

基于氨储能技术的电转氨耦合风-光-火 综合能源系统双层优化调度

袁文腾, 陈亮, 王春波*, 王中瑞

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 河北省保定市 071003)

Bi-level Optimal Scheduling of Power-to-ammonia Coupling Wind-photovoltaic-thermal Integrated Energy System Based on Ammonia Energy Storage Technology

YUAN Wenteng, CHEN Liang, WANG Chunbo*, WANG Zhongrui

(School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Aiming at the problem of energy abandonment of wind-photovoltaic-thermal integrated energy system with high wind and photovoltaic penetration rate, this paper proposes using the technology of power-to-ammonia and ammonia mixed combustion of thermal power units to improve the utilization rate of wind and photovoltaic energy and improve the safety and environmental protection of coal based energy systems in China. First, the power-to-ammonia coupling integrated energy system is proposed, and the coordinated operation index of wind-photovoltaic-thermal-ammonia system is defined for the comprehensive evaluation of the economy and stability of coal-fired unit output, wind and photovoltaic energy consumption and power-to-ammonia operation. Then, a bi-level optimal scheduling model is established, with the maximum coordinated operation index of the system as the upper goal, and the minimum operation cost of the power-to-ammonia coupling integrated energy system as the lower goal. Finally, the validity of the proposed model is verified by comparing different cases in multiple scenarios. The results show that under the typical day scenarios in winter, transition season and summer, for the integrated energy system without power-to-ammonia, the total cost of the system is reduced, while the stability and safety of coal-fired units are improved. After the introduction of power-to-ammonia, the absorption rate of wind-photovoltaic power is improved, and the total cost is further reduced by 1.06%, 1.74% and 0.59%, respectively. The carbon emissions are decreased by 2.11%, 2.81% and 1.95%, respectively. It can be seen that power-to-ammonia has a good improvement effect on the economic and

low-carbon operation of the integrated energy system.

KEY WORDS: integrated energy system; power-to-ammonia; ammonia mixed combustion; integrated operation; bi-level optimization model

摘要: 针对高风光渗透率的风-光-火综合能源系统弃能问题, 提出利用电转氨和火电机组掺氨燃烧相结合的技术以提高风光利用率, 改善我国以煤为主的能源系统安全性与环保性。首先提出电转氨耦合综合能源系统构型, 并为燃煤机组出力、风光消纳和电转氨运行的经济性和稳定性的综合评价定义风-光-火-氨系统协调运行指标; 进而构建以协调运行指标最大为上层目标、电转氨耦合风-光-火综合能源系统运行成本最小为下层目标的双层优化调度模型; 最后, 通过多场景下不同模型的对比验证了所提模型的有效性。结果表明, 在冬季、过渡季和夏季典型日场景下, 对于不含电转氨的综合能源系统, 采用双层优化调度模型后, 在燃煤机组的稳定性和安全性得到改善的同时, 系统的总成本均降低。引入电转氨后, 风光消纳率得到提升, 总成本分别进一步降低1.06%、1.74%和0.59%; 碳排放量分别降低2.11%、2.81%和1.95%。可见电转氨对综合能源系统的经济、低碳运行具有较好的改善作用。

关键词: 综合能源系统; 电转氨; 掺氨燃烧; 协调运行; 双层优化模型

0 引言

风电、光伏等可再生能源发电技术以其低碳可再生的优势, 在我国乃至世界都得到了广泛应用。然而, 由于可再生能源的间歇性和波动性等特点, 电力系统中往往需要配备大容量的储能设备来保证运行的经济性和安全性^[1]。针对含储能的综合能源系统优化调度, 国内外诸多学者已进行了相

基金项目: 新疆重大科技项目(2021ZD02)。

Project Supported by the Major Science and Technology Projects in Xinjiang (2021ZD02).

关的研究。文献[2-3]提出利用电池储能系统削峰填谷，以辅助燃煤机组进行深度调峰；文献[4]提出通过压缩空气储能降低可再生能源发电的间歇性和波动性；文献[5-6]提出通过水电站消纳风光发电以优化电网运行的稳定性。然而，上述储能技术在我国应用过程中仍存在诸多问题，例如电池储能的高成本和大容量集成等技术难点尚未突破，大规模压缩空气储能和水电站建设受到地形地理限制等。因此，需要一种可大规模应用于工程建设的储能技术以应对电力系统的高可再生能源渗透率的发展。

氢气具有较高的质量能量密度，电转氢技术(power-to-hydrogen, P2H)利用电解水制取氢气实现储能^[7-8]。然而，由于氢气密度低，在储存和运输过程中需要高压(30~70MPa)或低温(-250℃)才可被压缩或液化，这不仅导致 15%~40%的能量损失^[9]，同时极端条件和泄漏风险也严重限制了氢气的大规模利用^[10]。为此，文献[11]提出采用氨代替氢实现大规模储能的思路。

作为一种零碳能源，氨具有与普通燃煤相当的热值(18.72MJ/kg)，且与氢气相比，氨气液化条件更低(0.9MPa 或-33℃)，运输和储存经济性、安全性更优^[12]。电转氨技术(power-to-ammonia, P2A)在电制氢后通过合成氨反应实现电能到氨气的转化，是解决氢气储运难题、实现可再生能源大规模存储的有效途径。目前此方面研究主要集中在电转氨技术和氨的利用方面。电转氨方面，文献[13]分析了电转氨技术的能耗水平；文献[14]比较了以“绿氢”为原料的氢、氨和甲醇的生产和储存成本进行，并指出氨的成本最低，较氢和甲醇分别低 31%和 18%。在氨利用方面，近年来研究者们提出燃煤锅炉掺氨燃烧以降低碳排放的思路，这对促进我国以煤为主能源系统的减碳极具潜力。本文作者^[15]通过热力计算验证了大型燃煤锅炉掺氨燃烧降低碳排放的可行性；文献[16-17]的分析表明，氨-煤混燃技术促进我国电力系统减碳目标的达成。

然而，已有研究仅针对电转氨或氨燃烧利用的某一过程进行了探讨，将电转氨集成到可再生能源系统中是否可行，仍需要全流程多维度评估，但目前对电转氨和氨燃烧利用整体流程的经济性进行分析及优化的研究匮乏。为此，本文提出一种基于氨储能技术的电转氨耦合风-光-火综合能源系统双层优化调度模型，分析电转氨和燃煤锅炉掺氨燃

烧对风-光-火综合能源系统的影响。本文首先对电转氨耦合风-光-火综合能源系统的基本流程进行分析，并提出风-光-火-氨协调运行指标，综合表征燃煤机组利用率、稳定性和可再生能源用于电转氨的功率占比；其次构建以协调运行指标最大为上层目标函数，以电转氨耦合风-光-火系统成本最小为下层目标函数的双层优化调度模型；最后结合新疆某地的典型日场景进行案例计算，以分析电转氨和掺氨燃烧技术对风-光-火系统的影响并验证本文所建模型的有效性。

1 电转氨耦合风-光-火综合能源系统构型

电转氨耦合风-光-火综合能源系统的基本结构如图 1 所示。在本文所述的系统中，电负荷由风机、光伏、火电机组和热电联产机组提供；热负荷由热电联产机组和制氨工厂提供。电转氨系统包含电解池、变压吸附(pressure swing adsorption, PSA)制氮设备和制氨工厂。

