

考虑碳捕集技术的电力系统双层优化配置

李国庆¹,王冲¹,雷顺波²,王潇¹

(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;2. 香港中文大学(深圳)理工学院,广东 深圳 518172)

摘要:碳捕集与封存技术是实现“双碳”目标的有效手段,在考虑碳交易机制的基础上提出了一种含电转气、燃气轮机、碳捕集系统、风电场联合运行的低碳经济双层优化配置模型。上层优化目标为最小化系统碳相关成本;下层优化目标为最小化系统运行成本,其中考虑了系统运行约束,决策变量包括发电机组有功出力、电转气功率、碳捕集装配。为求取所提双层优化模型的最优均衡解,利用KKT条件将双层优化问题转换为单层优化问题,再利用McCormick将二次规划单层问题转换成可直接求解的混合整数线性优化问题,并利用CPLEX求解器对模型进行求解。最后,对IEEE 30节点系统进行仿真,验证了所提模型和方法的有效性,同时采用双层模型在一定程度上减少了系统总成本,提高了减排率。

关键词:碳捕集与封存;双层优化;KKT条件;低碳经济;阶梯式碳交易模型

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202206010

0 引言

21世纪以来,全球变暖现象加剧,极端天气频发,国际社会对于气候问题愈发重视,能源发展面临着资源与环境的双重压力。2016年我国加入了《巴黎气候变化协定》,从限制碳排放、增加非化石能源比重、增加森林蓄积量3个方面做出了承诺。在2020年第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话中,习近平总书记提出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值、努力争取2060年前实现碳中和”的能源转型目标,并在气候雄心峰会上提出了具体指标:2030年国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上,非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右。建设清洁低碳、安全高效的新一代能源系统是我国新一轮能源革命的主要目标,而能源转型是实现这一目标的关键步骤^[1]。

相较于其他行业,电力行业的碳排放比重较大,但电力行业从技术经济角度更容易实现低碳化,因此电力行业的深度减排成为实现“双碳”目标的关键。近几年来,国内外研究人员对电力行业的碳减排方式进行了大量的研究,目前主要可以分为如下2种方式:一是高比例可再生能源的扩张,二是多种低碳技术的组合应用^[2-3]。文献[4]围绕碳中和背景下的低碳化技术研究进行分析,从多个行业、多个能源主体角度阐述了低碳技术的应用。碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)技术作为应对气候变化的重要碳移除手段^[5],技术潜力巨大,受到世

界各国的高度重视。我国正面临着严重的二氧化碳排放压力并一直致力于发展CCS技术。在燃煤电厂加装碳捕集设备可以捕获二氧化碳并将其运输到储存点进行存放与利用,从而可以捕获约90%的碳排放量,在充分利用现有机组的情况下使其可以实现低碳发电,一定程度上减少了现有化石燃料机组的搁浅成本以及对可再生能源发电的大量投资。从系统规划角度而言,碳捕集技术的应用使得在减少碳排放的同时,必然引起电厂投资建设成本的增加,这就要求根据实际需求和国家相关减排政策进行电力系统规划工作,在经济运行成本和碳减排指标之间做出权衡;从运行层面而言,碳捕集装置的结构特征和运行机制使其具有灵活运行的潜力,从而赋予了常规机组全新的运行模式,但是这也将给电力系统运行调度工作带来新的问题和挑战。

目前,国内外学者对碳捕集技术的运行优化进行了大量的研究。文献[6-7]对有关碳捕集技术的最新进展进行了讨论;文献[8]从国内碳捕集商业化发展潜力的角度进行分析,得到了发展碳捕集技术的合适时机;文献[9]提出将电转气(power to gas, P2G)和碳捕集电厂作为整体系统,建立P2G-碳捕集电厂协调优化模型;文献[10]提出了P2G协同含碳捕集与垃圾焚烧虚拟电厂的优化调度模型,其具备削峰填谷和可再生能源消纳的效用;文献[11]在源侧形成碳捕集电厂综合灵活运行方式,进而与风电协调配合,荷侧调用不同方式的需求响应,构建源荷协调的日前-日内-实时三阶段低碳经济调度模型;文献[12]提出了一种以储碳设备为枢纽连接碳捕集电厂和P2G设备的运行模式,建立了一种基于分时能源价格的综合需求响应机制;文献[13]将储能与碳捕集技术相结合提升了风电机组与传统机组的灵活性。在电力系统规划配置方面,文献[14]提出了

