技术、电网碳足迹追踪等技术, 构建高分辨率时空耦合的碳足迹追踪模型, 实现对电网不同环节碳排放的态势感知及全网范围内多能耦合的碳足迹实时高精度追踪, 增加数据分析维度和精度, 提升电网调度碳分析能力。然后提出基于 NSGA-II 算法的低碳调度算法, 构建以电力系统经济运行、碳排放综合成本最低为目标, 以电网安全稳定为边界条件的多目标优化模型, 结合电-碳协同管控平台提供的实时碳足迹信息, 利用 NSGA-II 算法对模型求解, 实现新型电力系统低碳运行的优化调度, 服务与新型电力系统低碳调度策略。

1 基于电-碳协同的电网低碳调度技术

在源荷平衡、资源调节、设备与断面约束、稳定裕度约束与机组备用约束条件下基于多目标优化算法对源网荷储各侧的可调节资源对电网进行低碳调度。其中目标函数有: 运行成本最低, 碳排放成本最低、碳捕捉成本最低^[16-18]。约束条件有: 有功平衡约束、机组出力约束等, 为进一步优化碳交易机制, 形成奖惩阶梯型碳交易成本计算模型。其模型构建如下:

1.1 电网低碳调度目标函数

1) 电力系统运行成本

运行成本为各类发电方式的运行总成本, 按照总运行成本最小原则, 其目标函数如下:

$$F_0 = (F_h + F_g + F_c) \quad (1)$$

式中:

F_0 ——总成本(元);

F_h 、 F_g 、 F_c ——火电、新能源(风电与光伏)、储能的运行成本(元)。

(1) 火电运行成本

$$F_h = \sum_{j=1}^n (a_{h,j} P_{h,j}^2 + b_{h,j} P_{h,j} + c_{h,j}) \quad (2)$$

式中:

$a_{h,j}$ 、 $b_{h,j}$ 、 $c_{h,j}$ ——火电机组 j 的发电成本系数, 分别取 0.021 1 元/MW、21.05 元/MW、1313.6 元/MW;
 $P_{h,i}$ ——火电机组 j 的有功功率(MW)。

(2) 新能源运行成本

新能源机组运行成本主要包括风电和光伏的设备费用与应对风光不确定性的旋转容量备用费用。

$$F_g = \sum_{j=1}^m \delta_g Q_{g,j} + \beta_g (1 - \lambda_j) Q_{g,j} \quad (3)$$

式中:

δ_g ——新能源(光伏、风电)机组的发电成本系数;

$Q_{g,j}$ ——新能源机组 j 的发电总量(kWh);

β_g ——补偿单价(元/kWh);

λ_j ——新能源机组 j 预测准确度系数。

(3) 储能运行成本

储能运行成本 F_c 包含设备投资费用 F_{BB} 和设备维护费用 F_{BM} 。

$$F_c = F_{BB} + F_{BM} \quad (4)$$

2) 碳排放成本

碳排放成本包括碳交易成本和碳捕捉成本两部分。

碳交易成本需考虑碳排放量是否超过碳排放配额, 其计算公式如下:

$$F_{CO_2} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n M_{CO_2} (V_i - S_i) & V_i > S_i \\ -\sum_{i=1}^n M_{CO_2} (V_i - S_i) & V_i < S_i \end{cases} \quad (5)$$

式中:

F_{CO_2} ——碳交易成本(元);

M_{CO_2} ——碳交易单价(元/tCO₂e);

V_i, S_i ——机组 i 的实际碳排放量(t)、碳排放配额(tCO₂e)。依据国家标准, 文中燃煤机组的碳排配额单价设定为 0.979 t/MWh^[19-21]。

碳捕捉成本主要包括耗电成本与运维成本, 其公式如下:

$$F_{CCS} = Q_{CCS} \cdot P_{ae} + M_{CCS} \cdot \kappa_{CCS} \quad (6)$$

式中:

F_{CCS} ——碳捕捉成本(元);

Q_{CCS} ——捕碳设备、转化设备、封存设备等的耗电量(kWh);

P_{ae} ——电价(元/kWh);

