

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905420

含低负荷场景低碳多源协调调度*

崔岱^{1,2}, 葛维春^{1,2}, 赵文广³, 冯占稳², 朱伟峰²

(1. 沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110870; 2. 国网辽宁省电力有限公司 沈阳 110006;
3. 东北电力大学电气工程学院 吉林 132012)

摘要:温室效应导致全球持续升温,巨大碳排放量导致地球已不堪重负,如何降低碳排放成为目前亟待解决的问题。当风电出力与火电机组最小出力之和大于负荷量,只能通过储能、储热装置或弃风来达到功率平衡,此时可定义为低负荷运行状态。在低负荷时段,负荷消纳风电难、储能成本运行高。首先,考虑火电机组深调对发电成本和碳排放量的影响,建立了火电机组分阶段出力模型,将碳交易机制引入系统的调度模型中,构建阶梯型碳交易成本的计算模型;其次,以碳排放量和发电成本最小为优化目标,综合考虑系统的各种约束条件,建立了基于多目标的含低负荷场景低碳多源协调调度模型;然后,采用改进萤火虫算法,得到最优调度方案;最后,以带10个风电场的系统为算例,采用3种不同对比实验证明,所提方法可有效降低碳排放量,提高了系统运行经济性。所提方法分析了风电并网渗透率对系统运行方式的影响,表明含低负荷场景低碳多源协调调度与风电并网渗透率密切相关。

关键词:碳排放;弃风;低负荷场景;火电机组深调;碳交易

中图分类号: TM734 TH70 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Low-carbon multi-source coordinated dispatch in the low-load scenario

Cui Dai^{1,2}, Ge Weichun^{1,2}, Zhao Wenguang³, Feng Zhanwen², Zhu Weifeng²

(1. Department of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang 110006, China; 3. Department of
Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Greenhouse effect results in the global warming, and huge carbon emissions make the earth overwhelmed. How to reduce carbon emissions has become an urgent problem to be addressed. When the sum of wind power output and thermal power unit minimum output is larger than the load, the power balance can only be achieved through energy storage, heat storage device or abandoned wind. It can be defined as low load operating condition. During the low load period, it is difficult to absorb wind power and high energy storage cost. Firstly, the influence of deep regulation of thermal power units on generation cost and carbon emissions is considered. In this way, a stage output model of thermal power components is formulated. Carbon trading mechanism is introduced into the dispatching model of the system, and a step-by-step carbon trading cost calculation model can be formulated. Secondly, the minimum carbon emissions and generation costs are selected as the optimization objectives. Many constraints of the system are considered comprehensively. A low-carbon multi-source coordinated dispatching model with low load scenarios based on multi-objective is formulated. Then, the improved firefly algorithm is used to achieve the optimal dispatching scheme. Finally, taking a system with 10 wind farms as an example, three different experiments show that the proposed method can effectively reduce carbon emissions and improve the operating economy of the system. The influence of wind power grid-connected permeability on system operating mode is also analyzed, it shows that low-carbon multi-source coordinated dispatch in the low-load scenario is closely related to the penetration of wind power grid-connected.

Keywords: carbon emissions; abandoned wind; low-load scenario; deep regulation of thermal power units; carbon trading

0 引言

由国家能源局发布的相关数据显示,去年全国的火力发电装机容量占总装机容量的比重为 60.2%,对化石燃料仍然十分依赖,这就不可避免地要向环境中排出大量的 CO₂。电力系统在追求经济发展的同时,应该把可持续发展放在首要位置。在系统运行过程中往往存在着风电出力与火电机组最小出力之和大于负荷量,只能通过储能、储热装置或弃风来达到功率平衡的时段。此时可定义为低负荷运行状态。在低负荷时段,存在负荷消纳风电难、调用储能成本高等问题。在这种背景下,含低负荷场景低碳多源协调调度逐渐成为重点关注的问题。

国内外学者对含低负荷场景低碳多源协调调度的研究已取得了一些成果。文献[1]考虑了不确定性对调度的影响,通过碳交易的方式去平衡经济因素和环境因素对调度的影响。文献[2]将风电作为约束条件,通过价格因子,将双目标转化成单目标,建立了一个考虑碳排放和经济性的目标函数。文献[3]构造风能随机模型用于描述风电不确定性,引入了惩罚因子和备用因子,能够制约风电出力计划值与实际值之间的偏差。文献[4]考虑到风电装机容量的增加,提出了电力系统和天然气约束下的低碳经济调度模型。文献[5-6]在现有经济环境调度的基础上,引入了构建风电系统低碳调度模型的“能源环境效率”概念。采用滚动自回归移动平均模型对未来 24 h 的风速进行预测,减少了风速波动给电力系统调度带来的不利影响。采用模糊满意度最大化方法将低碳调度模型中的多目标决策问题转化为单一的非线性决策问题。文献[7]提出一种同时考虑碳价以及风电出力不确定性的经济排放调度模型。在模型中分别在经济和环境两方面,考虑了消除风电不确定性的不利因素。文献[8]分析多种能源的碳排放特性、碳交易的相关内容以及碳捕集电厂的运行特点,建立了火力发电成本、碳捕集电厂运行成本及碳交易成本最低为目标的多目标调度模型。文献[9]引入绿色证书交易机制,引入环境成本将双目标转化成单目标。引入风险成本以应对由风电出力不确定性对系统带来的影响。传统方法中引入排放价格因子将经济性与环保性统一,不能直观地反映出碳排放量与发电成本之间的关系。现有研究未考虑在低负荷时段,可采用火电机组分阶段出力形式,进一步降低火电机组的出力,来提高风电消纳能力,以及火电机组深调产生的额外的碳排放量和能耗成本对系统运行方式的影响。

新方法考虑火电机组深调对发电成本和碳排放量的影响,建立了火电机组分阶段出力模型。将碳交易机制引入系统的调度模型中,构建分阶段碳交易成本的计算

模型。以碳排放量和发电成本最小为优化目标,综合考虑含低负荷场景的系统的运行状态和各种约束条件。本文建立了基于多目标的含低负荷场景低碳多源协调调度模型,从经济性和低碳性角度全面分析了电力系统低碳运行效益。