收稿日期:2021-10-09;修回日期:2022-01-22

在线出版日期:2022-06-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907050)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51907050)

一种基于阶梯式碳交易机制的综合能源系统多阶段规划方法,对各阶段的设备配置进行最优决策;文献[15]在风氢耦合的基础上考虑了碳捕集系统,构建了风-氢低碳能源系统优化配置模型,得到了系统容量的最优配置方案。目前相关文献对于碳捕集与P2G联合运行研究较多,但其中大多数是以日前优化调度为主,针对碳捕集系统优化配置的研究较少,且大多采用仅单一考虑碳排放量或者系统运行成本的单层模型。

为此,本文从低碳角度进行分析,引入了阶梯式碳交易机制。从政策角度而言,系统在一定程度上需要满足社会要求的减排目标,因此上层模型为碳相关成本,但在长时间尺度下,系统运行成本比重也较大,需要满足运行层面上的经济性。燃气轮机相较于燃煤机组碳排放量小,但能耗成本高,在满足系统运行成本最小的情况下,系统必然会优先选择燃煤机组出力,导致系统碳排放量增加,碳相关成本也随之增加。因此,如何在保证系统运行成本较低的情况下碳相关成本也较低,就需要采用双层模型进行分析。为此,本文在长时间尺度下,考虑直流潮流约束,研究计及P2G电站制甲烷与碳捕集技术相结合的优化配置。首先建立碳相关成本-系统运行成本的双层优化模型;然后利用KKT条件将双层优化问题转换为混合整数二次规划(mix-integer quadratic programming, MIQP)问题,进而对KKT条件进行线性化处理,以便求解模型的最优均衡解;最后,对IEEE 30节点系统进行仿真验证,并对所求结果进行详细分析,验证了所提模型的有效性。

1 长时间尺度下的发电厂碳捕集配置模型

本文采用双层模型,上层采用碳捕集设备优化配置使得碳相关成本最小,下层以系统综合运行成本最小为优化目标。

1.1 碳捕集系统模型

1) 碳捕集系统造价。

碳捕集系统的造价成本主要与装置的年捕集能力、机组的运行水平有关,具体如下:

$$S_k = \lambda_i T_i \sigma_i \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: S_k 为碳捕集装置 k 的年捕集最大容量; λ_i 为机组 i 的装机容量; T_i 为机组 i 的平均发电小时数; σ_i 为机组 i 的碳排放强度。

碳捕集装置的造价与年捕集最大容量呈线性关系,具体如下:

$$C_{\text{CON}} = \sum_{k=1}^{N_k} (m_k + n_k S_k) \quad (2)$$

式中: C_{CON} 为整个系统碳捕集装置的造价; m_k 、 n_k 为碳捕集装置 k 的投资系数; N_k 为碳捕集装置的数量。

本文针对不同使用年限的碳捕集设备需要根据利率与碳捕集系统的寿命将碳捕集系统造价折算成等季度值,即:

$$C_{\text{CONseason}} = \frac{\gamma C_{\text{CON}}}{1 - (1 + \gamma)^{-n}} \quad (3)$$

式中: $C_{\text{CONseason}}$ 为整个系统碳捕集装置造价的等季度值; γ 为折旧率; n 为碳捕集系统运行的季度值。

2) 维护成本。

维护成本与造价费用相关,即:

$$C_M = K_M C_{\text{CON}} \quad (4)$$

式中: C_M 为整个系统碳捕集装置的维护成本; K_M 为碳捕集装置的维护系数。

3) 运行成本。

碳捕集系统的能耗与机组碳排放量相关^[16],具体如下:

$$M_{\text{FC}} = \sum_{i=1}^{N_i} \sigma_i P_{F,i} \quad (5)$$

$$M_{\text{CCSC}} = \sum_{i=1}^{N_i} w_i \sigma_i P_{F,i} \quad (6)$$

式中: M_{FC} 为系统产生的二氧化碳量; N_i 为机组数; σ_i 为机组 i 的碳排放强度; $P_{F,i}$ 为机组 i 的有功出力; M_{CCSC} 为装配了碳捕集装置的机组产生的二氧化碳量; w_i 为表示机组 i 碳捕集装置装配情况的0-1变量, $w_i = 1$ 表示装配了碳捕集装置, $w_i = 0$ 表示未装配碳捕集装置。

