

基于碳交易和绿证交易的多能源电力调度方法研究

吴若冰¹, 杨茗², 杨铮宇³

(1. 云南电网有限责任公司信息中心, 昆明 650000; 2. 云南电网有限责任公司计量中心(电力负荷控制技术中心), 昆明 650000; 3. 云南电网有限责任公司, 昆明 650000)

摘要: 双碳目标的提出,促进了电力调度向低碳转换,针对现有多能源电力调度方法难以兼顾经济性和低碳性的问题,提出一种考虑碳交易和绿证交易的多能源电力调度方法,通过高耗能企业消纳受阻风光的双层模型。上层模型以碳排放量交易成本、绿证交易成本和系统运行成本最低为目标构建,下层模型以高耗能企业利润增量最大为目标构建。通过改进的哈里斯鹰算法求解上层模型,将得到的数据传递给下层模型,在通过改进粒子群算法求解下层模型。通过算例分析验证所提多能源电力调度方法的可行性。结果表明,所提方法可以较好地兼顾经济性和低碳性,系统总成本 335.08 万元,系统碳排放 1 358.02 t。可为双碳目标实现提供一定的助力。

关键词: 双碳目标; 电力调度; 哈里斯鹰算法; 粒子群算法; 高耗能企业

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.03.002

中图分类号: TM93

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)03-0014-08

Research on multi-energy power dispatching method based on carbon trading and green certificate trading

WU Ruobing¹, YANG Ming², YANG Zhengyu³

(1. Information Center, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China. 2. Metrology Center, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China. 3. Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: The proposal of the carbon peaking and carbon neutrality target has promoted the transition of power dispatching to low-carbon. In response to the problem that existing multi energy power dispatching methods are difficult to balance economic and low-carbon aspects, a multi-energy power dispatching method is proposed that considers carbon trading and green certificate trading, using a dual layer model for high energy consuming enterprises to absorb obstructed wind and solar energy. The upper level model is constructed with the goal of minimizing carbon emission trading costs, green certificate trading costs, and system operating costs, while the lower level model is constructed with the goal of maximizing profit increment for high energy consuming enterprises. The upper level model is solved through the improved Harris Eagle algorithm, and transfers the obtained data to the lower level model, and solves the lower level model through the improved particle swarm algorithm. The feasibility of the proposed multi energy power dispatching method is verified through case analysis. The results show that the proposed method can effectively balance economic and low-carbon aspects, with a total system cost of 3.3508 million yuan and a carbon emission of 1 358.02 tons, which can provide certain assistance for achieving the dual carbon goal.

Keywords: carbon peaking and carbon neutrality target, power dispatching, Harris Eagle algorithm, particle swarm optimization algorithm, high energy consuming enterprise

0 引言

双碳目标的提出,促进了电力系统朝着清洁、高效和低碳转型,从传统煤电逐渐向风电、光伏等

低碳能源转变^[1]。随着可再生能源发电占有率的不断提高,其随机性和波动性对系统安全、经济运行都有较大影响^[2]。为了提高可再生能源的消纳比例,实现能源的高效利用,对多能源电力调度方法进行研究具有重要的实际意义^[3]。

基金项目: 南方电网科技项目(YDKJ23030061)

目前,国内外对多能源电力调度方法进行了较为深入的研究,主要集中在建模和求解方法上。建模主要集中在单层模型和双层模型,求解方法主要集中在智能优化算法和模型求解器上^[4-6]。在文献[7]中,针对多能源电力调度中的源-荷不确定性,提出了考虑源-荷不确定性及条件风险价值的电力系统优化调度模型。结果表明,所提方法能有效降低系统不确定风险成本,提高了运行的低碳性和经济性。但考虑了不确定性因素,导致模型复杂度较高,求解较为困难。在文献[8]中,针对多能源电力优化调度模型求解困难等问题,提出一种用于多能源电力系统优化调度的分层约束强化学习方法。结果表明,所提方法能够有效应对源荷的随机性,并能自适应、快速地确定各能源功率交互,与常规方法相比,避免了迭代过程,实时提供调度结果。但需要根据具体问题设计层次结构和约束条件,适应性较差。在文献[9]中,针对大量新能源接入的不确定性,提出了一种双层优化调度模型用于多能源电力系统调度。结果表明,所提方法能有效提高系统的调频能力和储能利用率。虽然系统运行成本略有增加,但系统整体利润提高 3.9%。但通过 CPLEX 求解器求解模型,灵活性较差。在文献[10]中,针对大量新能源接入的出力随机性和波动性,提出了一种考虑准线需求响应的高比例新能源电力系统调度模型。结果表明,所提方法能很好地抑制不确定性,提高了新能源消纳能力。但仅考虑了系统的经济性,未对低碳性进行考虑,适应性有待进一步提高。