1 各要素模型

1.1 火电机组分阶段出力模型

如图 1 所示,调峰过程可以分为 3 个阶段,分别为常规调峰(regular peak regulation, RPR)、不投油深度调峰(deep peak regulation without oil, DPR)、投油深度调峰(deep peak regulation with oil, DPRO)。其中 P_{\max} 为 RPR 下的火电机组最大功率, P_a 为 RPR 下最小功率, P_b 为 DPR 下的最小功率, P_c 为 DPRO 下的最小功率^[10]。

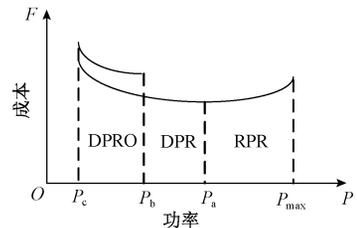


图 1 火电机组调峰过程

Fig.1 Peak regulation for thermal power units

任何运行状态下,碳排放与火电机组的输出功率之间存在一定的函数关系。当在 DPRO 阶段时,需消耗一定的柴油起助燃作用,将额外产生一定的碳排放,函数表达式如式(1)所示。

$$f_1 = \begin{cases} \alpha_i P_i^2 + \gamma_i P_i + \lambda_i + \delta_i \exp(\tau_i P_i), & P_b < P_i \leq P_{\max} \\ \alpha_i P_i^2 + \gamma_i P_i + \lambda_i + \delta_i \exp(\tau_i P_i) + k_c \text{oil}_{\text{cost}}, & P_c < P_i \leq P_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: α_i 、 γ_i 、 λ_i 、 τ_i 称作排放参数; P_i 代表火力发电机组输出功率; k_c 为单位柴油产生的碳排放量, oil_{cost} 为 DPRO 时的油耗量。

火电机组调峰成本可以分阶段表示, RPR 阶段为燃煤成本; DPR 阶段为燃煤成本、机组损耗成本之和; DPRO 阶段新增加了投油成本和环境污染惩罚成本^[11]。

$$F_1 = \begin{cases} f_1(P_i), & P_a < P_i \leq P_{\max} \\ f_1(P_i) + w_{\text{cost}}(P_i), & P_b < P_i \leq P_a \\ f_1(P_i) + w_{\text{cost}}(P_i) + w_{\text{oil}} + w_{\text{ev}}(P_i), & P_c < P_i \leq P_b \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$f_i(P_i) = (a^2 P_i + b P_i + c) \times S_{\text{coal}} \quad (3)$$

$$w_{\text{cost}}(P_i) = (1/2 N_i(P_i)) \times \beta \times S_{\text{unit}} \quad (4)$$

$$w_{\text{oil}} = \text{oil}_{\text{cost}} \times S_{\text{oil}} \quad (5)$$

$$w_{\text{ev}}(P_i) = \text{oil}_{\text{cost}} \times W_{\text{pollute}} + S_{\text{punish}}(P_i, \text{oil}_{\text{cost}}) \quad (6)$$

式中: F_1 为火电机组调峰能耗成本; $f_i(P_i)$ 为运行煤耗成本; a 、 b 和 c 为发电机成本系数; S_{coal} 为煤价; $w_{\text{cost}}(P_i)$ 为机组损耗成本; $N_i(P_i)$ 为转子致裂循环周次; β 为火电厂实际运行损耗系数; S_{unit} 为购机成本; w_{oil} 为加油成本; S_{oil} 为油价; $w_{\text{ev}}(P_i)$ 为在 DPR 阶段下增加的环境污染惩罚成本; W_{pollute} 为废气排污费系数; S_{punish} 为罚款函数。

1.2 碳交易机制

国家规定的免费碳交易分配额度可表示为^[12-13]:

$$E_f = \eta \sum_n \sum_t d_m^u \quad (7)$$

式中: E_f 为免费碳交易排放额度; η 为单位电量分配额; d_m^u 为负荷节点 n 在 t 时刻的实际负荷。

若系统碳排放量大于免费碳排放额度,则需要购买碳排放权;反之,则可出售获利。因此,碳交易成本可表示为:

$$C_1 = K_c(E_r - E_f) \quad (8)$$

$$E_r = \sum_g \sum_t a_{gt} x_{gt}^u \quad (9)$$

式中: C_1 为碳交易成本; E_r 为实际碳排放总量; K_c 为碳价; x_{gt}^u 为机组 g 在 t 时间的出力大小; a_{gt} 为 CO_2 排放量系数。

实际中碳排放权有一定的额度,设置碳配额交易量 E^m 为:

$$E_r - E_f \leq E^m \quad (10)$$

考虑未来的市场因素,分阶段碳交易成本数学模型可表示为:

$$F_2 = \begin{cases} \lambda(E_r - E_f), & E_r \leq E_f + d \\ \lambda d + (1 + \sigma)\lambda(E_r - E_f - d), & E_f + d < E_r \leq E_f + 2d \\ (2 + \sigma)\lambda d + (1 + 2\sigma)\lambda(E_r - E_f - 2d), & E_f + 2d < E_r \leq E_f + 3d \\ (3 + 3\sigma)\lambda d + (1 + 3\sigma)\lambda(E_r - E_f - 3d), & E_f + 3d < E_r \leq E_f + 4d \\ (4 + \sigma)\lambda d + (1 + 4\sigma)\lambda(E_r - E_f - 4d), & E_r > E_f + 4d \end{cases} \quad (11)$$

式中: F_2 为碳交易成本; λ 为实际碳交易价格; d 为区间长度; σ 为增长幅度,每上升一个阶梯,碳交易价格增加 $\sigma\lambda$ 。当 $E_r < E_f$ 时, F_2 将为负,表示此时获利,即向市场出售碳排放权。

1.3 不确定性模型

由于风力发电的不确定性,若低估或高估可用的风电,火电机组将产生额外的碳排放^[7]。

$$f_2 = \sum_{j=1}^{N_w} G_{p,j}(W_{r,j} - W_j) + \sum_{i=1}^{N_w} G_{r,j}(W_j - W_{r,j}) \quad (12)$$