碳捕集系统的系统能耗由两部分构成,其中一部分是固定的基本能耗,另一部分是碳捕集装置捕集二氧化碳时产生的能耗,即:

$$P_{\text{CCS}} = P_B + P_{\text{ON}} \quad (7)$$

$$P_{\text{ON}} = K_{\text{CCS}} M_{\text{capture}} \quad (8)$$

$$M_{\text{capture}} = \eta_{\text{CCS}} M_{\text{CCSC}} \quad (9)$$

式中: P_{CCS} 为碳捕集装置的系统能耗; P_B 为碳捕集装置的基本能耗; P_{ON} 为碳捕集装置的运行能耗; K_{CCS} 为碳捕集装置捕集单位二氧化碳所消耗的电功率; M_{capture} 为碳捕集装置捕获得的二氧化碳量; η_{CCS} 为碳捕集效率。

因此,碳捕集系统运行成本可以表示为:

$$C_{\text{ON}} = P_{\text{CCS}} S_E \quad (10)$$

式中: C_{ON} 为整个系统碳捕集装置的运行成本; S_E 为单位电价。

4) 传输与封存成本。

$$C_s = C_{\text{TRANS}} + C_{\text{STORE}} \quad (11)$$

$$C_{\text{TRANS}} = [S_E (W_{\text{comp}} + W_{\text{pump}}) + L \alpha_{\text{land}} C_{\text{per}}] M_{\text{capture}} \quad (12)$$

$$C_{\text{STORE}} = K_{\text{store}} \sqrt{\frac{M_{\text{capture}} - M_{\text{out}}}{280}} \quad (13)$$

式中: C_s 为传输与封存成本; C_{TRANS} 为传输成本; C_{STORE} 为封存成本; W_{comp} 为碳捕集后将每吨二氧化碳

压缩至管道所需要消耗的电量; W_{pump} 为将每吨二氧化碳从管道泵入储碳设备所需要消耗的电量; L 为传输管道长度; α_{land} 为地形因子; C_{per} 为每吨二氧化碳传输 1 km 所需的费用; K_{store} 为封存系数; M_{out} 为碳封存设备的碳输出量。

1.2 碳交易模型

碳交易机制将碳排放视为一种可以自由交易的商品,通过碳排放权交易来实现控制碳排放总量^[17]。

1) 碳排放配额。

在碳交易机制下,监管部门为系统内各碳排放源分配碳排放配额,根据国家相关政策,各类型机组的碳排放配额不同。系统的碳排放配额可以表示为:

$$M_B = \sum_{i=1}^{N_i} \xi_i P_{F,i} \quad (14)$$

式中: M_B 为系统的碳排放配额; ξ_i 为机组 i 在单位耗电量内排放二氧化碳的基准值。

系统实际碳排放交易额 M_{real} 为:

$$M_{\text{real}} = M_{\text{FC}} - M_{\text{capture}} - M_B \quad (15)$$

2) 阶梯式碳交易机制。

阶梯式碳交易机制相较于传统的碳交易机制,对碳排放量有着更严格的控制。阶梯式碳交易机制根据碳排放量划分成若干个区间,随着碳排放量的增加,其相应的单位碳交易成本也会上升^[18-19]。