M_{CCS} ——年碳捕捉总量(t);

κ_{CCS} ——单位捕捉量的运营和维护费用(元/t)。

综合考虑当前的碳捕捉水平参考国际标准, 碳捕捉

耗电单价设定为 0.25 kWh/kg。

综上碳排放成本为:

$$F_p = F_{\text{co}_2} + F_{\text{css}} \quad (7)$$

F_p ——碳排放成本(元)。

1.2 约束条件

1)有功功率平衡约束

有功平衡约束如下:

$$\sum_{j=1}^{N_h} P_{h,j,t} + \sum_{k=1}^{N_w} P_{w,k,t} + \sum_{m=1}^{N_{pv}} P_{pv,m,t} + P_{b,t} - P_{LD,t} - P_{Lo,t} = 0 \quad (8)$$

式中:

N_h 、 N_w 、 N_{pv} ——火电机组、风电机组、光伏机组的数量;

$P_{h,j,t}$ 、 $P_{b,t}$ 、 $P_{LD,t}$ 、 $P_{Lo,t}$ ——第 j 个火电机组在 t 时刻的有功功率(kW)、电池放电功率(kW)、系统用电量(kW)与线损(kW)。

2)机组出力约束

依据机组的出力计算方法确定出各类机组输出功率最值后,各类机组在 t 时刻的出力约束如下所示:

$$\begin{cases} P_{h,j}^{\min} \leq P_{h,j,t} \leq P_{h,j}^{\max} & j \in N_h \\ P_{v,m}^{\min} \leq P_{v,m,t} \leq P_{v,m}^{\max} & m \in N_s \\ P_{w,k}^{\min} \leq P_{w,k,t} \leq P_{w,k}^{\max} & k \in N_w \end{cases} \quad (9)$$

式中:

$P_{h,j}^{\min}$ 、 $P_{h,j}^{\max}$ ——第 j 个火电机组的最小、最大出力(kW);

$P_{v,m}^{\min}$ 、 $P_{v,m}^{\max}$ ——第 m 个光伏机组的最小、最大出力(kW);

$P_{w,k}^{\min}$ 、 $P_{w,k}^{\max}$ ——第 k 个风电机组的最小、最大出力(kW)。

3)储能充放电约束

电力系统储能充放电约束为:

$$-P_c^{\max} \leq P_{c,t} \leq P_c^{\max} \quad (10)$$

式中:

$P_{c,t}$ —— t 时刻的充放电功率(kW),其值大于 0 表示充电,小于 0 表示放电;

$P_c^{\max}$ ——最大充电功率(kW)。

1.3 算法模型求解

根据 1.1 节的目标函数与 1.2 节的约束条件表达式,综合考虑电力系统运行成本和碳排放成本的联合协同优化求解模型,其表达式为:

$$\min(F = F_0 + F_p) \quad (11)$$

F_0 ——系统综合运行成本(元);

F_p ——碳排放成本(元)。

1.4 模型算法设计与实现

在处理多目标规划问题时,首要步骤是剖析各单一目标背景下的最优规划,其次利用综合规划与评估策略,同时将多个变量纳入考量,对产生的最优解集合进行多维度、多目标综合评判,定位并细分帕累托最优解空间求解帕累托最优解集,然后根据各优化目标的重要性或优先级,对帕累托最优解集进行区域划分,最终,基于整体效益最大化的原则,在划分好的解集区域内进行精细搜索,找到基于综合效益导向的精准求解^[22-24]。

多目标遗传算法通过智能的搜索机制,探索并定位到一系列解,这些解在多个维度上均表现优异,即该解集中的每一个解都能使所有目标函数在可行域内尽可能接近各自的最优水平,从而有效应对复杂的多目标优化挑战。NSGA-II 算法经常被用于求解多目标规划问题,与传统遗传算法相比,NSGA-II 具有运行效率高、优化结果准确度高优点。本文运用 NSGA-II 算法,针对新型电力系统环境下的多目标优化调度的调控需求,构建了一个多目标优化模型。旨在全面平衡火电机组、水电机组及储能系统的功率输出,实现两大核心优化目标:最小化电网的运行成本,同时力求电网的碳排放成本达到最优水平,从而确保电网的经济性与环保性双重效益。算法步骤如下:

(1)种群初始化。

(2)首先对初始种群执行非支配排序操作,以区分不同解之间的优劣关系。基于排序结果,进行个体的选择过程,以确保优良特性得以保留。然后利用高斯交叉和变异操作对选定的个体进行遗传操作,以探索新的解空间并促进种群的多样性。这一系列步骤完成后,即标志着第一代子种群的生成。将进化代数(Gen)增加至 2,表示进化过程已推进至下一代。

(3)合并父代种群与子代种群中的个体,形成一个包含更多遗传多样性的新种群。

(4)判断是否已生成新的父代种群,如果没有则需要评估新合并种群中个体的目标值。然后执行快速非支配排序,以区分其优劣层级,计算每个非支配层内个体的拥挤度,采用精英策略,结合非支配排序

和拥挤度信息,从合并后的种群中挑选出合适的个体,以构成新的父代种群,为下一轮进化过程做准备,否则进入下一步。

(5)针对已生成的父代种群执行选择、交叉、变异等操作,生成新一代子代种群。

(6)检查当前的进化代数(Gen)是否已经达到了预设阈值。如果尚未达到,将进化代数增加 1 即 $Gen = Gen + 1$,并继续回到之前的步骤(3)。反之算法结束。NSGA-II 算法求解过程如图 1 所示。

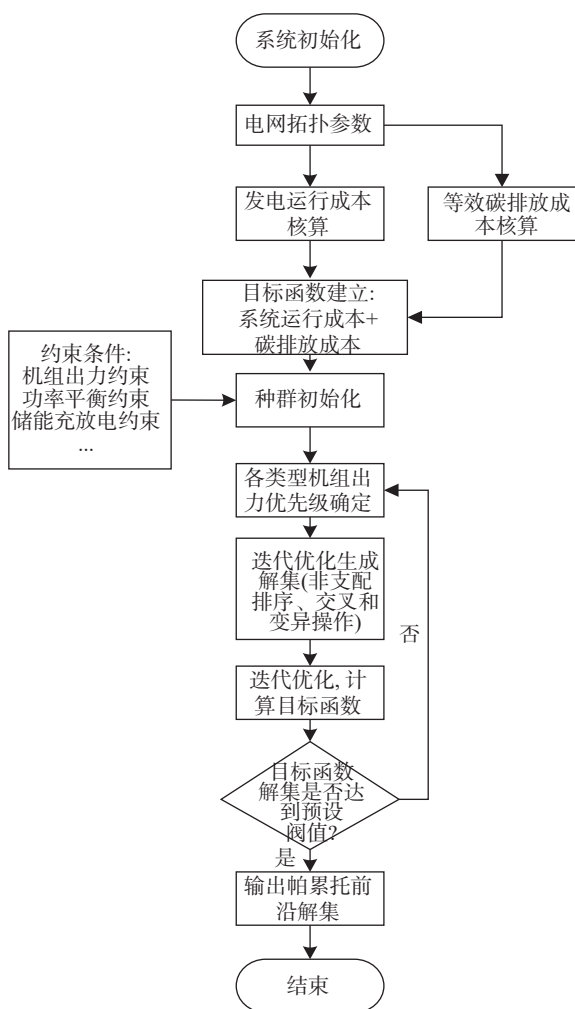


图 1 基于 NSGA-II 算法的低碳调度模型求解过程

Fig. 1 Solution process of low-carbon scheduling model based on NSGA-II algorithm

2 电网低碳优化调度策略分析

本文利用基于 NSGA-II 算法的低碳调度方法,构建以电力系统运行成本和碳排放为目标,以电网安全稳定为边界条件的多目标协同优化模型,实时

碳足迹信息作为模型输入,利用 NSGA-II 算法对模型进行求解,得到电力系统低碳运行的优化调度策略,助力理想调度的实现。本次针对综合园区进行低碳调度优化,其风光新能源日功率曲线如图 2 所示。