在上述文献研究的基础上,文章提出一种兼顾经济性和低碳性的多能源优化调度方法,考虑碳交易和绿证交易,通过高耗能企业消纳受阻风光的双层模型。上层模型以碳排放量交易成本、绿证交易成本和系统运行成本最低为目标构建,下层模型以高耗能企业利润增量最大为目标构建。改进的哈里斯鹰算法用于求解上层模型,改进的粒子群算法用于求解下层模型。通过算例验证所提方法的可行性。

1 考虑碳交易和绿证的电力调度系统结构

图 1 所示考虑碳交易和绿证交易的多能源电力调度系统结构。主要由绿色电力交易中心、碳排放量交易中心、电力调度中心和多能源电力系统组成。碳排放量交易中心是根据国家碳排放总额,按一定规则将碳排放量分配给企业,企业根据自己排放量购买或出售。绿证交易中心是一个为绿色电

力生产者和消费者提供电子证书交易服务的在线平台。电力调度中心是系统核心模块,主要完成电力调度与运行管理、应急响应和故障处理等功能。多能源电力系统由风电场、光伏电站、储能设备、火电机组等多组成,完成电力的生产、运输等^[11-12]。

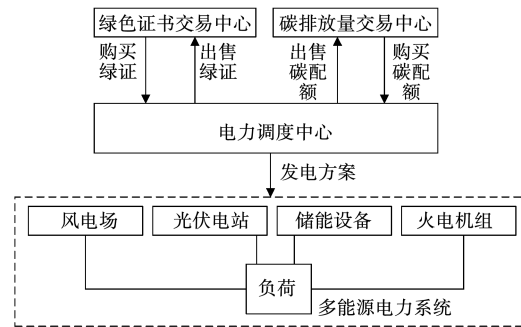


图 1 多能源电力调度系统结构

Fig. 1 Multi-energy power dispatching system structure

2 电力调度模型

在众多可再生能源接入电网的背景下,文中提出了一种考虑碳交易和绿证交易的多能源优化调度方法,通过高耗能企业消除受阻风光的双层模型。上层模型以碳排放量交易成本、绿证交易成本和系统运行成本最低为目标构建,下层模型以高耗能企业利润增量最大为目标构建^[13-15]。

2.1 上层模型

上层优化模型包括风电场、光伏电站、储能设备、火电机组和一般负荷,为促进风光消纳,上层模型以碳排放交易成本、绿证交易成本和系统运行成本最低为目标构建。

1) 碳排放量交易成本

碳排放交易成本为企业排放量超过配额时,需在碳市场购买配额,低于配额时,可出售获利,碳排放交易成本 f_1 如式(1)所示:

$$f_1 = \gamma_{\text{pre}} \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} (\gamma_{1,i} (P_{g,i}^t)^2 + \gamma_{2,i} P_{g,i}^t + \gamma_{3,i}) - \gamma_{\text{quo}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} P_{g,i}^t \right] \quad (1)$$

式中: γ_{pre} 和 γ_{quo} 分别为碳排放配额和交易价格; $P_{g,i}^t$ 为火电机组 i 在 t 时段的输出功率; $\gamma_{1,i}$ 、 $\gamma_{2,i}$ 、 $\gamma_{3,i}$ 为火电机组 i 的碳排放系数; N_g 为火电机组数; T 为调度周期。

2) 绿证交易成本

绿证交易成本是发电企业与用户之间进行有

偿转让的过程。绿证交易成本 f_2 如式(2)所示:

$$f_2 = \begin{cases} \lambda_{\text{buy}}(\varphi_{\text{quo}} \sum_{t=1}^T P_{\text{load}}^t - \sum_{t=1}^T P_{\text{green}}^t)\Delta t, & \sum_{t=1}^T P_{\text{green}}^t < \varphi_{\text{quo}} \sum_{t=1}^T P_{\text{load}}^t \\ \lambda_{\text{sale}}(\varphi_{\text{quo}} \sum_{t=1}^T P_{\text{load}}^t - \sum_{t=1}^T P_{\text{green}}^t)\Delta t, & \sum_{t=1}^T P_{\text{green}}^t \geq \varphi_{\text{quo}} \sum_{t=1}^T P_{\text{load}}^t \end{cases} \quad (2)$$

式中: λ_{buy} 和 λ_{sale} 分别为购买和出售绿证价格; φ_{quo} 为可再生能源配额系数; P_{green}^t 为 t 时刻可再生能源的消纳量; P_{load}^t 为 t 时刻日前预测负荷; Δt 为调度时间间隔。