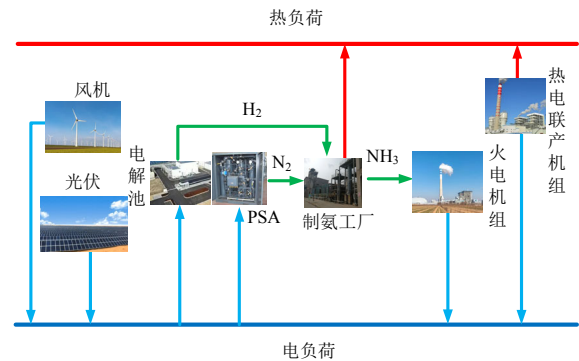


图 1 电转氨耦合风-光-火综合能源系统结构

Fig. 1 Structure of power-to-ammonia coupling wind-photovoltaic-thermal integrated energy system

在图 1 中，本文将制氨工厂在哈伯合成氨反应中释放的热量^[18]加入热力网络的构建中，其提供的热功率为

$$H_t^{P2A} = \eta^{P2A} \sigma m_t^{P2A, NH_3} \quad (1)$$

式中： H_t^{P2A} 为 t 时段电转氨过程向系统提供的热功率； η^{P2A} 为制氨工厂用于供热的热释放比例； σ 为生成单位 NH_3 所释放的热功率； m_t^{P2A, NH_3} 为 t 时段电转氨生产的氨的质量。

在电转氨系统加入电力网络后，风光发电功率输出途径有 2 个：1) 供给电负荷需求；2) 供给电转氨系统。2 个途径的功率占比对于系统调度的经济性和环保性都会产生影响。因此，电力网络中各元件之间的协调运行是整个电转氨耦合风-光-火综合能源系统调度优化的关键。

2 电转氨耦合风-光-火综合能源系统双层优化调度

针对电转氨耦合风-光-火综合能源系统电力网络中各元件的协调运行,以及系统的电-热调度优化,本文构建了电转氨耦合风-光-火综合能源系统的双层优化调度模型,其结构如图2所示。

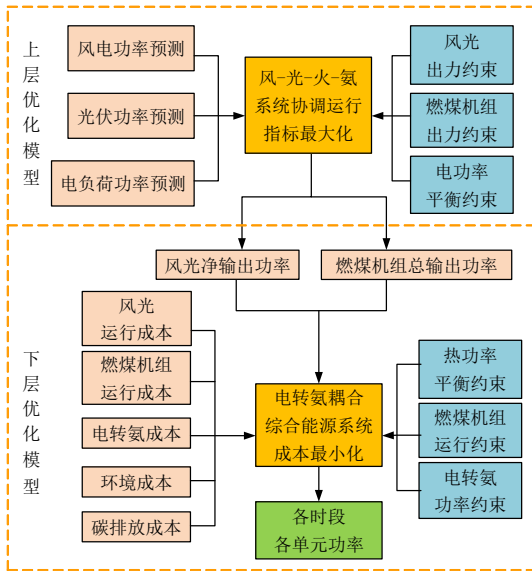


图2 双层优化调度模型

Fig. 2 Bi-level optimal scheduling model

上层优化模型以电力系统的各元件协调运行为切入点,定义了风-光-火-氨系统协调运行指标,用以综合表征电力系统中燃煤机组出力、风光消纳和电转氨运行的经济性和稳定性。

首先,针对燃煤机组出力的波动情况,定义了燃煤机组出力波动系数 μ ,如式(2)所示(本文中,燃煤机组包含火电机组和热电联产机组)。当 μ 越小时,表示机组出力越平稳。

$$\mu = \sum_{t=1}^T |P_t^{th} - \bar{P}^{th}| / (24\bar{P}^{th}) \quad (2)$$

式中: P_t^{th} 为 t 时段燃煤机组的输出功率之和; \bar{P}^{th} 为燃煤机组在调度时间内输出功率的平均值。

其次,考虑了燃煤机组的利用率 ψ ,如式(3)所示^[19]。若 ψ 越大,则越接近机组的额定输出功率,此时机组的发电煤耗也越低,其经济性和安全性都会得到提升。

$$\psi = \sum_{t=1}^T P_t^{th} / (24P_{max}^{th}) \quad (3)$$

式中 P_{max}^{th} 为燃煤机组的最大输出功率。

此外,由于风光发电输出功率的调度途径会影响系统的稳定性、经济性和环保性,因此定义了风

光发电中可用于电转氨的功率占比 λ ,如式(4)所示,考虑到电转氨过程的能效较低,若 λ 越小,则表示风光发电中可用于电转氨的功率越小,相对应地,直接供给电负荷需求的功率越大。

$$\lambda = \sum_{t=1}^T P_t^{ava,P2A} / \sum_{t=1}^T (P_t^{wt,pre} + P_t^{pv,pre}) \quad (4)$$

式中: $P_t^{ava,P2A}$ 为 t 时段风光发电中可用于电转氨的功率; $P_t^{wt,pre}$ 和 $P_t^{pv,pre}$ 分别为 t 时段风电和光伏的预测功率。

最后,为综合考虑上述3个指标,提出了风-光-火-氨系统协调运行指标,如式(5)所示。协调运行指标 ρ 越大,表明电力元件的协调运行性能越优。

$$\rho = -0.309\mu + 0.372\psi - 0.319\lambda \quad (5)$$

式(5)中权重系数的计算参考文献[20]中的方法,其计算依据是针对宏观需求指标权重计算的DEMATEL-ANP-反熵权的组合赋权法,详细的计算过程可见附录A。尽管文献[20]中的研究对象与本文的研究对象不相同,但本文中定义的燃煤机组出力波动系数、燃煤机组的利用率和风光发电中可用于电转氨的功率占比这3项均与配电网的安全、经济和社会效益评估相关,符合文献[20]中“宏观需求指标”包含的范畴。

下层模型基于上层模型传递的风光功率及燃煤机组功率,结合热负荷需求曲线,以电转氨耦合风-光-火系统总成本最小为目标函数,对各燃煤机组每个时段的出力进行优化。通过双层优化求解,得出各元件的最优出力和最小运行成本。

2.1 上层优化调度模型

2.1.1 目标函数

上层优化调度模型的目标函数为风-光-火-氨系统协调运行指标 ρ 最大:

$$\max(-0.309\mu + 0.372\psi - 0.319\lambda) \quad (6)$$

2.1.2 约束条件

上层优化模型需要满足以下约束条件。

1) 风电、光伏及燃煤机组出力约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{wt,N} \leq P_t^{wt,pre} \\ 0 \leq P_t^{pv,N} \leq P_t^{pv,pre} \\ P_{min}^{th} \leq P_t^{th} \leq P_{max}^{th} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_t^{wt,N}$ 和 $P_t^{pv,N}$ 分别为风电和光伏在 t 时段直接供给电负荷需求的输出功率; P_{min}^{th} 为燃煤机组的最小输出功率。