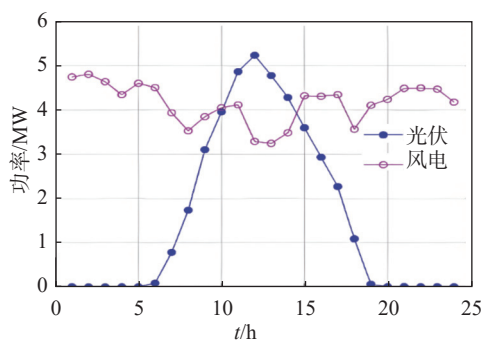


图 2 新能源日功率曲线

Fig. 2 Daily power curve of new energy

首先根据综合园区的外购电日碳排放曲线,结合园区自身分布式能源,对园区内部用能优化。考虑园区用电方式包括外购电、本地光伏、风电、燃气、燃煤、储能等方式,本文结合实际分析了 3 种不同场景期望目标下系统的最优调度策略:

(1)场景 1 为最理想场景如图 3 所示,即综合考虑电网碳排放与电力运行成本下的协同优化调度方式。

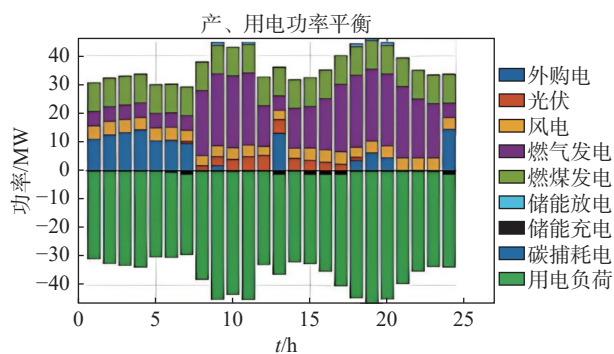


图 3 考虑碳排放与运行成本平衡的均衡调度策略

Fig. 3 Balanced scheduling strategy considering the balance between carbon emissions and operating costs

(2)场景 2 以电力系统运行成本最低为主的经济调度方式。

(3)场景 3 以碳排放成本最低为主的低碳调度方式。

在场景 1 协同优化调度方式下,各类型的发用

电功率的时序如图 4 所示。鉴于新能源发电在所有情形下均能达到最大发电能力, 因此在不同方式间并无差异。

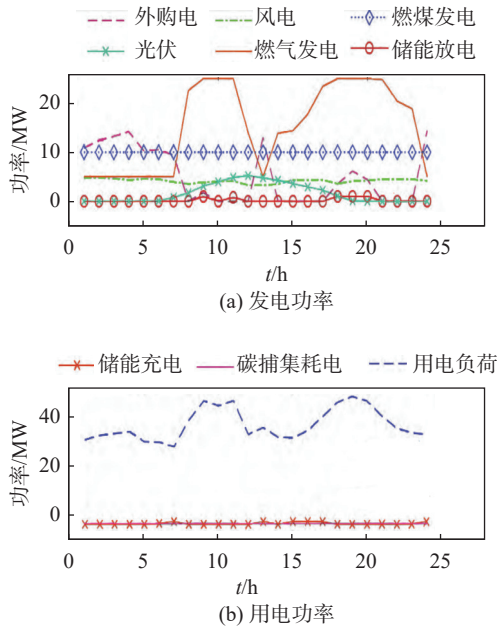


图 4 场景 1 方式下的发电功率时序调度图

Fig. 4 Time sequence scheduling diagram of power generation and consumption in scenario 1 mode

2.1 帕累托最优解集分析

依据本文构建的基于改进 NSGA-II 算法的新型电力系统低碳调度模型, 设置种群迭代次数 300 代, 本文算法与传统的 NSGA-II 算法的种群进化过程如图 5 所示。