其中:

$$G_{p,j}(W_{r,j} - W_j) = e_p E[(W_{r,j} - W_j)I(W_{r,j} \geq W_j)] = e_p \int_{W_j}^{W_{j,\text{rated}}} (w - W_j) f(w) dw \quad (13)$$

$$G_{r,j}(W_j - W_{r,j}) = e_r E[(W_j - W_{r,j})I(W_{r,j} \leq W_j)] = e_r \int_0^{W_j} (W_j - w) f(w) dw \quad (14)$$

式中: N_w 为风电机组数目; $W_{r,j}$ 为实际输出功率; W_j 为计划输出功率; e_p 为环境惩罚因子(低估); $f(w)$ 为风力输出的概率密度; $W_{j,\text{rated}}$ 为风力发电机的额定输出值; e_r 为惩罚因子(高估)。

2 含负荷场景下低碳多源协调调度模型

2.1 目标函数

本文模型包含 2 个优化目标:碳排放量及最小发电成本^[14]。

1) 碳排放量

采用火电机组深调、考虑风力发电不确定性等,火电机组都将产生额外的碳排放。

$$f = f_1 + f_2 \quad (15)$$

2) 最小发电成本

最小发电成本包括火电机组调峰能耗成本、碳交易成本、燃气轮机发电成本、包括弃风惩罚成本^[15]、储能运行成本的其他成本。

$$F = \min(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \quad (16)$$

$$F_3 = \sum_{t=1}^T \left(\pi_g \frac{P_{g,t}}{Q_{\text{gas}}} \Delta t \right) \quad (17)$$

式中: F_3 为燃气轮机发电成本; π_g 为天然气价格; $P_{g,t}$ 为燃气轮机输出的功率; Q_{gas} 为天然气对应的热值^[13], 即 $9.97(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ 。

$$F_4 = \sum_{t=1}^T (k^w \Delta P_t^w \Delta t^h) + k_b |P_b(t)| f(D_b(t)) \quad (18)$$

其中:

$$f(D_b(t)) = \begin{cases} 1, & 0 \leq D_b(t) \leq D_{\text{max}} \\ \frac{f_{\text{max}} - 1}{1 - D_{\text{max}}} [D_b(t) - D_{\text{max}}] + 1, & D_{\text{max}} \leq D_b(t) \leq 1 \end{cases} \quad (19)$$

式中: F_4 为系统弃风惩罚成本、储能运行成本之和; T 为调度周期(24 h); k^w 为弃风惩罚系数; ΔP_t^w 为第 t 时段弃风功率; Δt^h 为对应的小时数; k_b 为对应的成本系数;

$P_b(t)$ 、 $D_b(t)$ 分别为在 t 时刻的充放电功率及放电深度; $f(D_b(t))$ 为运行成本惩罚系数函数; D_{\max} 为电池储能最大放电深度; f_{\max} 为最大惩罚系数因子。

2.2 约束条件

深入分析发电机限制、电力系统运行限制、电力系统节点平衡约束、系统火电机组深度调节约束、低负荷场景约束对系统的影响。

1) 发电机限制

$$\begin{cases} P_{ge,k}^{\min} \leq P_{ge,k,t} \leq P_{ge,k}^{\max} \\ Q_{ge,k}^{\min} \leq Q_{ge,k,t} \leq Q_{ge,k}^{\max} \end{cases}, \quad k \in N_{GR} \quad (20)$$

式中: $P_{ge,k}^{\max}$ 、 $P_{ge,k}^{\min}$ 分别为有功最大值; $Q_{ge,k}^{\max}$ 、 $Q_{ge,k}^{\min}$ 分别为无功最大值。

2) 电力系统运行限制

考虑电网运行电压、线路输电量大小,以保证电力系统运行的安全性与稳定性。

$$\begin{cases} V_k^{\min} \leq V_{k,t} \leq V_k^{\max}, & k \in N_G \\ \Psi_l^{\min} \leq \Psi_{l,t} \leq \Psi_l^{\max}, & l \in N_l \end{cases} \quad (21)$$

式中: V_k^{\max} 、 V_k^{\min} 分别为电网运行电压的上下限; Ψ_l^{\max} 、 Ψ_l^{\min} 分别为 l 时刻线路输电量的上下限。

3) 电力系统节点平衡约束

在系统运行过程中应保证系统实时有功、无功功率平衡。

$$\begin{cases} P_{ge,k,t} + P_{w,k,t} - P_{el,k,t} = P_{k,t} \\ Q_{ge,k,t} - Q_{el,k,t} = Q_{k,t} \end{cases}, \quad k \in N_G \quad (22)$$

式中: $P_{ge,k,t}$ 、 $P_{w,k,t}$ 、 $P_{el,k,t}$ 和 $P_{k,t}$ 分别为 t 时刻节点 k 火电机组发电的有功功率、风力发电的有功功率、负荷的有功功率和节点输出的有功功率。 $Q_{ge,k,t}$ 、 $Q_{el,k,t}$ 和 $Q_{k,t}$ 分别为 t 时刻节点 k 火电机组运行无功功率、负荷无功功率和节点输出的无功功率。