由系统的实际碳排放量可以得到阶梯式碳交易成本为:

$$C_{\text{tax}} = \begin{cases} S_{\text{tax}} M_{\text{real}} & M_{\text{real}} \leq L \\ S_{\text{tax}} [M_{\text{real}} (1 + \gamma_{\text{tax}}) - L \gamma_{\text{tax}}] & L \leq M_{\text{real}} \leq 2L \\ S_{\text{tax}} [M_{\text{real}} (1 + 2\gamma_{\text{tax}}) - 3L \gamma_{\text{tax}}] & 2L \leq M_{\text{real}} \leq 3L \\ S_{\text{tax}} [M_{\text{real}} (1 + 3\gamma_{\text{tax}}) - 6L \gamma_{\text{tax}}] & 3L \leq M_{\text{real}} \leq 4L \\ S_{\text{tax}} [M_{\text{real}} (1 + 4\gamma_{\text{tax}}) - 10L \gamma_{\text{tax}}] & M_{\text{real}} \geq 4L \end{cases} \quad (16)$$

式中: C_{tax} 为系统的阶梯式碳交易成本; S_{tax} 为系统的碳交易基准价格; γ_{tax} 为碳税增长率; L 为碳排放总量区间长度。

1.3 P2G 装置模型

P2G 装置产生的天然气与电功率的关系为:

$$V_{\text{P2G}} = \sum_{j=1}^{N_j} \frac{\eta_{\text{P2G}} P_{\text{P2G},j}}{H_g} \quad (17)$$

式中: N_j 为 P2G 装置数; V_{P2G} 为 P2G 装置产生的天然气量; η_{P2G} 为 P2G 装置的转换效率; $P_{\text{P2G},j}$ 为 P2G 装置 j 消耗的电功率; H_g 为天然气的热值,取 39 MJ / m³。

P2G 碳源由碳捕集捕获的 CO₂ 提供,P2G 电站仅考虑其运维成本,包含人员管理、机组启停等,具体如下:

$$C_{\text{P2G}} = \sum_{j=1}^{N_j} K_{\text{P2G}} P_{\text{P2G},j} \quad (18)$$

式中: C_{P2G} 为 P2G 的运维成本; K_{P2G} 为 P2G 的运维成

本系数,取 140 元 / (MW · h)^[20]。

碳封存设备输出的二氧化碳体积与甲烷的体积相同,即:

$$V^{\text{CO}_2} = V^{\text{CH}_4}$$

式中: V^{CO_2} 、 V^{CH_4} 分别为二氧化碳与甲烷的体积。

碳封存设备的碳输出量 M_{out} 表示如下:

$$M_{\text{out}} = \rho_c V^{\text{CH}_4} = \rho_c V_{\text{P2G}} \quad (19)$$

式中: ρ_c 为二氧化碳的密度。

P2G 制甲烷获得的收益 C_{CH_4} 表示如下:

$$C_{\text{CH}_4} = S_{\text{gas}} V_{\text{P2G}} \quad (20)$$

式中: S_{gas} 为单位天然气价格。

1.4 目标函数

上层问题优化目标为系统碳相关成本最小,由如下 3 个部分组成:碳捕集设备相关费用、P2G 制甲烷收益与运维成本、碳排放权成本,其中碳捕集设备相关费用包括设备投资费用、维护费用、运行费用、传输与封存费用。上层目标函数 f_1 如下:

$$f_1 = \min (C_{\text{CONseason}} + C_M + C_{\text{ON}} + C_S + C_{\text{tax}} - C_{\text{CH}_4} + C_{\text{P2G}}) \quad (21)$$

上层问题的约束包括减排率指标(在规定的时间内达到计划的减排率)与碳捕集装置数量约束(每台火电 / 燃气机组最多只能配备 1 台碳捕集装置,且总数量不超过设定的台数 N_k),其中减排率指标为:

$$\lambda_c \geq 1 - \frac{M_{\text{capture}}}{M_{\text{FC}}} \quad (22)$$

式中: λ_c 为规定的减排率指标。

下层问题优化目标为系统综合运行成本最小,包括机组运行成本与弃风成本,目标函数 f_2 如下:

$$f_2 = \min (C_F + C_{\text{WIND}}) \quad (23)$$

$$C_F = \sum_{i=1}^{N_i} (a_i P_{F,i} + b_i) \quad (24)$$

$$C_{\text{WIND}} = c_{\text{curt}} (P_{\text{wind}}^{\text{pre}} - P_{\text{wind}}) \quad (25)$$