3) 系统运行成本

系统运行成本是调度时间内风电场、光伏电站、储能设备、火电机组的运行成本, 系统运行成本 f_3 如式(3)所示:

$$f_3 = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} [a_i + b_i P_{g,i}^t + c_i (P_{g,i}^t)^2] + \rho_w \sum_{j=1}^T \sum_{j=1}^{N_w} P_{w,j}^t + \rho_{\text{pv}} \sum_{k=1}^T \sum_{k=1}^{N_{\text{pv}}} P_{\text{pv},k}^t + \rho_s \sum_{i=1}^T |P_s^t| \quad (3)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 分别为第 i 个火电机组的燃料费用系数; ρ_w 、 ρ_{pv} 、 ρ_s 分别为风电、光伏和储能运行成本系数。

由于上述目标都是成本, 所以直接对三个目标进行加法处理, 总成本 F 最低如式(4)所示:

$$\min F = f_1 + f_2 + f_3 \quad (4)$$

上层模型求取最优值需要一些条件进行约束, 文中选择的主要约束为: 风电场输出功率约束、光伏电站输出功率约束、储能设备储能约束和荷电状态约束、火电机组输出功率约束等, 如式(5)所示:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{w,j}^t \leq P_{\text{wpre},j}^t \\ 0 \leq P_{\text{pv},k}^t \leq P_{\text{pvpre},k}^t \\ E_{\text{min}} \leq E_t \leq E_{\text{max}} \\ SOC_{\text{min}} \leq SOC_t \leq SOC_{\text{max}} \\ P_{g,i,\text{min}}^t \leq P_{g,i}^t \leq P_{g,i,\text{max}}^t \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{w,j}^t$ 和 $P_{\text{wpre},j}^t$ 分别为 t 时段风电场 j 的输出功率和最大输出功率; $P_{\text{pv},k}^t$ 和 $P_{\text{pvpre},k}^t$ 分别为 t 时段光伏电站 k 的输出功率和最大输出功率; E_t 、 E_{min} 、 E_{max} 分别为 t 时段储能、最小储能和最大储能; SOC_t 、 SOC_{min} 、 SOC_{max} 分别为 t 时段荷电状态、荷电状态最小值和荷电状态最大值; $P_{g,i,\text{min}}^t$ 和 $P_{g,i,\text{max}}^t$ 分别为 t 时段火电机组 i 的最小和最大输出功率。

2.2 下层模型

下层模型以高耗能企业为研究对象, 企业利润

增量为优化目标, 如式(6)所示:

$$\max \Delta P = \Delta S - C_G \quad (6)$$

式中: ΔP 为高耗能企业的利润增量; ΔS 为销售额增加量; C_G 为生产成本(原材料、电力、人工和设备折旧等)。

上层模型以高耗能企业为研究对象, 选择主要约束为: 容量约束和时间约束等, 如式(7)所示:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{G,l}^t \leq P_{G_{\text{max}},l}^t \\ 0 \leq T_{G,l,\text{on}}^t \leq T_{G_{\text{max}},l,\text{on}}^t \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{G,l}^t$ 和 $P_{G_{\text{max}},l}^t$ 分别为 t 时段高耗能企业调节容量和容量的最大值; $T_{G,l,\text{on}}^t$ 和 $T_{G_{\text{max}},l,\text{on}}^t$ 分别为 t 时段高耗能企业调节时间和最大值。

3 模型求解

上层模型以碳排放量交易成本、绿证交易成本和系统运行成本最低为目标构建, 求解较为复杂。哈里斯鹰算法在收敛精度和速度方面优势明显, 适用于求解复杂模型, 通过改进的哈里斯鹰算法求解上层模型^[16-17]。下层模型以高耗能企业利润增量最大为目标, 粒子群算法作为目前应用最广泛的求解算法, 具有收敛快和易于实现等优点, 通过改进的粒子群算法求解下层模型^[18-20]。

3.1 上层求解算法

有学者提出了哈里斯鹰算法, 该算法具有全局搜索能力强和调节参数少等优点, 主要包括三个部分: 全局搜索、转换过程和局部开发^[21]。

1) 全局搜索

这一过程通过两种策略搜索猎物, 由式(8)和(9)表示:

$$x_i^{t+1} = x_{\text{rand}}^t - r_1 |x_{\text{rand}}^t - 2r_2 x_i^t|, \quad q \geq 0.5 \quad (8)$$

$$x_i^{t+1} = (x_{\text{rabbit}}^t - x_m^t) - r_3 (L_b + r_4 (U_b - L_b)), \quad q < 0.5 \quad (9)$$

式中: x_i^t 和 x_{rand}^t 分别为个体 i 和随机个体在迭代 t 次后的位置; r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 为 0-1 的随机数; x_m^t 为迭代 t 次后的平均位置; x_{rabbit}^t 迭代 t 次后的最优位置; U_b 和 L_b 分别为搜索上限和下限。