4) 系统火电机组深度调节约束

在调度建模过程中,需要考虑备用调度计划的精确可实现以保证系统的安全性;充分发挥正在运行机组的快速变负荷能力,以提高现有系统对具有不确定性和大幅度波动特征的清洁能源的补充和支撑能力^[16]。

$$\begin{cases} r_{i,\max}^{\text{up}}(k) = \min \{ g_i[(k-1) \cdot \tau] + \\ \tau \cdot \Delta_i, P_{\max,i} \} - g_i(k \cdot \tau) \\ r_{i,\max}^{\text{down}}(k) = g_i(k \cdot \tau) - \max \{ g_i[(k-1) \cdot \tau] - \\ \tau \cdot \Delta_i, P_{\min,i} \} \end{cases} \quad (23)$$

$$g_i(t) = g_i(0) + \int_0^t u_i(\xi) d\xi, \quad \forall t \in [0, K\tau] \quad (24)$$

$$p_i(k) = \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} g_i(t) dt \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^I r_i^{\text{up}}(k) \geq p_L(k) + r_{w,k,1}^{\text{up}} + u_s \% F_{P_s}^{-1}(\eta_1) \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^I r_i^{\text{down}}(k) \geq d_s \% F_{P_s}^{-1}(\eta_2) \quad (27)$$

$$0 \leq r_i^{\text{up}}(k) \leq r_{i,\max}^{\text{up}}(k) \quad (28)$$

$$0 \leq r_i^{\text{down}}(k) \leq r_{i,\max}^{\text{down}}(k) \quad (29)$$

式中: $r_{r,\max}^{\text{up}}(k)$ 、 $r_{i,\max}^{\text{down}}(k)$ 分别为旋转备用容量的最大值、最小值; τ 表示调度时常; $g_i(t)$ 表示机组 i 在 t 时刻的输出功率大小(单位为 MW); $u_i(t)$ 表示机组 i 在 t 时刻的输出功率变化率(单位为 MW·h); $p_i(k)$ 表示机组 i 在 k 时段的输出功率(单位为 MW·h)。

5) 低负荷场景约束

在低负荷运行状态时必须满足式(30)或(31)。

$$P_G + P_w = P_L + P_{\text{loss}} + P_{\text{ESS}} \quad (30)$$

$$P_{G \min} + P_w > P_L + P_{\text{loss}} + P_{\text{ESS max}} \quad (31)$$

式中: P_G 为常规机组输出有功功率; P_w 为清洁能源输出有功功率; P_L 为负荷有功功率; P_{loss} 为系统线损; P_{ESS} 为储能充电的有功功率; $P_{G \min}$ 为火电机组最小输出有功功率; $P_{\text{ESS max}}$ 为储能装置的极限值。

6) 储能运行约束

储能须满足最大充放电功率约束、功率波动约束、SOC 约束^[17-18]:

$$E_b(t) = E_b(t-1) - \mu_1 P_b(t) \eta_c - \mu_2 P_b(t) / \eta_d \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \max \left(-P_B, \frac{E_b(t) - E_B}{\Delta t \eta_c} \right) &\leq P_b(t) \leq \\ \min \left(P_B, \frac{E_b(t) - E_{b \min}}{\Delta t} \eta_d \right) &\end{aligned} \quad (33)$$

$$E_{b \min} \leq E_b(t) \leq E_B \quad (34)$$

$$\mu_1 \in \{0, 1\}; \mu_2 \in \{0, 1\}; \mu_1 + \mu_2 \leq 1 \quad (35)$$

式中, $E_b(t)$ 为电池储能在 t 时刻的电量; E_B 、 P_B 分别为电池储能的额定电量、额定功率容量; $E_{b \min}$ 为存储电量的最小值; η_c 、 η_d 分别为充放电效率; μ_1 、 μ_2 分别为状态变量:充电时, $\mu_1 = 1$, $\mu_2 = 0$;反之, $\mu_1 = 0$, $\mu_2 = 1$ 。

3 多目标优化模型的求解

3.1 萤火虫算法

1) 经典萤火虫算法

假设有 k 、 l 两只萤火虫,萤火虫 k 向萤火虫 l 移动。萤火虫 l 对 k 吸引因子 β_{kl} 笛卡尔距离可表示为:

$$\beta = \beta_0 e^{-r_{kl}} \quad (36)$$

$$r_{kl} = \|x_k - x_l\| \quad (37)$$

萤火虫 k 被更亮的萤火虫 l 吸引,移动更新:

$$x_k = x_k + \beta(x_l - x_k) + \alpha e \quad (38)$$

式中: α 为常数,可取 $[0, 1]$ 内数值; e 是随机数向量。

2) 改进的萤火虫算法

(1) 群组初始化。为了加快收敛速度,突出算法的优点,采用多个群组优化:

$$P_i = LB + R_i \circ (UB - LB) \quad (39)$$

式中: P_i 、 LB 、 R_i 分别为不同群组的初始化得到的值; LB 、 UB 分别为萤火虫种群变量阈值; R_i 为 $[0, 1]$ 间的均匀随机矩阵。

(2) 种群的迁徙。

(3) 检验优势度。为得到每个种群每次迭代各自对应的值, 采用优势度检验方法获得它们的最小值。

(4) 终止。迭代次数满足规定次数。

3.2 规范法线约束法

标准化法向约束 (normalized normal constraint, NNC) 将多目标转化成单目标问题, 通过分割多目标解空间的方式, 得到了均匀的 Pareto 前沿图 (Pareto frontier, PF)。图 2 所示为规范化之后的 PF, 目标函数的解空间的变换为:

$$l = (f_1, f_2) = \left(\frac{u_1(x) - u_{\min,x1}}{u_{\max,x1} - u_{\min,x1}}, \frac{u_2(x) - u_{\min,x2}}{u_{\max,x2} - u_{\min,x2}} \right) \quad (40)$$

式中: (u_1, u_2) 对应 (f_1, f_2) 规范前的函数。

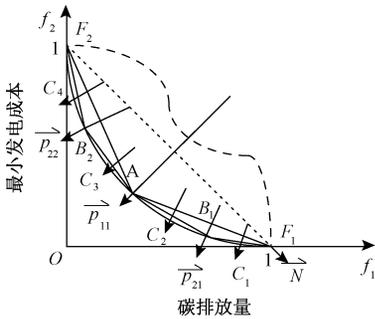


图 2 双目标 NNC 法 Pareto 前沿

Fig.2 Pareto frontier bi-objective of the NNC method

每个分割点的坐标可表示为:

$$\vec{\delta}_i = \left(1 - \frac{i}{N}, \frac{i}{N} \right), \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (41)$$