式中: C_F 为机组运行成本; C_{WIND} 为弃风成本; a_i 、 b_i 为机组 i 的耗量特性曲线参数; c_{curt} 为弃风惩罚系数; $P_{\text{wind}}^{\text{pre}}$ 为风电预测出力; P_{wind} 为风电实际出力。

下层问题约束具体如下。

1) P2G 装置约束。

$$P_{\text{P2G},j}^{\min} \leq P_{\text{P2G},j,t} \leq P_{\text{P2G},j}^{\max} \quad (26)$$

式中: $P_{\text{P2G},j}^{\max}$ 、 $P_{\text{P2G},j}^{\min}$ 分别为 P2G 装置 j 出力的上、下限; $P_{\text{P2G},j,t}$ 为 t 时刻 P2G 装置 j 的出力。

2) 机组出力约束。

$$P_{F,i}^{\min} + w_i P_B \leq P_{F,i,t} \leq P_{F,i}^{\max} - w_i P_B \quad (27)$$

式中: $P_{F,i}^{\max}$ 、 $P_{F,i}^{\min}$ 分别为机组 i 出力的上、下限; $P_{F,i,t}$ 为 t 时刻机组 i 的出力。

3) 风电出力约束。

$$0 \leq P_{\text{wind}} \leq P_{\text{wind}}^{\text{pre}} \quad (28)$$

4) 直流潮流约束。

$$\begin{cases} \theta_n^{\min} \leq \theta_n \leq \theta_n^{\max} \\ P_{nl}^{\min} \leq P_{nl} \leq P_{nl}^{\max} \\ -\sum_l P_{nl} - \sum_g P_{ng} - \sum_d P_{nd} = 0 \\ B_l(\theta_n - \theta_m) - P_{nl} = 0 \end{cases} \quad (29)$$

式中: θ_m 、 θ_n 分别为节点 m 、 n 电压相角; $\theta_n^{\max}$ 、 $\theta_n^{\min}$ 分别为节点 n 电压相角的上、下限; P_{nl} 为节点 n 所连线路 l 上的功率; $P_{nl}^{\max}$ 、 $P_{nl}^{\min}$ 分别为节点 n 所连线路 l 上的功率上、下限; P_{ng} 为节点 n 上发电机 g 发出的功率; P_{nd} 为节点 n 上的负荷 d 功率; B_l 为线路 l 的等效电纳。

2 求解过程

本文建立的碳相关成本-系统运行成本双层优化模型无法直接进行求解。因此,本文先采用拉格朗日乘子法将下层优化问题转化为 KKT 最优条件,使得下层模型转化为上层问题的附加条件,从而将双层优化问题转化为单层优化问题;再利用大 M 法将 KKT 最优条件线性化;最后用强对偶理论将问题转化为较易求解的 MIQP 模型。本文采用 CPLEX 求解器进行求解,其可以显著提高运算效率。具体求解过程见附录 A。

本文需要将上述模型转化为混合整数线性模型,因此需要对式(16)进行线性化处理,式(16)为5个区段的分段函数,现取6个分段点 d_1 、 d_2 、 $\dots$ 、 d_6 ,添加6个连续型辅助变量 x_1 、 x_2 、 $\dots$ 、 x_6 和5个二进制型辅助变量 y_1 、 y_2 、 $\dots$ 、 y_5 ,其需满足式(30)。

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + \dots + x_6 = 1 \\ y_1 + y_2 + \dots + y_5 = 1 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_6 \geq 0 \\ x_1 \leq y_1, x_2 \leq y_1 + y_2, x_3 \leq y_2 + y_3 \\ x_4 \leq y_3 + y_4, x_5 \leq y_4 + y_5, x_6 \leq y_5 \end{cases} \quad (30)$$

从而式(16)可以转化为如下线性表达式:

$$\begin{cases} M_{\text{real}} = \sum_{n=1}^6 x_n d_n \\ C_{\text{tax}} = \sum_{n=1}^6 x_n C_{\text{tax}}(d_n) \end{cases} \quad (31)$$