2) 弃风光功率约束。

为避免在优化风-光-火-氨系统协调运行指标时产生大量的弃风光，本文参考《清洁能源消纳行动计划(2018—2020年)》^[21]设定了最大允许弃风光约束：

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T P_t^{\text{wt,ab}} / \sum_{t=1}^T P_t^{\text{wt,pre}} \leq \lambda_{\text{max}}^{\text{wt}} \\ \sum_{t=1}^T P_t^{\text{pv,ab}} / \sum_{t=1}^T P_t^{\text{pv,pre}} \leq \lambda_{\text{max}}^{\text{pv}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $P_t^{\text{wt,ab}}$ 和 $P_t^{\text{pv,ab}}$ 分别为弃风和弃光功率； $\lambda_{\text{max}}^{\text{wt}}$ 和 $\lambda_{\text{max}}^{\text{pv}}$ 分别为风电和光伏的最大允许弃用率，分别为 15% 和 10%。

3) 风光发电可用于电转氨的功率约束。

由于氨合成技术在装机容量以下安全运行的能力有限，因此针对引入电转氨技术后的系统，本文假定可用于电转氨的风光发电功率始终在其电转氨设备容量的 50% 以上^[22]。

$$P_t^{\text{ava,P2A}} \geq 50\% P_{\text{max}}^{\text{P2A}} \quad (9)$$

式中 $P_{\text{max}}^{\text{P2A}}$ 为电转氨设备的最大容量。

4) 电负荷平衡约束。

每个调度时段内均需满足电负荷平衡约束：

$$P_t^{\text{wt,N}} + P_t^{\text{pv,N}} + P_t^{\text{th}} = P_t^{\text{load}} \quad (10)$$

式中 P_t^{load} 为 t 时段的电负荷需求功率。

2.2 下层优化调度模型

2.2.1 目标函数

下层优化调度模型的目标函数为电转氨耦合风-光-火系统总成本 C 最小，其中包括风电运行成本 C_{wt} 、光伏运行成本 C_{pv} 、弃风光成本 C_{ab} 、燃煤机组运行成本 C_{th} 、电转氨运行成本 C_{P2A} 、碳排放成本 C_{CO_2} 和环境成本 C_{ep} ：

$$C = C_{\text{wt}} + C_{\text{pv}} + C_{\text{ab}} + C_{\text{th}} + C_{\text{P2A}} + C_{\text{CO}_2} + C_{\text{ep}} \quad (11)$$

1) 风电、光伏和弃风光的成本：

$$\begin{cases} C_{\text{wt}} = c_{\text{wt}} \sum_{t=1}^T P_t^{\text{wt}} \\ C_{\text{pv}} = c_{\text{pv}} \sum_{t=1}^T P_t^{\text{pv}} \\ C_{\text{ab}} = c_{\text{ab}} \sum_{t=1}^T (P_t^{\text{wt,ab}} + P_t^{\text{pv,ab}}) \end{cases} \quad (12)$$

式中： c_{wt} 、 c_{pv} 和 c_{ab} 分别为风电、光伏和弃风光的单位成本系数； P_t^{wt} 和 P_t^{pv} 分别为 t 时段风电和光伏的实际输出功率。

2) 燃煤机组运行成本。

本文中的燃煤机组分为火电机组和热电联产机组，其中规定火电机组参与常规调峰(regular peak regulation, RPR)和深度调峰(deep peak regulation, DPR)，热电联产机组仅参与常规调峰。由于火电机组可进行大比例的掺氨，而电转氨生产的氨无法满足所有燃煤机组的掺氨需求，所以本文规定仅对火电机组进行掺氨燃烧，热电联产机组不进行掺氨。由于燃煤机组的设备维护成本仅约为燃料成本的 0.29%^[23]，因此为简化计算，本文予以忽略处理。根据燃煤机组的运行特性对火电机组的运行成本(燃料成本和损耗成本)和热电联产机组的运行成本(燃料成本)分别计算，则燃煤机组运行成本为

$$C_{\text{th}} = C_{\text{th}}^{\text{th}} + C_{\text{th}}^{\text{chp}} \quad (13)$$

式中 $C_{\text{th}}^{\text{th}}$ 和 $C_{\text{th}}^{\text{chp}}$ 分别为火电机组和热电联产机组的运行成本。

对于掺氨燃烧技术改造的火电机组而言，氨以一定的热量比例代替部分煤粉进入锅炉，火电机组的实际燃煤消耗量为

$$m_t^{\text{coal,th}} = a_1 P_t^{\text{th,th}^2} + b_1 P_t^{\text{th,th}} + c_1 - m_t^{\text{NH}_3} Q_{\text{NH}_3} / Q_{\text{coal}} \quad (14)$$

式中： a_1 、 b_1 和 c_1 分别为火电机组的耗量特性系数； $P_t^{\text{th,th}}$ 为 t 时段火电机组的输出功率； Q_{NH_3} 和 Q_{coal} 分别为氨和煤的低位热值； $m_t^{\text{coal,th}}$ 和 $m_t^{\text{NH}_3}$ 分别为 t 时段火电机组的燃煤消耗量和掺氨量。

另外，定义 t 时段火电机组的掺氨比例 γ_t 为

$$\gamma_t = m_t^{\text{NH}_3} Q_{\text{NH}_3} / (m_t^{\text{coal,th}} Q_{\text{coal}}) \quad (15)$$

火电机组在运行过程中，其转子会发生损耗而增加成本。当机组处于 RPR 阶段时，该部分可予以忽略；但当处于 DPR 阶段时，转子轴系的交变热应力过大，造成机组本体的低周疲劳损耗和蠕变损耗，其损耗成本较大无法忽略。此外，根据损耗程度，DPR 分为 DPR1 和 DPR2。通过 Manson-Coffin 公式确定转子循环致裂周次 $L(P_t^{\text{th,th}})$ ，并结合机组购机成本计算损耗成本^[3]：

$$C_t^{\text{op,th}} = \begin{cases} 0, P_t^{\text{th,th}} \in P^{\text{RPR}} \\ c_{\text{unit}} \tau_1 / [2L(P_t^{\text{th,th}})], P_t^{\text{th,th}} \in P^{\text{DPR1}} \\ c_{\text{unit}} \tau_2 / [2L(P_t^{\text{th,th}})], P_t^{\text{th,th}} \in P^{\text{DPR2}} \end{cases} \quad (16)$$

式中： τ_1 和 τ_2 分别为 DPR1 和 DPR2 阶段的运行损耗系数； c_{unit} 为机组单位造价； $C_t^{\text{op,th}}$ 为 t 时段的火电机组损耗成本。

则火电机组的运行成本为

$$C_{th}^{th} = \sum_{t=1}^T (c_{coal} m_t^{coal,th} + C_t^{op,th}) \quad (17)$$

式中 c_{coal} 为煤的单价。

热电联产机组的运行成本只有燃煤成本:

$$m_t^{coal,chnp} = a_2 P_t^{th,chnp} + a_2 c_{v1}^2 H_t^{th,chnp} + 2a_2 c_{v1} P_t^{th,chnp} \cdot H_t^{th,chnp} + b_2 P_t^{th,chnp} + b_2 c_{v1} H_t^{th,chnp} + c_2 \quad (18)$$

$$C_{th}^{chnp} = c_{coal} \sum_{t=1}^T m_t^{coal,chnp} \quad (19)$$

式中: $m_t^{coal,chnp}$ 为 t 时段热电联产机组的燃煤消耗量; a_2 , b_2 , c_2 和 c_{v1} 为热电联产机组的特性系数; $P_t^{th,chnp}$ 和 $H_t^{th,chnp}$ 分别为热电联产机组在 t 时段输出的电功率和热功率。