2) 转换过程

这一过程根据逃逸能量在全局和局部间转换, 逃逸能量如式(10)表示:

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (10)$$

式中: E_0 为猎物初始逃逸能量; E 为猎物逃离追捕的能量; T 为最大迭代次数。

3) 局部开发

这一过程根据逃逸能量和随机数 r 选择策略。软包围 ($0.5 \leq |E| < 1, r \geq 0.5$)、硬包围 ($|E| < 0.5, r \geq 0.5$)、渐进快速俯冲硬包围 ($0.5 \leq |E| < 1, r < 0.5$)、渐进快速俯冲软包围策略 ($|E| < 0.5, r < 0.5$)。

哈里斯鹰算法通过猎物能量 E 和因子 r 调节哈里斯鹰和猎物之间的四种包围捕捉机制,实现优化问题的求解。

由于算法初始种群随机产生,存在易聚集和分布不均匀等问题,导致求解质量差和易陷入局部极值。文章通过反向学习机制和高斯差分变异策略对其进行优化。

1) 反向学习机制优化

在 d 维搜索空间中,初始解个体为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 其反向解为 $x'_i = (x'_{i1}, x'_{i2}, \dots, x'_{id})$,如式(11)所示:

$$x'_i = r(a + b) - x_i \quad (11)$$

式中: r 为随机数, $(0, 1)$; a 和 b 为个体的最大值和最小值。

通过生成反向种群,将反向种群中适应度值高的个体初始化为种群,有效地提高了解的质量。

2) 高斯差分突变策略

对当前的最优个体进行高斯差分变异,选择最优者进入下一代,如式(12)所示:

$$x_{i+1} = p_1 \cdot s_1(x_b - x_i) + p_2 \cdot s_2(x_r - x_i) \quad (12)$$

式中: p_1 和 p_2 为权重系数; s_1 和 s_2 为高斯系数; x_i 、 x_r 、 x_b 分别为当前、最优和随机个体。

初期进行变异扰动,加快收敛速度。后期进行变异扰动,降低陷入极值的可能性,避免早熟。

3.2 下层求解算法

粒子群优化算法是针对多目标、非线性、多变量问题的全局进化算法^[22]。通过“粒子”作为优化问题的解,适应性决定粒子的优势,具体的搜索过程如式(13)和式(14)所示:

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (pbest_i(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (gbest - x_i(t)) \quad (13)$$

$$x(t+1)_i = x_i(t) + v_i(t) \quad (14)$$

式中: c_1 和 c_2 为学习因子; $x_i(t)$ 和 $v_i(t)$ 分别为位置和速度(粒子 i 迭代 t 次后); ω 为惯性权重,值越大,粒子搜索能力越强; r_1 和 r_2 为随机数; $pbest$ 和 $gbest$ 分别为个体最优和全局最优。

但算法后期收敛慢,易陷入局部极值。针对这一问题,提出了一种改进的粒子群算法。

1) 惯性权重的优化

ω 越大,全局搜索越强, ω 越小,局部搜索越强。 ω 为固定值,存在较大缺陷。因此,引入可变惯性权重,在前期增强全局搜索(ω 较大),后期加强局部搜索(ω 较小),如式(15)所示:

$$\omega = \lambda \cdot \frac{|pbest_i(t) - gbest|}{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (pbest_i(t) - gbest)} \quad (15)$$

式中: λ 为权重因子,经过试验取 0.01。 N 为粒子数; t 为当前迭代次数; $pbest_i(t)$ 和 $gbest$ 分别为当前个体最优和全局最优。

2) 学习因子优化

文中通过线性递增和递减策略优化学习因子,早期较大 c_1 和较小 c_2 ,加强全局搜索,不易陷入局部极值,后期较大 c_2 ,较小 c_1 ,加强局部搜索,提高最优解的准确性,如式(16)和式(17)所示:

$$c_1(t+1) = c_{1max} - (c_{1max} - c_{1min}) \frac{t}{t_m} \quad (16)$$

$$c_2(t+1) = c_{2max} + (c_{2max} - c_{2min}) \frac{t}{t_m} \quad (17)$$

式中: t_m 为最大迭代次数; c_{1max} 、 c_{2max} 为最大学习因子; c_{1min} 、 c_{2min} 为最小学习因子; t 为粒子当前迭代次数。

3.3 模型求解流程

上层模型以碳排放量交易成本、绿证交易成本和系统运行成本最低为目标构建,通过改进的哈里斯鹰算法求解上层模型,计算各单元的输出功率和风光受阻量,并将数据传递给下层优化模型。下层模型以高耗能企业利润增量最大为目标,通过改进粒子群算法求解下层模型。模型求解步骤如下:

步骤 1:输入风电、光伏、负荷预测数据以及储能设备和火电机组数据;