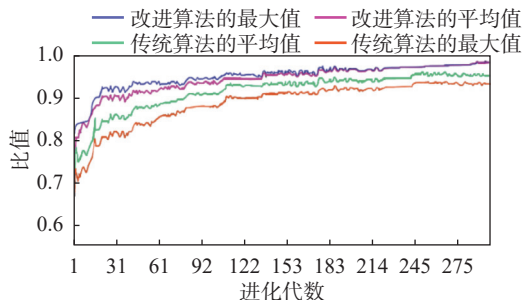


图 5 本文改进的 NSGA-II 算法与传统算法的比较

Fig. 5 Comparison between Improved NSGA-II Algorithm and Traditional Algorithm

由图可知, 相较于传统的 NSGA-II 算法, 本文所提出的算法在收敛速度、各代平均表现以及最优值获取上均展现出优越性, 验证了本文所提的改进算法的合理性, 并表明训练模型参数的设置及计算结

果具有较高的准确性、可信性。

2.2 不同方案下成本及碳排放量分析

本文综合考虑运行成本与等效碳排放两大决策因素, 根据电网调控流程对各类机组最优出力进行调优, 3 种场景下的日内耗能及系统成本分布如表 1、表 2 所示。本文算法(均衡调度)与其他 2 种算法在成本及 CO₂ 的排放量方面的比较如图 6 所示。

表 1 3 种场景下的耗能

Tab. 1 Energy consumption in three scenarios

调度方式	光伏	风电	外购电	燃气	燃煤	储能
均衡调度	38 762	99 673	124 110	365 158	240 465	4 794
经济调度	38 762	99 673	144 572	319 859	267 233	2 863
低碳调度	38 762	99 673	119 223	389 909	221 406	3 989

表 2 3 种场景下的系统成本

Tab. 2 System costs in three scenarios

调度方式	运行成本/元	碳交易成本/元	碳捕捉成本/元	CO ₂ 排放/(t·h ⁻¹)	碳排放配额/(t·h ⁻¹)
均衡调度	254 320	7 716	5 730	284.76	185.8
经济调度	253 461	9 431	5 613	306.87	185.8
低碳调度	324 162	5 734	7 641	264.62	185.8

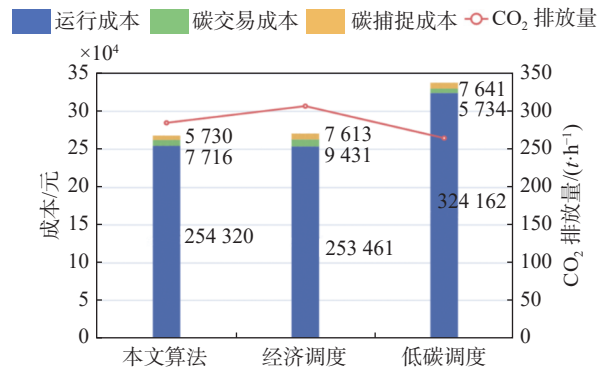


图 6 本文算法与其他调度算法的比较

Fig. 6 Comparison of this algorithm with other scheduling algorithms

由表 1 和表 2 可知, 在经济调度或者低碳调度下, 由于仅聚焦于单一优化目标, 忽略其他约束条件, 会导致局部收敛无法获取全局最优解。按照场景 2 经济调度策略执行, 则运行成本较低的燃煤机组占比较大, 没有考虑到电网碳迹追踪及碳排放检测技术的规模化应用, 导致在该策略执行下碳排放严重超标。而按照场景 3 低碳调度策略执行, 为降低碳

排放目标, 清洁能源使用占比较大, 导致其运行成本高昂。按照场景 1 的均衡调度策略执行, 碳排放与运行成本两大因素相互制约, 能够实现在不造成巨大运行成本的前提下达到设置的碳排放设定的目标的全局最优解。

3 结论

文章利用电-碳协同管控平台实现对电网不同环节碳排放的态势感知, 增加数据分析维度和精度, 提升电网调度碳分析能力。然后提出基于 NSGA-II 算法的多目标优化算法, 构建了综合考虑电力系统运行、碳排放的联合全局寻优的调度方法, 实现新型电力系统低碳运行的多目标协同调度, 服务于新型电力系统低碳调度策略。

参考文献:

- [1] 庞鹏飞, 单禹钦, 沈嘉昆, 等. 基于无监督学习的园区碳排放数据监测方法 [J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(11): 39-47. DOI: 10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2023.11.06.
- [2] 魏欣, 张宗艺, 杨利鸣. 我国碳定价机制构建关键问题 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 57-62. DOI: 10.16516/j.cec.2024.5.06.
- [3] 刘钊, 郭子豪, 申安, 等. 考虑冷热电灵活性负荷需求响应的区域综合能源系统运行优化 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 153-163. DOI: 10.16516/j.cec.2024.6.16.
- [4] 李建山, 王森, 刘加根. 燃煤电厂全过程低碳节能技术路径探讨 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(3): 29-40. DOI: 10.16516/j.cec.2022.03.004.
- [5] 严金伟, 谭露, 刘念, 等. 基于碳流追溯的多微电网系统电碳耦合交易方法 [J]. 电网技术, 2024, 48(1): 39-53. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0591.
- [6] 赵宏兴, 肖建平, 乔中鹏, 等. 电碳耦合市场环境下电力系统运行模拟方法 [J]. 电力建设, 2023, 44(7): 50-56. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.07.006.
- [7] 彭军林, 石勇, 于哲, 等. 基于 FTU 的配电网单相接地故障定位与恢复方法 [J]. 电器与能效管理技术, 2024(2): 72-78. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2024.02.012.
- [8] 刘广一, 王继业, 汤亚宸, 等. 电网碳排放因子研究方向与应用需求的演变进程 [J]. 电网技术, 2024, 48(1): 12-28. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0475.
- [9] 汤亚宸, 刘婷婷, 刘广一, 等. 园区电力碳排放核算系统 [J]. 供用电, 2022, 39(10): 36-43. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2022.10.005.
- [10] 施勇, 顾唯华, 刘睿, 等. 基于电碳耦合的配电网电源规划 [J]. 电力与能源, 2022, 39(10): 36-43 (3): 249-255. DOI: 10.11973/dlyny202203014.
- [11] 刘洋, 崔雪, 谢雄, 等. 电碳联动环境下考虑社会效益最优的发电权交易研究 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 112-117+148. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.13.018.
- [12] 李雪, 彭冲. 基于灰色预测的错峰停电研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2016(21): 54-57+70. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2016.21.011.
- [13] 胡新雨, 郁海彭, 何智, 等. 基于人工智能的变电站倒闸智能防误技术研究与应用 [J]. 电器与能效管理技术, 2024(6): 70-79. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2024.06.011.