3) 电转氨运行成本。

电转氨的运行成本包括原料成本和设备维护成本。本文电转氨所用的氮气和氢气分别由 PSA 和电解水过程制取, 这 2 个过程所需电能来自可再生能源, 其成本已计入风、光伏发电成本。由于合成氨催化剂在苛刻的反应条件下可以使用 15 年以上, 故催化剂的消耗成本可予以忽略^[24]。所以, 系统中仅有水作为原料是外购获得。

$$C_{P2A} = C_{H_2O} + C_{op, equ} \quad (20)$$

$$C_{H_2O} = c_{H_2O} \sum_{t=1}^T m_t^{H_2O} \quad (21)$$

式中: C_{H_2O} 和 $C_{op, equ}$ 分别为水成本和设备维护成本; $m_t^{H_2O}$ 为 t 时段水的消耗量; c_{H_2O} 为水的单价。

设备维护成本包括电解槽和合成氨工厂内设备以及制氮设备的维护成本。由于质子交换膜电解水制氢技术(proton-exchange membrane, PEM)的动态响应速度快、负荷范围广, 更适合与可再生能源发电系统耦合制氢, 故本文采用 PEM 技术, 其效率约为 67%^[22]。氮气需求规模一般在 3000m³/h 以下, 而且制氮设备需要适应可再生能源供电的间歇性, 所以采用 PSA 制氮^[25], 由于 PSA 维护成本往往很小, 因此予以忽略。设备维护成本可表示为

$$C_{op, equ} = c_{equ} \sum_{t=1}^T (P_t^{wt, P2A} + P_t^{pv, P2A}) \quad (22)$$

式中: c_{equ} 为电转氨设备的单位功率维护成本; $P_t^{wt, P2A}$ 和 $P_t^{pv, P2A}$ 分别为 t 时段风电和光伏提供给电解槽和合成氨工厂的总电能。

氮气和氮气的生成量分别为:

$$m_t^{P2A, NH_3} = (P_t^{wt, P2A} + P_t^{pv, P2A}) / w_{P2A} \quad (23)$$

$$m_t^{N_2} = (P_t^{wt, PSA} + P_t^{pv, PSA}) / w_{N_2} \quad (24)$$

式中: $P_t^{wt, PSA}$ 和 $P_t^{pv, PSA}$ 分别为 t 时段风电和光伏提供给 PSA 的电能; w_{P2A} 和 w_{N_2} 分别为电解槽与合成氨工厂协同制氨和 PSA 制取氮气的单位能耗; $m_t^{N_2}$ 为 t 时段制取的氮气质量。

4) 碳排放成本。

在引入掺氨燃烧改造机组后, 可以减少火电机组的 CO₂ 排放量, 其减少率等于基于热值的燃料替代率^[26]。则碳排放成本^[27]即为:

$$E = e_G \sum_{t=1}^T (P_t^{th, th} + P_t^{th, chnp}) + e_H \sum_{t=1}^T (H_t^{th, chnp}) \quad (25)$$

$$m_t^{CO_2} = q_{CO_2} (m_t^{coal, th} + m_t^{coal, chnp}) \quad (26)$$

$$C_{CO_2} = c_e (E - \sum_{t=1}^T m_t^{CO_2}) \quad (27)$$

式中: e_G 和 e_H 分别为供电单位碳排放配额和供热单位碳排放电量配额; E 为碳排放权配额; $m_t^{CO_2}$ 为 t 时段 CO₂ 排放量; q_{CO_2} 为单位燃煤燃烧所排放的 CO₂ 量; c_e 为碳排放配额惩罚成本系数。

5) 环境成本。

火电机组在运行过程中会向环境中排放 SO₂ 和 NO_x。虽然掺氨燃烧会带来 NO_x 排放风险, 但可以通过燃烧分级、燃烧组织等方式得到有效调控^[16], 故本文假设火电机组掺氨燃烧后的 NO_x 排放计算方式与纯煤燃烧状况下相同, 则环境成本^[28]的计算公式如下:

$$C_{ep} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J K [m_j (1 - \eta_j) m_t^{coal} / G_j] \quad (28)$$

式中: J 为应税污染物的种类; K 为每污染当量数需缴纳的税额; m_j 为单位煤燃烧时产生的第 j 种污染物质量; η_j 为环保装置脱除第 j 种污染物的效率; G_j 为第 j 种污染物的污染当量数。

2.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束:

$$P_t^{th, th} + P_t^{th, chnp} = P_t^{th} \quad (29)$$

$$H_t^{th, chnp} + H_t^{P2A} = H_t^{load} \quad (30)$$

式中 H_t^{load} 为 t 时段热负荷的需求功率。

2) 掺氨比例约束。

由于火电机组掺氨时, 会对内部燃烧工况产生一定影响, 因此需要对掺氨比例进行约束:

$$0 \leq \gamma_t \leq \gamma_{max} \quad (31)$$

式中： γ_{\max} 为允许的最大掺氨比例。目前，日本 IHI 公司在 1.2MW 试验炉上成功实现了热量比为 20% 的氨-煤掺混燃烧，且正规划在碧南火力发电厂 1000MW 燃煤机组上开展氨-煤混燃试验，计划在 2030 中期之前实现混燃 20% 的氨^[16]。所以，本文将掺氨比例上限取值为 20%。

3) 运行区域约束：

$$\begin{cases} P_t^{P2A} = P_t^{wt,P2A} + P_t^{wt,PSA} + P_t^{pv,P2A} + P_t^{pv,PSA} \\ P_{\min}^{G, chp} \leq P_t^{th, chp} \leq P_{\max}^{G, chp} - c_{v1} H_t^{th, chp} \\ H_t^{th, chp} \leq H_{\max}^{th, chp} \\ 50\% P_{\max}^{P2A} \leq P_t^{P2A} \leq P_{\max}^{P2A} \end{cases} \quad (32)$$

式中： $P_{\min}^{G, chp}$ 和 $P_{\max}^{G, chp}$ 分别为抽汽式热电联产机组在纯凝工况下的发电功率下限和上限； $H_{\max}^{th, chp}$ 为热电联产机组的供热功率上限； P_t^{P2A} 为电转氨设备的用电功率。

4) 燃煤机组爬坡约束：

$$\begin{cases} -\Delta P_{\max}^{th, th} \leq P_t^{th, th} - P_{t-1}^{th, th} \leq \Delta P_{\max}^{th, th} \\ -\Delta P_{\max}^{th, chp} \leq P_t^{th, chp} - P_{t-1}^{th, chp} \leq \Delta P_{\max}^{th, chp} \\ -\Delta H_{\max}^{th, chp} \leq H_t^{th, chp} - H_{t-1}^{th, chp} \leq \Delta H_{\max}^{th, chp} \end{cases} \quad (33)$$

式中 $\Delta P_{\max}^{th, th}$ ， $\Delta P_{\max}^{th, chp}$ 和 $\Delta H_{\max}^{th, chp}$ 分别为火电机组，热电联产机组供电和供热的最大允许爬坡功率。