步骤 2:初始化模型参数;

步骤 3:通过改进的哈里斯鹰算法求解上层模型;

步骤 4:达到迭代次数输出目标值,通过目标值计算各单元的输出功率和风光受阻量;

步骤 5:通过改进的粒子群算法求解下层模型;

步骤 6:达到迭代次数输出最优调度结果。

图 2 所示模型求解流程。

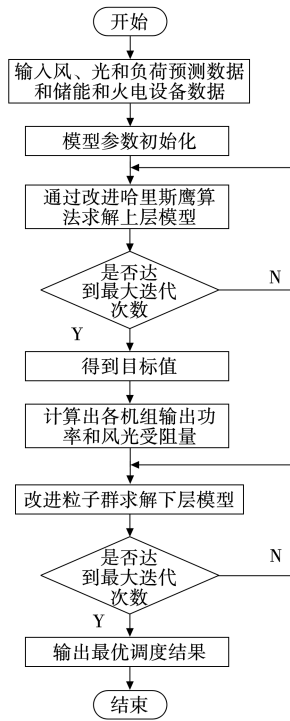


图 2 模型求解流程

Fig. 2 Model solution process

4 算例结果与分析

4.1 算例参数

为验证考虑碳交易和绿证交易的多能源电力调度模型性能,采用某区域新能源基地进行了算例分析,系统由风电场(1个)、光伏电站(1个)、储能设备(1个)、火电机组(4个)、电解铝和碳化硅负荷(各1个)。系统参数如表1所示。

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

参数	数值	单位
风电成本系数	30	—
光伏成本系数	40	—
储能最大充电功率	9	MW
储能最大放电功率	12	MW
火电 1-4 最大出力	470 - 470 - 340 - 340	MW
火电 1-4 号燃烧费用	0.0020 - 13.15 - 750/	—
	0.0012 - 12.31 - 800	—
	0.0023 - 15.55 - 600/	—
	0.0031 - 16323 - 500	—
火电 1-4 碳排放量系数	0.000083 - 0.74 - 20/	—
	0.000082 - 0.72 - 20	—
	0.000097 - 0.82 - 13.57/	—
	0.000094 - 0.79 - 15.81	—
电解铝和碳化硅额定容量	300 - 200	MW
绿色证书价格	55	元/MWh
碳排放权价格	60	元/t

提出了一种考虑碳排放量和绿证的多能源电力调度模型,通过多次计算,选择优化效果好的参数作为算法参数,算法参数如表 2 所示。实际的风、光、负荷出力情况如图 3 所示(实际应用中该值为预测值)。

表 2 算法参数

Tab. 2 Algorithm parameters

参数	数值
粒子种群规模	100
迭代次数	50
惯性权重	[0.4, 0.9]
学习因子	[0, 2]
哈里斯鹰种群规模	100
最大迭代次数	50
逃脱概率	0.5
跳跃强度	0 - 2
高斯权重系数	0.5

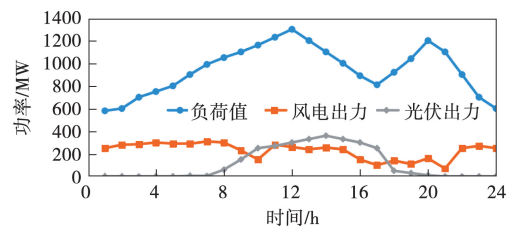


图 3 实际的风、光、负荷出力情况

Fig. 3 Actual wind, light and load output conditions

4.2 算例分析

为了验证在所提上层模型的有效性,对四种场景进行对比分析。场景 1:以碳交易成本、绿证交易成本和系统运行成本最低为目标构建模型,场景 2:以碳交易成本和系统运行成本最低为目标构建模型,场景 3:以绿证交易成本和系统运行成本最低为目标构建模型,场景 4:以系统运行成本最低为目标构建模型。通过求解上述场景,不同场景的优化调度结果如表 3 所示。

表 3 不同场景的优化调度结果

Tab. 3 Optimized dispatching results for different scenarios

场景	1	2	3	4
弃风弃光量/MW	547.22	587.12	558.85	615.54
碳排放量/t	1 358.02	1 362.18	1 375.42	1 405.11
碳交易成本/万元	1.08	1.04	0	0
绿证交易成本/万元	13.03	0	12.97	0
系统总成本/万元	336.19	349.30	338.65	351.14