$$(-1)^{m-1} \vec{N} \cdot \vec{p}_{jk} \leq 0, \quad m = 1, 2 \quad (42)$$

$$\vec{p}_{jk} = \vec{l}_{mid} - \vec{l}_{cas} \quad (43)$$

式中: m 表示对应的单目标问题; \vec{N} 为乌托邦线; \vec{l}_{mid} 是乌托邦线中点; \vec{l}_{cas} 为可行域的随机点。如图 2 所示, 若第 1 次迭代时, $\widehat{F_1 F_2}$ 是可行域, 令 $m = 1$, 转化成第一类单目标问题是 f_1 , 约束函数为式 (42), 即沿 $\widehat{F_1 F_2}$ 的上半部分搜索, A 点即为解空间上半部分的最小值, \vec{p}_{11} 为点 A 的边界点。类似地, 当下一次迭代时, $\widehat{F_2 A}$ 是搜索的可行域, B_2 点即为 $F_2 B_2$ 部分的最小点, \vec{p}_{22} 为点 B_2 的边界值。经过不断的迭代, 转化成了单目标问题。

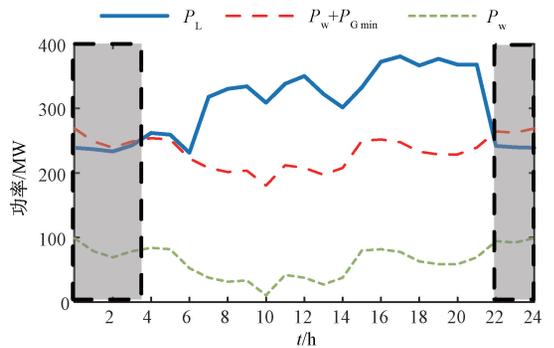
3.3 基于规范法线约束的改进萤火虫算法

首先采用 NNC 法构造出碳排放量和最小发电成本两类单目标问题, 再通过本文算法对碳排放量和最小发电成本两类单目标搜索。在满足各种约束的前提下, 首先寻优碳排放最小; 然后对最小发电成本进行寻优。最终确定各种机组的最优出力过程组合。收敛判断应满足下列条件之一: 1) 预设最大迭代次数 (本文设定为 80 次); 2) 帕累托点达到最大 (本文设置 40 和 20 个点)^[19]。

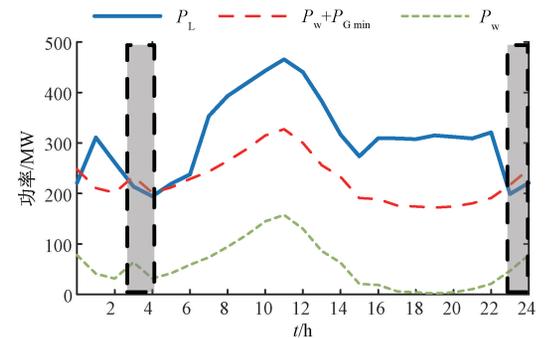
4 算例分析和结果

4.1 算例分析

以每个风电场包含 60 个风机, 共 10 个风电场的系统为算例, 每个风机功率为 2 MW, 正负旋转备用容量为系统负荷的 5%, 功率穿透限制系数为 0.09。根据气候特征, 春季属于大风期, 因此风力发电较多, 但此时系统负荷不是一年中最大的时段; 夏季的风电出力远低于春季, 而且由于天气炎热的原因, 系统负荷比春季多, 处于一年的高峰期; 在秋季, 风力是一年中最小的, 负荷需求与春季基本相同; 在冬季, 风力相对较小, 热负荷需求相对较高^[20]。选择 4 个典型含低负荷场景和风电预测输出数据, 优化调度系统。各典型日负荷和风电预测出力曲线如图 3 所示。



(a) 春季典型日
(a) Spring typical days



(b) 夏季典型日
(b) Summer typical days

表1所示为各典型日不同调度方案的成本。

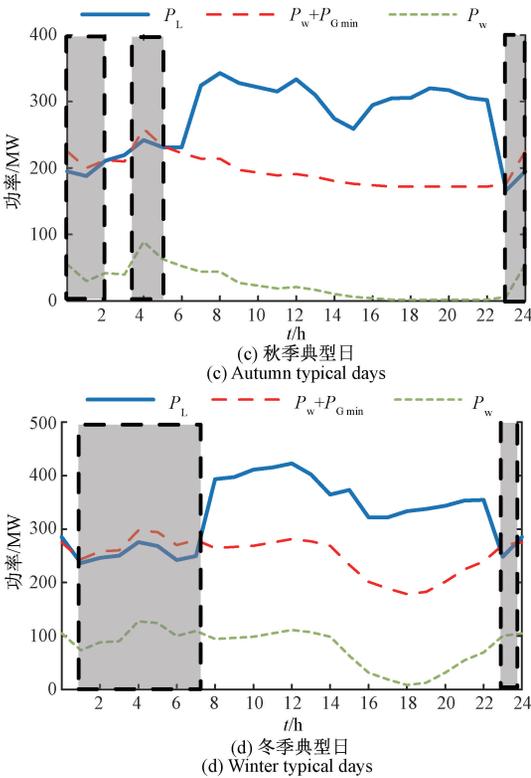


图3 各典型日负荷和风电出力特性曲线

Fig.3 The daily load curves and output characteristics of wind power

4.2 典型日优化调度

1) 低负荷场景分析

从图3可以看出,春季风电处于大风期,出现较大的弃风状况。系统在0:00~3:36和22:00~24:00时间段出现了低负荷运行状态;风电在夏季发电有所下降,但是系统仍有弃风情况。系统在02:47~4:00和23:00~24:00时间段出现了低负荷运行状态;风电秋季发电最少,只会出现少量弃风情况,系统在0:00~2:00、03:25~04:51和23:00~24:00时间段出现了低负荷运行状态;风电冬季发电较少,且冬季负荷需求较大,所以风电在满足系统储热装置需求的情况下,只有很少一部分剩余,只会出现少量弃风情况。系统在1:00~7:27和23:00~24:00时间段出现了低负荷运行状态。