5) 电转氨设备爬坡约束。

由于氨合成设备的运行灵活性有限，故本文设定电转氨设备在调度时段内增加和减少的爬坡速率上限分别设定为其容量的 10% 和 20%，并且每 4 个小时内只允许一次生产速率的变化^[22]。

$$\begin{cases} -20\% P_{\max}^{P2A} \leq P_t^{P2A} - P_{t-1}^{P2A} \leq 10\% P_{\max}^{P2A} \\ P_{t+1}^{P2A} = P_t^{P2A}, t \in [4i+1, 4i+3], i \in [0, 5] \in Z \end{cases} \quad (34)$$

3 算例分析

本文的综合能源系统包括供电、供热和能源转换设备。风电、光伏、火电机组的装机容量分别为 500MW、200MW 和 400MW，热电联产机组在纯凝工况下的最大发电功率为 212MW，电转氨的最大功率为 100MW。火电机组 RPR、DPR1 和 DPR2 阶段的最低负荷率分别为 50%、40% 和 30%。火电机组和热电联产机组的爬坡和耗量特性参数分别见附表 B1 和 B2^[29]。模型中的其他主要参数详见表 1^[3,13,18,22, 28, 30]。

算例中的负荷和风光发电功率数据选自新疆某地的冬季、过渡季和夏季的典型日场景，分别如

图 3、4 所示。

表 1 模型中的其他主要参数

Table 1 Other main parameters involved in the model

参数及单位	取值
制氨工厂用于供热的热释放比例 η_{P2A}	0.85
生成单位 NH_3 所释放的热功率 $\sigma/(MW \cdot h \cdot t^{-1})$	1.6044
风电/光伏/弃风光单位成本系数 $c_{wt}/[元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	0.03
风电/光伏/弃风光单位成本系数 $c_{pv}/[元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	0.04
风电/光伏/弃风光单位成本系数 $c_{ab}/[元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	0.15
氨的低位热值 $Q_{NH_3}/(kJ \cdot kg^{-1})$	18720
煤的低位热值 $Q_{coal}/(kJ \cdot kg^{-1})$	23022
煤的单价 $c_{coal}/(元 \cdot t^{-1})$	1000
水的单价 $c_{H_2O}/(元 \cdot t^{-1})$	5
DPR1 阶段的运行损耗系数 τ_1	1.2
DPR2 阶段的运行损耗系数 τ_2	1.5
机组单位造价 $(元 \cdot kW^{-1})$	3464
电转氨设备的单位功率维护成本 $c_{eqw}/[元 \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	46.48
PSA 制氨单位能耗 $w_{N_2}/[(MW \cdot h) \cdot t^{-1}]$	0.8
PSA 协同制氨单位能耗 $w_{P2A}/[(MW \cdot h) \cdot t^{-1}]$	11.49
供电单位碳排放配额 $e_G/[t \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	0.69135
供热单位碳排放配额 $e_H/[t \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	0.3
单位煤燃烧所排放的 CO_2 量 $q_{CO_2}/(t \cdot t^{-1})$	2.57
碳排放配额惩罚成本系数 $c_e/(元 \cdot t^{-1})$	100
每污染当量数需缴纳的税额 $K/(元 \cdot kg^{-1})$	5
单位煤燃烧产生的 SO_2 质量 $m_{SO_2}/(kg \cdot t^{-1})$	8.5
单位煤燃烧产生的 NO_x 质量 $m_{NO_x}/(kg \cdot t^{-1})$	7.4
环保装置脱除 SO_2 的效率 $\eta_{SO_2}/\%$	85
环保装置脱除 NO_x 的效率 $\eta_{NO_x}/\%$	85
SO_2 的污染当量数 G_{SO_2}/kg	0.95
NO_x 的污染当量数 G_{NO_x}/kg	0.95

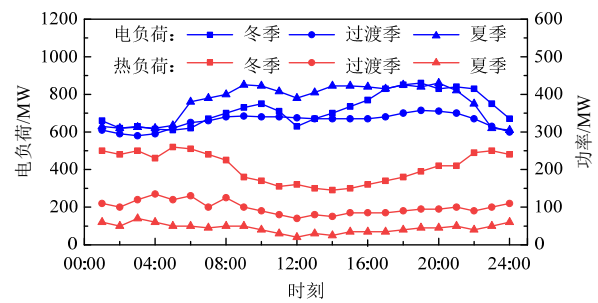


图 3 负荷

Fig. 3 Load

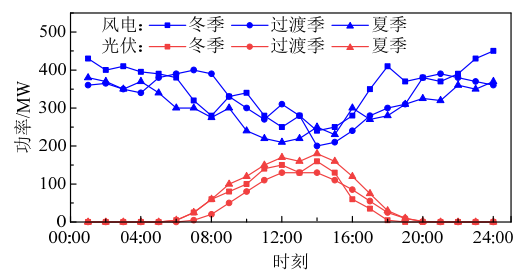


图 4 可再生能源发电功率

Fig. 4 Renewable energy power

3.1 模型构建

为分析考虑掺氨燃烧技术的电转氨耦合风-光-火系统双层优化调度模型的经济性和碳排放特性等, 本文设定以下3个模型进行对比分析。

模型1: 不含电转氨的风-光-火综合能源系统, 且风光发电全额消纳, 全部供给电负荷需求。

模型2: 不含电转氨的风-光-火综合能源系统, 采用双层优化调度模型。

模型3: 含电转氨的风-光-火综合能源系统, 采用双层优化调度模型。规定火电机组仅掺混电转氨生产的氨。

3.2 综合能源系统调度结果分析

本文通过 Python 软件调用 Gurobi 9.5.1 进行优化求解, 系统以 24h 为周期, 1h 为步长进行仿真, 各场景的运行成本和碳排放结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 采用双层优化调度模型后, 系统的经济性得到提高; 在引入电转氨后, 系统的弃能率和碳排放得到明显改善, 经济性取得进一步提高。

下面以冬季典型日的调度结果为例进行详细分析。表 3 是冬季典型日场景下不同模型的调度结果。从表 3 可以看出, 模型 2 的总成本比模型 1 减少了 26.75 万元(6.05%), 因为模型 1 全额消纳可再生能源, 导致火电机组进入深度调峰阶段, 增加了火电机组的损耗成本, 使燃煤机组的运行成本较模

型 2 增加了 43.18 万元。模型 3 的总成本较模型 2 减少了 4.38 万元(1.06%), 原因在于模型 3 引入电转氨系统后, 通过掺氨技术替代部分燃煤; 同时, 电转氨提供的部分热量, 也减少了供热煤耗。此外, 模型 3 的碳排放量也比模型 2 减少了 $0.19 \times 10^3 \text{t}$ (2.11%)。因此, 燃煤机组运行成本和碳排放成本分别减少了 16.55 万元(4.73%)和 1.54 万元(12.97%)。故电转氨的引入对于风-光-火系统在提升经济性和低碳性等方面均有促进作用。

模型 1—3 的电力调度结果如图 5 所示。对于燃煤机组的出力情况, 因为热电联产机组的单位发电成本较火电机组高, 所以在下层调度模型优先改变的是火电机组的出力情况, 而且本文规定热电联产机组不进行掺氨燃烧技术改造, 所以热电联产机组的供电功率在 3 个模型中的变化很小, 故在这里主要分析火电机组的出力情况。