从表 3 可以看出,在场景 2 中考虑碳交易,与不考虑碳交易和绿证的场景 4 相比,弃风弃光量减少了 28.42 MW,碳排放量减少了 42.93 t,系统总成本减少了 1.84 万元。在场景 3 考虑绿证交易,与不考虑碳交易和绿证的场景 4 相比,弃风弃光量减少了 57.312 MW,碳排放量减少了 29.69 t,系统总成本减少了 12.49 万元。考虑碳交易和绿证交易的场景 1,与不考虑碳交易和绿证的场景 4 相比,弃风弃光量减少了 68.32 MW,碳排放量减少了 47.09 t,系统总成本减少了 14.95 万元。说明考虑绿证可以降低弃风弃光量,考虑碳交易可以降低碳排放量,同时考虑碳交易和绿证交易可以有效降低碳排放量、弃风弃光量和系统总成本,使电网运行更加经济和低碳。

为了验证文中所提改进哈里斯鹰算法具有很好的求解能力,与优化前的哈里斯鹰算法和鲸鱼算法进行对比分析,不同方法随迭代次数变化的适应度值如图 4 所示。

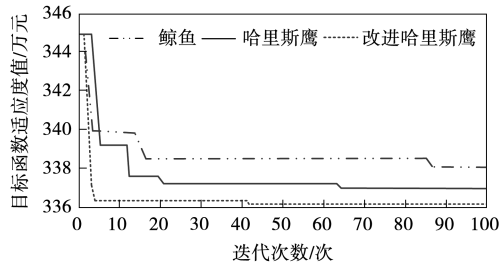


图 4 不同方法随迭代次数变化的适应度值
Fig. 4 Adaptation values changing with iteration times by different methods

从图 4 可以看出,文中改进哈里斯鹰算法在迭代 41 次左右时收敛,个体最优适应度值最低,为 336.19 万元。优化前哈里斯鹰算法在迭代 65 次左右时收敛,个体最优适应值最低,为 337.15 万元。鲸鱼算法在迭代 85 次左右时收敛,个体最优适应值最低,为 338.32 万元。说明文章通过两个方面优化哈里斯塔卡算法有效地提高了收敛速度和解的质量。不同算法优化调度结果如表 4 所示。

表 4 不同算法的优化调度结果
Tab. 4 Optimization scheduling results of different algorithms

算法	鲸鱼算法	哈里斯鹰算法	改进哈里斯鹰算法
弃风弃光量/MW	617.65	587.83	547.22
碳排放量/t	1 382.23	1 370.15	1 358.02
系统总成本/万元	338.32	337.15	336.19

由表 4 可以看出,文中改进的哈里斯鹰算法与优化前哈里斯鹰算法相比,弃风弃光量减少 40.61 MW,碳排放量减少 12.13 t,系统总成本减少 0.96 万元。与鲸鱼优化算法相比,弃风弃光量减少 70.43 MW,碳排放量减少 24.21 t,系统总成本减少 2.13 万元。说明哈里斯鹰算法对求解复杂模型具有很强的适应性,也验证了文章改进方法的有效性。上层模型最优调度时各单元的出力状况如图 5 所示。

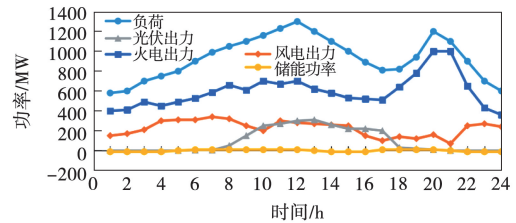


图 5 上层模型最优调度时各机组出力情况
Fig. 5 Optimal dispatching of upper layer model when each unit is in operation

从图 5 可以看出,输出满足功率平衡。在负载低谷时对储能进行充电,在负载峰值时对储能进行放电。

为了验证所提双层模型的优越性,将双层模型调度结果与上层模型调度结果进行对比分析。两种情况优化调度结果如表 5 所示。

表 5 两种情况优化调度结果
Tab. 5 Optimized scheduling results under two conditions

场景	上层模型	双层模型
弃风弃光量/MW	547.22	221.23
系统总成本/万元	336.19	335.08
高耗能企业调节量/MW	0	325.99
企业利润增量/万元	0	1.11

从表 5 可以看出,高耗能企业参与风光消纳后,弃风弃光总量减少 326.99 MW,且高耗能企业通过风光消纳,企业利润增量 1.1 万元,系统总成本降低。

为了进一步验证文中所提方法的优越性,与文献[23]CPLEX 求解器求解双层模型进行对比分析。不同求解方法调度结果如表 6 所示。

由表 6 可以看出,与文献[23]方法相比,文中方法在经济性和低碳性上更占优势,系统总成本降低 0.97 万元,碳排放量降低 1.1 t。进一步说明文中方法更具经济性和低碳性。

表 6 不同求解方法调度结果

Tab. 6 Scheduling results of different solution methods

求解算法	文献[23]方法	文中方法
弃风弃光量/MW	223.12	221.23
碳排放量/t	1 359.12	1 358.02
碳交易成本/万元	1.02	1.08
绿证交易成本/万元	12.60	13.03
系统总成本/万元	336.05	335.08
高耗能企业调节量/MW	324.10	326.99
企业利润增量/万元	1.10	1.11