2) 不同目标函数下碳排放量和成本分析

根据4个典型含低负荷场景数据和风电出力数据安排环保经济调度。为了比较不同调度方案下电力系统风电消纳能力及碳排放量的差异,用3种不同调度方案进行实验分析。方案1以发电成本最小为单目标的电力系统经济调度;方案2以碳排放最小为单目标的电力系统调度;方案3以经济、低碳为多目标的电力系统最优调度。图4所示为各典型日不同调度方案的风力发电量。

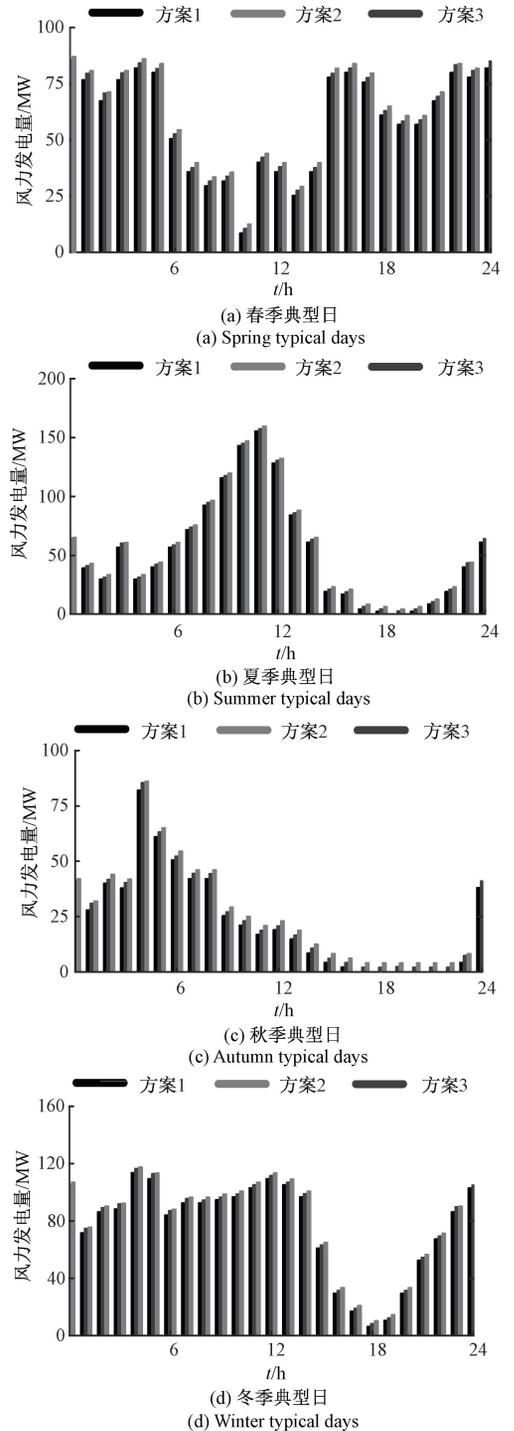


图4 各典型日不同调度方案的风力发电量

Fig.4 The wind power generation of different dispatching schemes on typical days

由图4和表1可知,当碳排放最小为目标时风电并网功率最大,因为风电资源的碳排放为0,当仅以碳排放最小为目标时,系统会最大限度接纳零碳排放的风

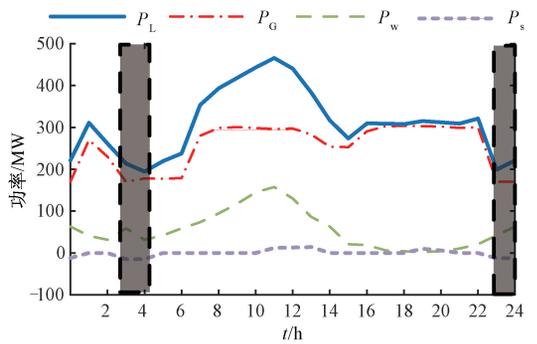
表 1 各典型日不同调度方案的成本

Table 1 Cost of different dispatching schemes on typical days

典型日	目标	发电成本/ 万元	碳排放 量/万吨	风力发电 量/MW	综合成本/ 万元
春季	方案 1	62.161	25.578	1 498.4	69.137 98
	方案 2	65.418	23.067	1 577.5	71.265 63
	方案 3	63.491	24.045	1 522.5	67.125 63
夏季	方案 1	64.056	27.236	1 341.3	72.906 16
	方案 2	68.183	24.263	1 427.2	74.420 82
	方案 3	66.479	25.436	1 387.1	70.314 16
秋季	方案 1	63.921	26.983	601.8	70.770 28
	方案 2	67.165	23.419	661.7	71.212 63
	方案 3	64.136	24.461	626.6	68.287 66
冬季	方案 1	64.256	27.021	1 876.1	73.906 16
	方案 2	68.193	25.671	2 025.7	74.174 32
	方案 3	67.216	26.436	1 959.3	71.314 16

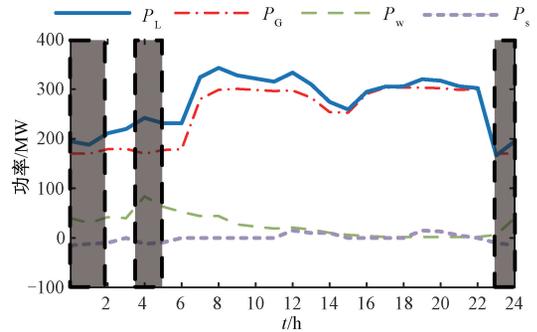
电资源从而忽略经济因素;当以系统成本最小为目标时风电并网功率最小,因为增大风电的并网功率会导致机组频繁启停,导致产生高额的启停成本;同时为了应对风电波动性,需要配置更多的备用容量,造成系统备用成本显著增加;当同时考虑系统成本与碳排放作为多目标低碳经济调度时,模型兼顾了电力系统成本和碳排放,此时最优风电并网功率在两个单目标之间。