表 2 不同典型日场景下的成本和碳排放量

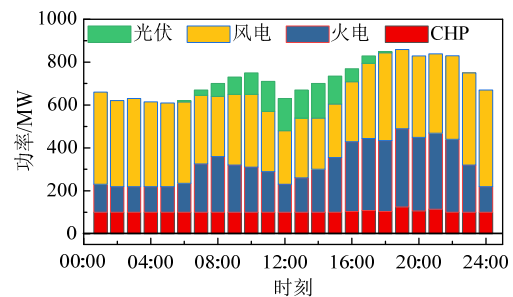
Table 2 Cost and carbon emissions under different typical daily scenarios

场景	模型	总成本/万元	碳排放量/ 10^3t	弃风率/%	弃光率/%
冬季	1	441.88	8.00	0	0
	2	415.13	8.99	14.97	9.99
	3	410.75	8.80	1.93	0.83
过渡季	1	407.12	6.90	0	0
	2	368.57	7.83	15.00	10.00
夏季	1	439.35	8.79	0	0
	2	431.26	9.72	15.00	10.00
	3	428.73	9.53	0.25	0.22

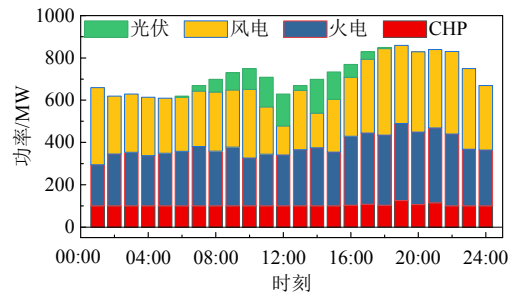
表 3 不同模型的成本和碳排放量对比

Table 3 Cost comparison under different scenarios

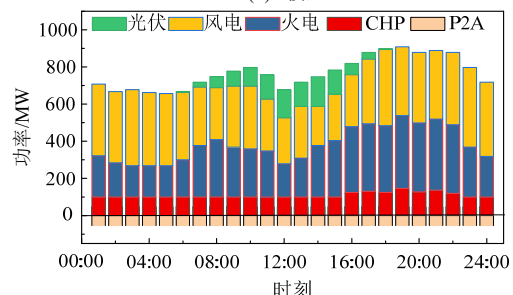
模型	总成本/万元	风光运行和弃风光成本/万元	燃煤机组运行成本/万元	电转氨运行成本/万元	碳排放成本/万元	环境成本/万元	碳排放量/ 10^3t
1	441.88	29.54	397.11	0.00	11.33	3.91	8.00
2	415.13	45.94	353.93	0.00	11.87	4.39	8.99
3	410.75	31.58	358.89	5.65	10.33	4.30	8.80



(a) 模型1



(b) 模型2



(c) 模型3

图 5 电力调度结果

Fig. 5 Power dispatching results

火电机组的出力情况如图 6 所示, 模型 1 中风光全额消纳时, 在 00:00—06:00 和 11:00—12:00 调度时间段内火电机组进入深度调峰阶段; 而模型 2、

3 中，由于采用双层优化调度模型，考虑了火电机组的利用率和出力平稳性，使得火电机组仅会进入常规调峰阶段，机组运行的安全性更高。可见，本文的双层优化调度模型能有效提高燃煤机组的运行稳定性和安全性。

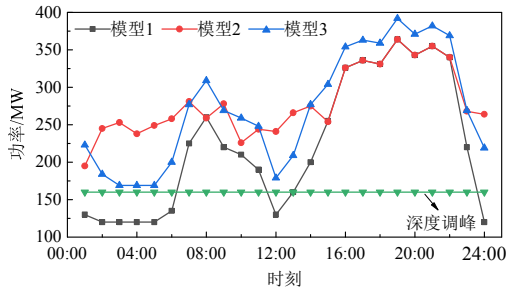
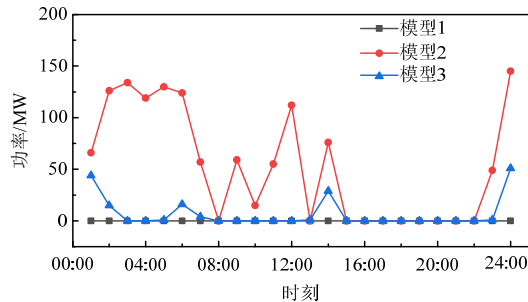


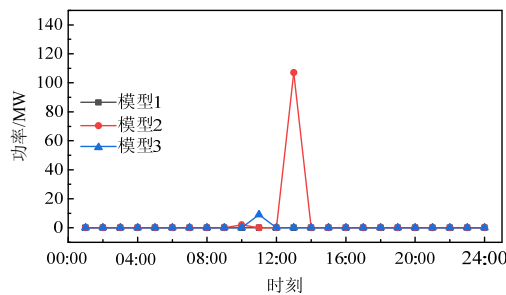
图 6 火电机组出力情况

Fig. 6 Output of thermal power units

对于可再生能源利用情况，由于模型 1 中选择风光全额消纳，所以其风光发电利用功率最大，无弃风光现象；相比较而言，模型 2、3 采用了双层优化调度模型，所以弃风光功率相对增多。3 个模型的弃能情况如图 7 所示。



(a) 弃风情况



(b) 弃光情况

图 7 弃能情况

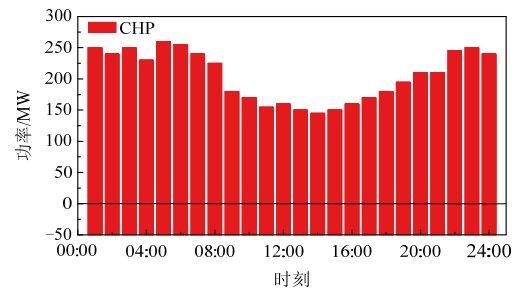
Fig. 7 Curtailment of renewable energy

从图 7 可以看出，采用系统双层优化调度模型后，由于综合考虑燃煤机组的利用率和稳定性，所以模型 2 在 01:00—7:00、09:00—13:00 和 23:00—24:00 的用电低谷且风电功率较大的时间段内选择了弃风，在 12:00—13:00 时段内选择了弃光，使得弃风率和弃光率分别达到了 14.97%和 9.99%，能源浪

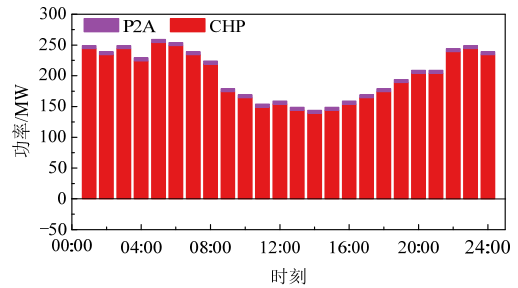
费严重。相比较而言，模型 3 中由于电转氨系统的引入，所以在 07:00—08:00、09:00—13:00 和 22:00—23:00 时间段内无弃风现象，在 12:00—13:00 时间段内无弃光现象，在模型 2 其他存在弃风光的时间段内弃风光功率也明显减少，使弃风率和弃光率分别下降到 1.93%和 0.83%，表明电转氨可以有效提升风-光-火系统中的风光消纳率。

模型 1—3 的热力调度结果如图 8 所示，由于在模型 1 和 2 中，供热需求完全由热电联产机组提供，故热力调度结果相同。而从图 8(b)可以看出，合成氨过程中释放热量提供了部分的供热需求，减少了热电联产机组的供热煤耗，表明电转氨系统对于热力调度的经济性和环保性也起到了改善的作用。