- operation based on artificial intelligence [J]. *Electrical & energy management technology*, 2024(6): 70-79. DOI: [10.16628/j.cnki.2095-8188.2024.06.011](#).
- [14] 徐慧慧, 田云飞, 赵宇洋, 等. 考虑绿证-碳交易的多虚拟电厂混合博弈优化调度 [J]. *智慧电力*, 2024, 52(3): 1-7+16. DOI: [10.3969/j.issn.1673-7598.2024.03.001](#).
XU H H, TIAN Y F, ZHAO Y Y, et al. Optimal scheduling of multiple virtual power plants mixed game considering green certificate and carbon trading [J]. *Smart power*, 2024, 52(3): 1-7+16. DOI: [10.3969/j.issn.1673-7598.2024.03.001](#).
- [15] 廖波, 张央, 徐鸿飞, 等. 考虑电-碳交易的园区综合能源系统经济运行评估 [J]. *可再生能源*, 2024, 42(2): 252-258. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5292.2024.02.014](#).
LIAO B, ZHANG Y, XU H F, et al. Economic operation evaluation of integrated energy system in industrial parks considering electricity carbon trading [J]. *Renewable energy resources*, 2024, 42(2): 252-258. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5292.2024.02.014](#).
- [16] 沈豫, 韩钟宽, 曾振松, 等. 基于改进 WCVaR 的电力系统低碳经济调度 [J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(5): 102-111. DOI: [10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.011](#).
SHEN Y, HAN Z K, ZENG Z S, et al. Low-carbon economic dispatching of power systems based on fuzzy WCVaR [J]. *Journal of electric power science and technology*, 2024, 39(5): 102-111+128. DOI: [10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.011](#).
- [17] 李贝贝, 范英乐, 李存, 等. 基于“电力-气象一张图”的低碳调度系统的建设与应用 [J]. *自动化应用*, 2024, 65(17): 108-110+113. DOI: [10.19769/j.zdhy.2024.17.029](#).
LI B B, FAN Y L, LI C, et al. Construction and application of low-carbon dispatching system based on "power meteorological one map" [J]. *Automation applications*, 2024, 65(17): 108-110+113. DOI: [10.19769/j.zdhy.2024.17.029](#).
- [18] 彭婧, 徐慧慧, 田云飞, 等. 基于碳绿证市场机制的多区域电力系统低碳调度模型 [J]. *可再生能源*, 2024, 42(8): 1120-1126. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5292.2024.08.017](#).
PENG J, XU H H, TIAN Y F, et al. A low carbon dispatching model for multi regional power systems based on carbon green certificate market mechanism [J]. *Renewable energy resources*, 2024, 42(8): 1120-1126. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5292.2024.08.017](#).
- [19] 李汪繁, 吴何来. 双碳目标下我国碳市场发展分析及建议 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 118-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.015](#).
LI W F, WU H L. Analysis and suggestions for the development of carbon emissions trading markets in China under carbon peak and neutrality goals [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 118-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.015](#).
- [20] 朱静慧, 高佳, 余欣梅, 等. 双碳背景下大型能源企业碳资产管理体系统构建 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(5): 168-177. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.5.18](#).
ZHU J H, GAO J, YU X M, et al. Construction of carbon asset management system for large energy enterprises under the background of carbon peaking and carbon neutrality [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(5): 168-177. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.5.18](#).
- [21] 汪鹏, 宋晓华, 杨昊雯, 等. 新配额制下电力-绿证-超额消纳量多尺度市场交易仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(11): 2458-2469. DOI: [10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0699](#).
WANG P, SONG X H, YANG H W, et al. Multi-market coupling trading simulation of electricity green certificate and excess consumption under new renewable portfolio standard [J]. *Journal of system simulation*, 2022, 34(11): 2458-2469. DOI: [10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0699](#).
- [22] 李秋航, 李华强, 何永祥, 等. 计及碳排放成本的输电网与风电分布鲁棒协同扩展规划 [J]. *电力信息与通信技术*, 2023, 21(1): 62-70. DOI: [10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2023.01.09](#).
LI Q H, LI H Q, HE Y X, et al. A distributionally robust joint expansion planning for transmission network and wind power considering carbon emissions cost [J]. *Electric power information and communication technology*, 2023, 21(1): 62-70. DOI: [10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2023.01.09](#).
- [23] 靳冰洁, 李家兴, 彭虹桥, 等. 需求响应下计及电碳市场耦合的多元主体成本效益分析 [J]. *电力建设*, 2023, 44(2): 50-60. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2023.02.005](#).
JIN B J, LI J X, PENG H Q, et al. Cost-benefit analysis of multiple entities under the coupling of electricity and carbon trading market considering demand response [J]. *Electric power construction*, 2023, 44(2): 50-60. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2023.02.005](#).
- [24] 吉斌, 吕力, 陈振寰, 等. 基于区块链技术的电力碳排放权交易市场机制设计与应用 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(12): 1-10. DOI: [10.7500/AEPS20200707004](#).
JI B, CHANG L, CHEN Z H, et al. Blockchain technology based design and application of market mechanism for power carbon emission allowance trading [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(12): 1-10. DOI: [10.7500/AEPS20200707004](#).

作者简介:



乔继斌

乔继斌 (第一作者, 通信作者)

1972-, 男, 工程师, 主要从事电力系统分析及其自动化相关的工作 (e-mail) 18846820376@163.com。

范新野

1986-, 男, 工程师, 主要从事电力系统分析及其自动化相关的工作 (e-mail) 1846820376@163.com。

刘戡

1990-, 男, 工程师, 从事电力系统分析及其自动化相关的工作。

刘东

1990-, 男, 工程师, 从事电力系统分析及其自动化相关的工作。

(编辑 叶筠英)