以春季典型日为例,方案 3 的风力发电量比方案 1 高 1.6%,方案 3 的风力发电量比方案 2 低 3.6%。其中低负荷时段,方案 3 比方案 1 多发 22 MW,方案 3 比方案 2 少发 6 MW。方案 3 的发电成本比方案 1 高 10%,方案 3 的碳排放量比方案 2 的碳排放量高 32%。但是方案 3 综合成本最低,比方案 1 和方案 2 分别低 3% 和 23%。可以认为,低碳经济模型在经济性和降低碳排放上找到了一个折中的选择^[18]。最优调度方案如图 5 所示。



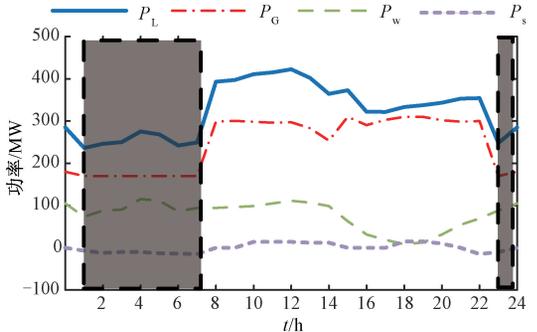
(b) 夏季典型日最优调度方案

(b) Typical daily dispatching scheme in summer



(c) 秋季典型日最优调度方案

(c) Typical daily dispatching scheme in autumn

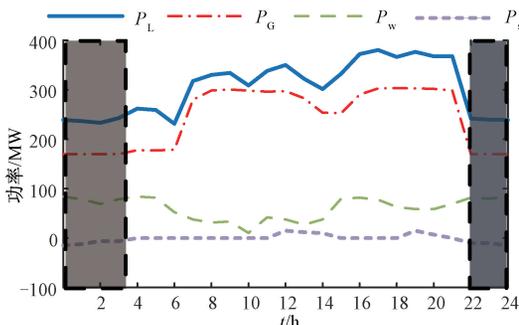


(d) 冬季典型日最优调度方案

(d) Typical daily dispatching scheme in winter

图 5 各典型日下最优调度方案

Fig.5 The optimal dispatching schemes on typical days



(a) 春季典型日最优调度方案

(a) Typical daily dispatching scheme in spring

4.3 风电并网渗透率灵敏度分析

风电并网渗透率是影响含低负荷场景低碳多源协调调度运行的重要因素之一^[21]。以春季典型日为例,不同风电渗透率下系统优化调度结果如表 2 所示。由表 2 可知,随着风电渗透率的增加,风力发电成本逐渐增加,火力发电成本逐渐减少,碳排放量先下降后上升。这是由于风电产生的效益大于火电由于调峰产生的成本,从而导致火力发电成本减少。对于碳排放量,当风电渗透率较小时,火电机组调峰压力小,产生的碳排放量和风电产生的环境效益相比,导致总碳排放量减少。当风电渗透率增加到一定数值时,火电机组调峰压力增大,频繁启停火电机组,导致碳排放量增加^[20]。

表2 不同风电渗透率下系统优化调度结果

Table 2 Optimal results with different penetration of wind power

渗透率/ %	风电消纳量/ MW	发电成本/ 万元	碳排放 量/万吨	综合成本/ 万元
5	380.625	60 214	27 146	732 387.4
10	761.25	61 479	26 982	723 265.4
15	1 141.8	60 268	25 146	678 261.4
20	1 522.5	63 491	24 045	671 256.3
25	1 903.1	59 736	25 547	679 856.3
30	2 283.7	61 951	27 146	736 917.3
40	-	-	-	-

注:渗透率为40%时,系统无法满足调峰的要求

此外,系统综合运行成本先减小后增大。由表2可看出,当风电渗透率约为20%时,此时综合运行成本最小为67.125 63万元。当风电渗透增加到40%左右时,风力发电占比过大,导致系统峰谷差变大,无法满足系统的调峰要求。

5 结 论

本文提出一种含低负荷场景低碳多源协调调度新方法,相较传统方法,所提方法具有以下优势:在含低负荷场景下,从低碳经济角度出发,合理评估了火电机组深调、风力发电的不确定性产生的碳排放量及火电机组火电机组调峰能耗成本、碳交易成本、燃气轮机发电成本、弃风惩罚成本、储能运行成本;并以发电成本和碳排放量最小为优化目标建立了多目标的含低负荷场景下低碳多源协调调度模型。结果表明含低负荷场景低碳多源协调调度新方法可有效降低碳排放量,并提高系统运行经济性。

参考文献

- [1] 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.
- ZHANG G, ZHANG F, ZHANG L, et al. Two-stage robust optimization model of day-ahead scheduling considering carbon emissions trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5490-5499.
- [2] 董晓天,严正,冯冬涵,等.大规模风电接入的电力系统

低碳经济调度[J].现代电力,2012,29(5):42-48.

DONG X T, YAN ZH, FENG D H, et al. Low-carbon economic dispatching for power system with large-scale wind power integration [J]. Modern Electric Power, 2012, 29(5): 42-48.

- [3] 金晶亮,李晨宇,彭超华,等.风电并网背景下的低碳电力调度策略[J].南京航空航天大学学报(社会科学版),2017,19(2):10-17.
- JIN J L, LI CH Y, PENG CH H, et al. Low-carbon power with wind power[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Social Edition), 2017, 19(2): 10-17.
- [4] HE L C, LU ZH G, ZHANG J F, et al. Low-carbon economic dispatch for electricity and natural gas systems considering carbon capture systems and power-to-gas[J]. Applied Energy, 2018, 224(15): 357-370.
- [5] 余岳,粟梅,孙尧,等.基于模糊去约束法的微电网系统运行优化[J].仪器仪表学报,2014,35(5):1022-1028.
- YU Y, SU M, SUN Y, et al. Microgrid system optimal scheduling based on fuzzy control constraint reduction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1022-1028.
- [6] CHEN D J, GONG Q W, ZOU B CH, et al. A low-carbon dispatch model in a wind power integrated system considering wind speed forecasting and energy-environmental efficiency [J]. Energies, 2012, 5(4): 1245-1270.
- [7] JIN J L, ZHOU P, ZHANG M M, et al. Balancing low-carbon power dispatching strategy for wind power integrated system [J]. Energy, 2018, 149(15): 914-924.
- [8] 李亮亮,范振亚,王希若,等.基于碳交易的含碳捕集电厂与风电接入的电力系统低碳经济调度[J].陕西电力,2017,45(5):48-54.
- LI L L, FAN ZH Y, WANG X R, et al. Low carbon economic dispatching for power grid integrated carbon capture power plants with wind power system based on carbon trading [J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(5): 48-54.
- [9] 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 J G. Low-carbon economic dispatching for power grid