为进一步分析电转氨的引入对风-光-火系统产生的影响，图 9 给出了电转氨系统的产氨和供热



(a) 模型1和2



(b) 模型3

图 8 热力调度结果

Fig. 8 Thermal dispatching results

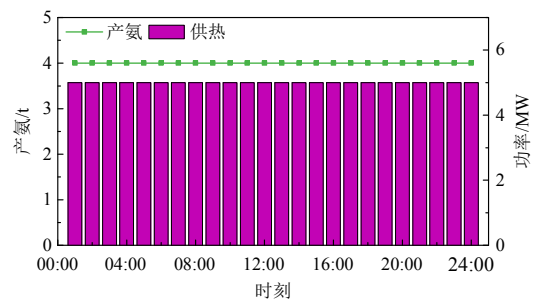


图 9 电转氨产氨量和供热情况

Fig. 9 Ammonia production and heat supply of power-to-ammonia

情况以分析其对系统经济性的影响。从图9可以看出,电转氨在调度时间段内,共计生产了96.00t氨以提供给火电机组,同时还提供热量总计120.00MW·h,表明电转氨为电力系统提供氨以直接减少供电煤耗的同时,还为热力系统降低部分供热量以间接减少供热煤耗,所以引入电转氨可以明显改善综合能源系统的经济性和低碳性。

4 结论

1) 本文构建的双层优化调度模型综合考虑燃煤机组出力、风光消纳和电转氨运行的经济性和稳定性,在改善风-光-火综合能源系统中燃煤机组运行的安全性和稳定性的同时,实现风光的合理消纳。在冬季、过渡季和夏季典型日场景下,系统的运行成本比不采用分层优化模型时分别降低6.05%、9.47%和1.84%。

2) 在耦合电转氨和火电机组掺氨燃烧技术后,弃风光现象得到明显改善,系统总成本降低的同时,碳排放量分别降低2.11%、2.81%和1.95%,实现了风光火综合能源系统运行经济性和环保性的双赢。

参考文献

- [1] LI Jidong, CHEN Shijun, WU Yuqiang, et al. How to make better use of intermittent and variable energy? A review of wind and photovoltaic power consumption in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110626.
- [2] ZHU Jianzhong, CUI Xiaobo, NI Weidong. Model predictive control based control strategy for battery energy storage system integrated power plant meeting deep load peak shaving demand[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 46: 103811.
- [3] 李军徽, 张嘉辉, 穆钢, 等. 储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 3961-3969.
LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Hierarchical optimization scheduling of deep peak shaving for energy-storage auxiliary thermal power generating units[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 3961-3969(in Chinese).
- [4] 徐玉杰, 陈海生, 刘佳, 等. 风光互补的压缩空气储能与发电一体化系统特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(20): 88-95.
XU Yujie, CHEN Haisheng, LIU Jia, et al. Performance analysis on an integrated system of compressed air energy storage and electricity production with wind-solar complementary method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(20): 88-95(in Chinese).
- [5] CAREW N, WARNOCK W, BAYINDIR R, et al. Analysis of pumped hydroelectric energy storage for large-scale wind energy integration[J]. *The International Journal of Electrical Engineering & Education*, 2020: 1-14. doi: 10.1177/0020720920928456
- [6] DJELAILIA O, KELAIAlIA M S, LABAR H, et al. Energy hybridization photovoltaic/diesel generator/pump storage hydroelectric management based on online optimal fuel consumption per kWh[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 44: 1-15.
- [7] WANG Xuejie, ZHAO Huiru, LU Hao, et al. Decentralized coordinated operation model of VPP and P2H systems based on stochastic-bargaining game considering multiple uncertainties and carbon cost[J]. *Applied Energy*, 2022, 312: 118750.
- [8] LIN Haiyang, WU Qiuwei, CHEN Xinyu, et al. Economic and technological feasibility of using power-to-hydrogen technology under higher wind penetration in China[J]. *Renewable Energy*, 2021, 173: 569-580.
- [9] BARTHELEMY H, WEBER M, BARBIER F. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11): 7254-7262.
- [10] MORADI R, GROTH K M. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(23): 12254-12269.
- [11] XU Da, ZHOU Bin, WU Qiuwei, et al. Integrated modelling and enhanced utilization of power-to-ammonia for high renewable penetrated multi-energy systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(6): 4769-4780.
- [12] WANG Bowen, NI Meng, JIAO Kui. Green ammonia as a fuel[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(15): 1530-1534.
- [13] 李佳蓉, 林今, 肖晋宇, 等. 面向可再生能源消纳的电化工(P2X)技术分析及其能耗水平对比[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(1): 86-96.
LI Jiarong, LIN Jin, XIAO Jinyu, et al. Technical and energy consumption comparison of Power-to-chemicals (P2X) technologies for renewable energy integration[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(1): 86-96(in Chinese).
- [14] ZHAO Yun, SETZLER B P, WANG Junhua, et al. An efficient direct ammonia fuel cell for affordable

- carbon-neutral transportation[J]. *Joule*, 2019, 3(10): 2472-2484.
- [15] CHEN Liang, WANG Chunbo, WANG Wenjing. Effect of ammonia co-firing on heat transfer, safety, and economy of coal-fired boilers[J]. *Fuel*, 2023, 334: 126649.
- [16] 徐静颖, 朱鸿玮, 徐义书, 等. 燃煤电站锅炉氨燃烧研究进展及展望[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2022, 50(7): 55-65.
XU Jingying, ZHU Hongwei, XU Yishu, et al. Research progress and prospect of ammonia cofiring in utility coal-fired boiler[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2022, 50(7): 55-65(in Chinese).
- [17] 谭厚章, 周上坤, 杨文俊, 等. 氨燃料经济性分析及煤氨混燃研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(1): 181-190.
TAN Houzhang, ZHOU Shangkun, YANG Wenjun, et al. Economic analysis of ammonia and research progress of coal-ammonia Co-firing[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(1): 181-190(in Chinese).
- [18] ZHANG Guangming, WANG Wei, CHEN Zhenyu, et al. Modeling and optimal dispatch of a carbon-cycle integrated energy system for low-carbon and economic operation[J]. *Energy*, 2022, 240: 122795.
- [19] WANG Xi, LIU Fang, WANG Yunling, et al. Optimized dispatching based on wind-photovoltaic-hydropower-thermal-bundled strategy[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 467: 012038.
- [20] 张心洁, 葛少云, 刘洪, 等. 智能配电网综合评估体系与方法[J]. *电网技术*, 2014, 38(1): 3642-3648.
ZHANG Xinjie, GE Shaoyun, LIU Hong, et al. Comprehensive assessment system and method of smart distribution grid[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(1): 3642-3648(in Chinese).
- [21] 国家发展改革委, 国家能源局. 清洁能源消纳行动计划(2018-2020 年)[EB/OL]. (2018-10-30)[2022-10-25]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201812/W020190905495739358481.pdf>.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Clean energy consumption action plan(2018-2020)[EB/OL]. (2018-10-30)[2022-10-25]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201812/W020190905495739358481.pdf>(in Chinese).
- [22] PALYS M J, KUZNETSOV A, TALLAKSEN J, et al. A novel system for ammonia-based sustainable energy and agriculture: Concept and design optimization[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2019, 140: 11-21.
- [23] 何文波. 火电厂富氧燃烧项目价值评估与发展战略建议[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
HE Wenbo. Oxy-fuel project evaluation and development strategy recommendations of coal-fired power plant[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015(in Chinese).
- [24] 刘化章, 罗雄军. 氨合成催化剂 100 年: 实践、启迪和挑战(上)[J]. *氮肥技术*, 2015, 36(6): 13-20.
LIU Huazhang, LUO Xiongjun. Ammonia synthesis catalyst for 100 years: Practice, enlightenment and challenge(the first)[J]. *Nitrogenous Fertilizer Technology*, 2015, 36(6): 13-20(in Chinese).
- [25] 吕新萍. 深冷制氮与变压吸附制氮的比较分析[J]. *中国水运(下半月)*, 2017, 17(8): 312-314.
LV Xinping. Comparative analysis of cryogenic nitrogen production and pressure swing adsorption nitrogen production[J]. *China Water Transport*, 2017, 17(8): 312-314(in Chinese).
- [26] XU Yishu, WANG Huakun, LIU Xiaowei, et al. Mitigating CO₂ emission in pulverized coal-fired power plant via co-firing ammonia: A simulation study of flue gas streams and exergy efficiency[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 256: 115328.
- [27] 崔杨, 曾鹏, 仲悟之, 等. 考虑富氧燃烧技术的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 592-607.
CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electro-gas-thermal integrated energy system based on oxy-combustion technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 592-607(in Chinese).
- [28] 叶泽, 李湘旗, 姜飞, 等. 考虑最优弃能率的风光火储联合系统分层优化经济调度[J]. *电网技术*, 2021, 45(6): 2270-2279.
YE Ze, LI Xiangqi, JIANG Fei, et al. Hierarchical optimization economic dispatching of combined wind-PV-thermal-energy storage system considering the optimal energy abandonment rate[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(6): 2270-2279(in Chinese).
- [29] 罗毅, 邱实. 基于负荷侧响应的含储热热电联产的风电消纳模型[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(2): 90-96.
LUO Yi, QIU Shi. A wind power consumption model of CHP with thermal energy storage based on demand response[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2021, 42(2): 90-96(in Chinese).