5 结 论

提出了一种考虑碳交易和绿证交易的双层模型用于多能源电力调度。结合哈里斯鹰算法和粒子群算法求解模型。结果表明,所提方法提高了系统的灵活性和可再生能源的消纳能力,从源与荷两个层面构建模型,有效兼顾了经济性和低碳性。与常规方法相比,系统总成本降低 0.97 万元,碳排放降低 1.1 t,为“双碳”目标实现提供了一定的助力。但也存在一些不足之处,如仅对调度方法进行研究,风、光、负荷采用的实际值,实际应用中均为预测值,预测误差对调度结果影响较大,后期在不断完善模型的基础上,会对预测方法进行深入研究,不断完善整个系统。

参 考 文 献

[1] 张秋艳, 谢俊, 潘学萍, 等. 考虑动态频率响应的风光水互补发电短期优化调度模型[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 516-524.
ZHANG Qiuyan, XIE Jun, PAN Xueping, et al. A short term optimal dispatch model for wind water complementary power generation considering dynamic frequency response [J]. Journal of Solar Energy, 2023, 44(1): 516-524.

[2] 王涛, 王廷涛, 刘芮, 等. 计及动态频率响应约束的高比例风电电力系统机组组合模型[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3463-3479.
WANG Tao, WANG Tingtao, LIU Rui, et al. A high ratio wind power system unit combination model considering dynamic frequency response constraints [J]. High Voltage Technology, 2021, 47(10): 3463-3479

[3] 杜先波, 陶苏滕, 刘述波, 等. 综合能源系统日前-日内多目标优化控制策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 109-117.
DU Xianbo, TAO Sumeng, LIU Shubo, et al. Multi objective optimization control strategy for integrated energy systems in the days before and within [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 109-117.

[4] ZHANG Q Y, XIE J, PAN X P, et al. A short-term opti-

mal scheduling model for wind-solar-hydro-thermal complementary generation system considering dynamic frequency response [J]. IEEE Access, 2021, 9: 142768-1427781.

[5] 梁海平, 石皓岩, 王铁强, 等. 考虑韧性提升的输电网灾前预防检修多目标多阶段优化 [J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 130-137.
LIANG Haiping, SHI Haoyan, WANG Tieqiang, et al. Multi-objective and multi-stage optimization of pre-disaster preventive maintenance of transmission network considering resilience improvement [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 130-137.

[6] 刘海涛, 仲聪, 马佳伊, 等. 考虑条件风险价值和阶梯碳交易的综合能源系统优化调度 [J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 100-108.
LIU Haitao, ZHONG Cong, MA Jiayi, et al. Optimal dispatching of integrated energy system considering conditional value at risk and ladder carbon trading [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 100-108.

[7] 刘可真, 陈明, 代莹皓, 等. 考虑源-荷不确定性及条件风险价值的电力系统优化调度 [J]. 电力科学与工程, 2023, 39(10): 1-11.
LIU Kezhen, CHEN Ming, DAI Yinghao, et al. Optimal scheduling of power systems considering source load uncertainty and conditional riskvalue [J]. Electric Power Science and Engineering, 2023, 39(10): 1-11.

[8] 董雷, 杨子民, 乔骥, 等. 基于分层约束强化学习的综合能源多微网系统优化调度 [J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1436-1453.
DONG Lei, YANG Zimin, QIAO Ji, et al. Optimization scheduling of integrated energy multi microgrid systems based on hierarchical constraint reinforcement learning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1436-1453.

[9] 林俐, 丁文敏, 唐传伟, 等. 计及储能调频能力的高比例新能源电力系统优化调度 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 1-12 [2024-04-30]. <https://link.cnki.net/urlid/13.1212.tm.20240315.1120.002>.
LIN Li, DING Wenmin, TANG Chuanwei, et al. Optimization scheduling degree of high proportion new energy power system considering energy storage frequency regulation capacity [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition). 1-12 [2024-04-30]. <https://link.cnki.net/urlid/13.1212.tm.20240315.1120.002>.

[10] 王长浩, 高红均, 周文毅, 等. 考虑准线需求响应的高比例新能源电力系统调度优化 [J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4427-4435.
WANG Changhao, GAO Hongjun, ZHOU Wenyi, et al. Optimization of high proportional new energy power system dispatch considering direct line demand response [J]. Grid Technology, 2024, 48(11): 4427-4435.