- integrated with wind power system based on the green certificate trading mechanism[J]. China Electric Power, 2016, 49(7): 145-150.
- [10] 林俐,邹兰青,周鹏,等.规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J].电力系统自动化, 2017, 41(7): 21-27.
- LIN L, ZOU L Q, ZHOU P, et al. Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large-scale wind power integration[J]. China Power System Automation, 2017, 41(7): 21-27.
- [11] 林瑞宗.考虑火电机组多阶段状态转移的高比例风电电力系统多资源调度模型[J].电力建设, 2018, 39(10): 120-130.
- LIN R Z. Research on multiple resource dispatch model in power system with large scale wind power integrated considering multi-stage state transferring of thermal units[J]. Power Construction 2018, 39(10): 120-130.
- [12] 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.
- ZHANG G, ZHANG F, ZHANG L, et al. Two-stage robust optimization model of day-ahead scheduling considering carbon emissions trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5490-5499.
- [13] 秦婷,刘怀东,王锦桥,等.基于碳交易的电—热—气综合能源系统低碳经济调度[J].电力系统自动化, 2018, 42(14): 8-13, 22.
- QIN T, LIU H D, WANG J Q, et al. Carbon trading based low-carbon economic dispatch for integrated electricity-heat-gas energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 8-13, 22.
- [14] 徐婷,张海峰,杨昊,等.数据中心微电网能量管理随优化模型研究[J].电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 101-107.
- XU T, ZHANG H F, YANG H, et al. Research on stochastic optimization model of energy management for data center microgrids [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 101-107.
- [15] 甘伟,艾小猛,方家琨,等.风-火-水-储-气联合优化调度策略[J].电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 11-20.
- GAN W, AI X M, FANG J K, et al. Coordinated optimal operation of the wind, coal, hydro, gas units with energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(Suppl.1): 11-20.
- [16] 高云龙,闫鹏.充分发挥火电系统深度变负荷能力的风火电动态经济调度[J].中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2491-2500.
- GAO Y L, YAN P. Dynamic economic dispatch of wind power integrated system with fully developed supply responses of thermal units [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2491-2500.
- [17] 余岳,粟梅,孙尧,等.计及电动汽车的微电网储能单元容量优化[J].仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1261-1268.
- YU Y, SU M, SUN Y, et al. Capacity optimization of energy storage unit in microgrid considering electric vehicle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1261-1268.
- [18] 程逸帆,乔飞,侯珂,等.区域微电网群两级能量调度策略优化研究[J].仪器仪表学报, 2019, 40(5): 68-77.
- CHENG Y F, QIAO F, HOU K, et al. Research on bi-level energy dispatching strategy optimization for regional microgrid cluster [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 68-77.
- [19] 张荣权,王怀智,王贵斌,等.基于改进萤火虫算法的冷热电联供系统多目标优化调度[J].华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(1): 92-100.
- ZHANG R Q, WANG H ZH, WANG G B, et al. Multi-objective optimal dispatch of combined cooling heating and power systems based on improved firefly algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2018, 45(1): 92-100.
- [20] 彭怡峰.微网风电消纳的蓄热储能冷热电联供系统环保经济运行模型[D].长沙:长沙理工大学, 2016.
- PENG Y F. An environmental and economic operation model combining heat accumulator and CCHP to promote accommodation of wind power in microgrid [D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2016.
- [21] 易林,张玉荣,李杨,等.低碳经济下含风储联合电力系统优化调度[J].水电能源科学, 2018, 36(4): 213-216, 157.
- YI L, ZHANG Y R, LI Y, et al. Optimal dispatching of power system with wind power and BESS under low-carbon economy[J]. Hydropower Energy Science, 2018, 36(4): 213-216, 157.

作者简介



崔岱,分别在 2004 年和 2007 年于西安交通大学获得学士学位和硕士学位,现为国网辽宁省电力有限公司高级工程师、沈阳工业大学博士研究生,主要研究方向为电网调控运行、清洁能源消纳、电网安全稳定分析等。

E-mail: cuidai1982@163.com

Cui Dai received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Xi'an Jiaotong University in 2004 and 2007, respectively. He is currently a senior engineer at State Grid Liaoning Electric Power Company Limited and a Ph.D. candidate at Shenyang University of Technology. His main research interests include power grid regulation and operation, clean energy absorption, power grid security and stability analysis, etc.



葛维春,分别在 1984 年和 1987 年于东北电力学院获得学士学位和硕士学位,1992 年于华北电力学院获得博士学位,现为国网辽宁省电力有限公司高级工程师、沈阳工业大学博士生导师,主要研究方向为电力系统分析、清洁能源消纳等。

E-mail: 13804012589@126.com

Ge Weichun received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Northeast Electric Power University in 1984 and 1987, and received his Ph.D. degree from North China Electric Power University in 1992, respectively. He is currently a senior engineer at State Grid Liaoning Electric Power Company Limited and a Ph.D. advisor at Shenyang University of Technology. His main research interests include power system analysis, clean energy consumption, etc.



赵文广,2018 年于绥化学院获得学士学位,现为东北电力大学硕士研究生,主要研究方向为含新能源并网的电力系统调控运行、稳定与控制。

E-mail: 820192752@qq.com

Zhao Wenguang received his B.Sc. degree from Suihua University in 2018. He is currently a master student at Northeast Electric Power University. His main research interests include power system regulation, operation, stability and control including new energy grid connection.