[30] TAN Qinliang, DING Yihong, ZHENG Jin, et al. The effects of carbon emissions trading and renewable portfolio standards on the integrated wind-photovoltaic-thermal power-dispatching system: real case studies in China[J]. Energy, 2021, 222: 119927.

附录A 式(5)中各指标权重系数计算过程

A.1 计算主观权重

1) 聘请3位专家采用1~9标度法对3个指标之间相互的直接影响程度进行经验判断,直接影响判断序列为

$$\begin{bmatrix} 0 & 5 & 7 \\ 5 & 0 & 7 \\ 1 & 9 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

2) 计算以各指标为准则的归一化特征向量,将其合并为权重矩阵,对角线元素补上0,即可得到DEMATEL方法中的直接影响矩阵 W_d :

$$\begin{bmatrix} 0 & 5/14 & 1/2 \\ 5/6 & 0 & 1/2 \\ 1/6 & 9/14 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A2})$$

3) 对直接影响矩阵 W_d 求极限,得到稳定的综合影响权重矩阵,矩阵各行元素值趋于一致,该稳定值即为所对应的各指标的主观权重:

$$[0.2953 \quad 0.3990 \quad 0.3057] \quad (\text{A3})$$

A.2 计算客观权重

1) 采用反熵权法计算客观权重。聘请5位专家对宏观需求指标的初始权重进行打分,得到初始判断矩阵 X :

$$\begin{bmatrix} 0.36 & 0.28 & 0.31 & 0.37 & 0.32 \\ 0.34 & 0.48 & 0.38 & 0.25 & 0.27 \\ 0.30 & 0.24 & 0.31 & 0.38 & 0.41 \end{bmatrix} \quad (\text{A4})$$

2) 根据式(A5)和式(A6)计算得到各指标的客观权重值(式(A7)):

$$h_i = -\sum_{j=1}^5 r_{ij} \ln(1-r_{ij}) \quad (\text{A5})$$

$$\omega_{O_i} = h_i / \sum_{i=1}^3 h_i \quad (\text{A6})$$

$$[0.3236 \quad 0.3431 \quad 0.3332] \quad (\text{A7})$$

A.3 计算组合权重

在已知各宏观需求指标的主、客观权重向量的基础上,根据式(A8)和(A9)计算各指标的组合权重:

$$\begin{cases} \alpha_i = \omega_{S_i} / (\omega_{S_i} + \omega_{O_i}) \\ \beta_i = \omega_{O_i} / (\omega_{S_i} + \omega_{O_i}) \end{cases} \quad (\text{A8})$$

$$\omega_i = \frac{\alpha_i \omega_{S_i} + \beta_i \omega_{O_i}}{\sum_{i=1}^3 (\alpha_i \omega_{S_i} + \beta_i \omega_{O_i})} \quad (\text{A9})$$

最终权重值为

$$[0.3091 \quad 0.3719 \quad 0.3190] \quad (\text{A10})$$

附录B 机组参数

表B1 火电机组参数

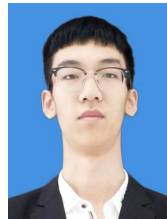
Table B1 Parameters of thermal power unit

参数	数值
发电功率上限 P_{\max}^{th} /MW	400
发电功率下限 P_{\min}^{th} /MW	120
最大允许爬坡功率 $\Delta P_{\max}^{\text{th}}$ /(MW·h)	150
a_1 /(t·MW ⁻²)	0.000 130 7
b_1 /(t·MW ⁻¹)	0.232 22
c_1 /t	16.007 26

表B2 热电联产机组参数

Table B2 Parameters of CHP unit

参数	数值
纯凝工况下发电功率上限 $P_{\max}^{\text{G,Chp}}$ /MW	212
纯凝工况下发电功率下限 $P_{\min}^{\text{G,Chp}}$ /MW	100
供热功率上限 $H_{\max}^{\text{th,Chp}}$ /MW	300
a_2 /(t·MW ⁻²)	0.000 171 324
b_2 /(t·MW ⁻¹)	0.270 548 9
c_2 /t	11.537 43
c_{v1}	0.21
供电最大允许爬坡功率 $\Delta P_{\max}^{\text{th,Chp}}$ /(MW·h)	60
供热最大允许爬坡功率 $\Delta H_{\max}^{\text{th,Chp}}$ /(MW·h)	60



袁文腾

在线出版日期: 2023-02-27。

收稿日期: 2022-11-21。

作者简介:

袁文腾(1998),男,硕士研究生,研究方向为综合能源系统规划及运行优化, ywenteng@163.com;

陈亮(1989),男,博士,讲师,硕士生导师,研究方向为CO₂捕集、CO₂转化利用、燃烧及污染物控制, chenliang@ncepu.edu.cn;

*通信作者: 王春波(1973),男,博士,教授,博士生导师,主要从事综合能源系统、CO₂捕集及高值化利用、能源高效清洁利用等方面的研究工作, hdwchb@126.com;

王中瑞(1997),男,博士研究生,研究方向为综合能源系统规划及运行优化, 826611726@qq.com。

(编辑 朱腾翌)