3 算例分析

3.1 算例描述

为说明所提出的双层规划模型的有效性,本文基于 IEEE 30 节点系统进行仿真分析,将该系统中的机组 G_3 、 G_4 设定为燃气轮机,机组 G_1 、 G_2 、 G_5 、 G_6 设定为煤电机组,选取3台机组装配碳捕集设备,其中火电厂燃料类型和排放参数如附录 B 表 B1 所示。

取1个季度为1个周期进行规划,总时长 10 a,共40个周期的动态优化结果对本文所提出的规划配置进行研究。在本文算例中,单位弃风惩罚系数 $c_{\text{curt}}=0.645$ 元/(kW·h),每吨二氧化碳传输 1 km 的

费用 $C_{\text{per}}=7.48$ 元/(t·km)。阶梯式碳交易模型中,碳交易基准价格 $S_{\text{tax}}=200$ 元/t,碳税增长率 $\gamma_{\text{tax}}=0.3$,区间长度 $L=4 \times 10^7$ t^[20]。

为验证本文所提双层模型的有效性,对双层模型以及单层模型进行对比分析,其中单层模型采用直接加权求和法。设定了如下4种场景分析其对碳捕集配置方案的影响:场景1,不考虑阶梯式碳交易模型,且采用单层模型;场景2,不考虑阶梯式碳交易模型,且采用双层模型;场景3,考虑阶梯式碳交易模型,且采用单层模型;场景4,考虑阶梯式碳交易模型,且采用双层模型。

3.2 结果分析

4种场景下的规划配置结果如表1所示。

表1 不同场景下的规划配置结果对比

Table 1 Comparison of planning allocation results under different scenarios

场景	系统配置方案	系统总成本/亿元	运行成本/亿元	碳相关成本/亿元	减排率/%
1	G_1, G_3, G_4	2010.47	846.46	1164.01	32.78
2	G_1, G_2, G_3	1963.45	832.91	1130.54	38.73
3	G_1, G_3, G_4	2088.53	932.26	1156.27	36.84
4	G_1, G_2, G_3	2003.55	914.90	1088.65	40.14

由表1可知,4种场景下的配置方案主要受到单双层模型的影响,单层模型下配置方案优化结果为 G_1 、 G_3 、 G_4 ,双层模型下配置方案优化结果为 G_1 、 G_2 、 G_3 。单层模型无法兼顾碳相关成本与系统运行成本,双层模型可以在满足下层系统综合运行成本最小的同时满足上层碳相关成本最小。燃气轮机单位运行成本比燃煤机组高,因此后者相较于前者在机组运行成本上更小,双层模型配置结果与单层模型配置结果产生了差异。在本文给定参数的情况下,应为机组 G_1 、 G_2 、 G_3 优先配置碳捕集设备。

首先分析阶梯式碳交易机制对规划配置结果的影响:优化目标考虑阶梯式碳交易机制时的减排率要高于考虑传统碳交易机制时的情况。其中场景3相较于场景1,减排率增加了4.06%,但运行成本增加了10.14%,碳相关成本减少了0.07%;场景4相较于场景2,减排率增加了1.41%,但运行成本增加了9.84%,碳相关成本减少了3.71%。由此可见,采用阶梯式碳交易模型可以有效地限制碳排放,实现减排目标。然而,在碳相关成本减少的同时相应地需要更多的燃气轮机出力,导致运行成本的增加。在优化目标为双层模型的情况下,场景2相较于场景1,运行成本减少了1.60%,而碳相关成本减少了2.86%;场景4相较于场景3,运行成本减少了1.86%,碳相关成本减少了5.58%。显然,采用双层模型可以同时兼顾碳相关成本以及运行成本两者的经济性,在系统运行成本相对较小的情况下满足系统的碳减排

目标,系统总成本也在一定程度上得到降低。

为了进一步分析各场景下的影响因素,给出了不同场景下的成本比较,如表2所示。

表2 不同场景下的各成本比较

Table 2 Comparison of costs under different scenarios

单位:亿元

成本	场景1	场景2	场景3	场景4
投资	0.53	0.60	0.53	0.60
碳捕集运行	49.27	44.87	45.06	46.49
传输与封存	874.74	863.42	882.63	836.83
碳交易	155.06	114.18	124.13	105.55
弃风	140.92	37.13	115.24	15.96