[11] 刘凤魁, 邓春宇, 王晓蓉, 等. 基于改进快速密度峰值聚类算法的电力大数据异常值检测 [J]. 科学技术与

- 工程, 2017, 15(6): 36-41.
- LIU Fengkui, DENG Chunyu, WANG Xiaorong, et al. Outlier detection of power big data based on improved fast density peak clustering algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 15(6): 36-41.
- [12] 陆旦宏, 范文尧, 杨婷, 等. 基于生成对抗 Transformer 的电力负荷数据异常检测[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 157-164.
- LU Danhong, FAN Wenyao, YANG Ting, et al. Anomaly detection of power load data based on Transformer and generative adversarial networks[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 157-164.
- [13] 李新鹏, 高欣, 阎博, 等. 基于孤立森林算法的电力调度流数据异常检测方法[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1447-1456.
- LI Xinpeng, GAO Xin, YAN Bo, et al. Anomaly detection method for power dispatch flow data based on isolated forest algorithm[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1447-1456.
- [14] 陈荃, 张丹宏, 郑淇源, 等. 电-碳-绿证市场耦合下发商报价与出清双层优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(1): 121-133.
- CHEN Quan, ZHANG Danhong, ZHENG Qiyuan, et al. Bi-level optimization strategy for biddings and clearing of power suppliers under the coupling of electricity, carbon, and green certificate market[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 121-133.
- [15] 王钦, 陈业夫, 蔡新雷, 等. 考虑柔性负荷和阶梯型碳交易的低碳经济优化调度策略[J]. 广东电力, 2024, 37(1): 76-85.
- WANG Qin, CHEN Yefu, CAI Xinlei, et al. Optimization scheduling strategy for low-carbon economy considering flexible loads and tiered carbon trading[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(1): 76-85.
- [16] 庞思勉, 郑子萱, 肖先勇, 等. 计及多粒度用电属性的热力负荷协同优化调控方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 103-112.
- PANG Simian, ZHENG Zixuan, XIAO Xianyong, et al. Collaborative optimization and control method for thermal load considering multi granularity electricity consumption attributes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 103-112.
- [17] 刘青, 黄玉河, 王宇, 等. 基于电磁时间反演 P 范数判据的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 74-82.
- LIU Qing, HUANG Yuhe, WANG Yu, et al. Distribution network fault location based on an electromagnetic time reversal P-parametric criterion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 74-82.
- [18] 孙庆凯, 王小君, 张义志, 等. 基于 LSTM 和多任务学习的综合能源系统多元负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 63-70.
- SUN Qingkai, WANG Xiaojun, ZHANG Yizhi, et al. Multivariate load forecasting for integrated energy systems based on LSTM and multitask learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 63-70.
- [19] 金耀, 许健. 基于 PSCAD 的独立光储微电网雷电感应过电压防护研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(1): 59-67.
- JIN Yao, XU Jian. Lightning induced overvoltage protection for an independent microgrid equipped with the photovoltaic and energy storage system based on PSCAD[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(1): 59-67.
- [20] 黄代雄, 汪志军, 袁俑斌, 等. 考虑多源协同的主动配电网故障恢复策略[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 210-215, 222.
- HUANG Daixiong, WANG Zhijun, YUAN Yongbin, et al. Fault recovery strategy considering multi-source collaborative active distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 210-215, 222.
- [21] 李军徽, 马得轩, 朱星旭, 等. 基于 ADMM 算法的主动配电网分层优化经济调度[J]. 电力建设, 2022, 43(8): 76-86.
- LI Junhui, MA Dexuan, ZHU Xingxu, et al. Active distribution network layered optimization economic scheduling based on ADMM algorithm[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(8): 76-86.
- [22] 龚逊东, 郭维嘉, 杨晨, 等. 基于动态孤岛的主动配电网多阶段故障恢复策略[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 158-166.
- GONG Xundong, GUO Weijia, YANG Chen, et al. Multi-stage fault recovery strategy for active distribution networks based on dynamic islanding[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 158-166.
- [23] 张翰林, 汪睿哲, 刘友波, 等. 考虑源荷碳势耦合的电力系统双层低碳经济调度[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 28-42.
- ZHANG Hanlin, WANG Ruizhe, LIU Youbo, et al. Double layer low-carbon economic dispatch of power systems considering source load carbon potential coupling [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 28-42.

收稿日期: 2024-05-14; 修回日期: 2024-12-20

作者简介:

吴若冰(1990—),男,通信作者,工程师,研究方向为电力营销数字化技术支撑体系,电力大数据应用及数据分析等。E-mail:wuruob1990@163.com

杨茗(1989—),女,工程师,研究方向为计量自动化、负荷控制、电能量数据管理等。E-mail:mingyiqingshang@126.com

杨铮宇(1991—),男,硕士,工程师,研究方向为市场营销、电力市场化、数字化等。E-mail:zhihangzc999@163.com

(编辑 田春雨)