由表2可以看出,造成不同场景下系统总成本差异的原因主要是碳交易成本以及弃风成本的影响,尤其是在双层模型中,这2个因素分别影响着上、下层模型。从阶梯式碳交易模型角度分析,系统为了实现碳减排目标,会优先选择燃气轮机出力,并且消纳更多的风电,因此表2中场景1和场景2下弃风成本要分别高于场景3和场景4。从双层模型角度分析,下层优化目标为系统运行成本最小,此时系统消纳大量的风电以减少弃风惩罚,相应地由于系统碳排放量的减少,双层模型下的碳交易成本也比单层模型有着明显的降低。

对于机组运行成本,需要根据发电机出力情况进行具体分析。4种场景下的发电机出力如附录B图B1所示。由图可见,从阶梯式碳交易模型的影响角度分析,对比场景3与场景1、场景4与场景2,6台机组中燃气轮机的出力占比得到提高,阶梯式碳交易机制有效地抑制了高碳排放量机组的出力。碳税价格由系统实际碳交易额决定,当燃气轮机出力增加时,一方面其配额比重增加;另一方面,燃气轮机与煤电机组相比,碳排放系数更小,使得系统总碳排放减小。因此,总体上碳交易成本减少。从双层模型的影响角度分析,双层模型的碳相关成本与电力运行成本在目标函数中分开单独考虑,而单层模型是将二者直接相加,无法同时兼顾两部分的经济性。结合表2可知,在双层模型中,为使运行成本更小,系统减少了弃风成本,消纳了更多的风电,上层模型中燃气轮机出力更多并且考虑到碳相关成本,系统总成本得到降低。

3.3 灵敏度分析

现对单层模型碳相关成本与运行成本权重进行分析,图1为场景3下阶梯式碳交易模型的参数(碳交易基准价格、区间长度、碳税增长率)对各成本及碳捕集配置情况的影响。

由图1可知:当碳交易基准价格为160~180元/t时,运行成本比重增加,碳相关成本比重减小,系统总成本呈增长趋势;当碳交易基准价格低于160元/t时,碳捕集装置的配置结果始终为 G_1 、 G_2 、 G_3 ,减排率

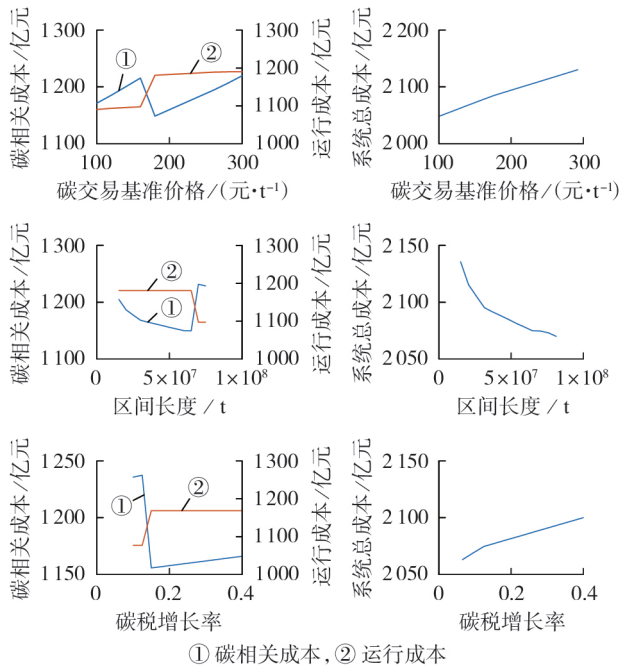


图1 阶梯式碳交易模型各参数对成本的影响

Fig.1 Impact of ladder-type carbon trading model parameters on costs

保持上升趋势直至达到32.70%;当碳交易基准价格高于180元/t时,配置结果为 G_1 、 G_3 、 G_4 ,减排率转变为36.84%后开始保持上升趋势。碳交易基准价格在100~160元区间内,随着碳交易基准价格的上升,各机组出力受到影响,碳相关成本也会随之改变。当达到临界值时,配置方案发生改变,由 G_1 、 G_2 、 G_3 转变为 G_1 、 G_3 、 G_4 ,随后碳相关成本在180~300元区间内继续保持增长趋势。发生这一转变的主要原因是碳捕集配置机组中1台燃煤机组变成了燃气轮机,导致发电成本增加,但系统的碳排放量减少,因此相应的碳相关成本也随之减少。

当区间长度为 $6.5 \times 10^7 \sim 7.0 \times 10^7$ t时,碳相关成本、运行成本分别大幅度增加、减少,系统总成本呈减少趋势;当区间长度小于 6.5×10^7 t时,碳捕集装置的配置结果始终为 G_1 、 G_3 、 G_4 ,因机组出力改变导致减排率不断衰减至35.17%;当区间长度大于 7.0×10^7 t时,碳捕集装置的配置结果始终为 G_2 、 G_3 、 G_4 ,随着区间长度增加至高于系统总碳排放量时,阶梯式碳交易机制失效,等同于传统碳交易机制,此时减排率不断衰减至30.78%。

同理,当碳税增长率为15%~17.5%时,运行成本比重增加,碳相关成本比重减小,系统总成本呈增长趋势。在转变前后的配置分别为 G_1 、 G_2 、 G_3 与 G_1 、 G_3 、 G_4 ,转变前后碳相关成本受机组出力改变的影响,减排率也随之变化。

根据上述分析,从“双碳”目标规划角度考虑,若要使碳相关成本最小,则本文模型中碳交易基准价

格、区间长度、碳税增长率应当分别设定为180元/t、 6.5×10^7 t、17.5%，这样可以更加合理有效地实现减排规划；从源侧的效益角度考虑，当碳交易基准价格低于160元/t、区间长度大于 7.0×10^7 t且碳税增长率低于15%时，系统运行成本会相对较小。

4 结论

本文考虑了利用碳捕集技术得到的CO₂给P2G装置提供碳源，P2G装置制甲烷以促进风电消纳，提出了一种碳相关成本-系统运行成本的双层优化配置模型。其中，上层模型为碳捕集配置模型使碳相关成本最小，下层模型为基于直流潮流的系统运行成本模型；基于下层模型的KKT条件将其转化为上层模型的附加约束，通过线性化非线性方程将模型转化为混合整数线性规划问题，并调用CPLEX求解器对模型进行求解。算例分析所得到的结论如下：

1)在规划配置经济性方面，采用了阶梯式碳交易模型使得系统的碳排放量减少，减排率提高，但在一定程度上增加了运行成本；

2)通过将建立的双层模型与单层模型运行得到的算例结果进行对比，结果表明本文所提出的双层模型具有系统总成本更低、减排率更高、弃风率更低的特点，并通过IEEE 30节点系统进一步证明了该模型的有效性和合理性；

3)考虑了P2G制甲烷这一环节，为捕集后的二氧化碳分配提供了一种有效途径。

本文旨在针对我国碳减排目标规划提出一种可行的方案，在现有CCS技术未全面普及也无法全面普及的背景下，可为我国下一阶段CCS的装配规划提供有益的借鉴。在后续研究工作中，笔者将考虑在本文确定配置的基础上以及电-气综合能源系统大框架下，对调峰手段、风电随机性进行优化调度方面的探究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献：

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904,2205.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [2] 李政,陈思源,董文娟,等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12):3987-4001.
LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4001.
- [3] 陈胜,卫志农,顾伟,等. 碳中和目标下的能源系统转型与变革:多能流协同技术[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):3-12.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, GU Wei, et al. Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: multi-energy flow coordination technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 3-12.
- [4] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报,2021,41(增刊1):28-51.
HUANG Yuhang, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(Supplement 1): 28-51.
- [5] ANWAR M N, FAYYAZ A, SOHAIL N F, et al. CO₂ capture and storage: a way forward for sustainable environment [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 226: 131-144.
- [6] YIN Conghui, HUANG Ziyang. The development of carbon capture and storage in China: progress, challenge and collaboration [C] // 2018 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET). Portland, USA: IEEE, 2018: 1-7.
- [7] TAPIA J F D, LEE Juiyuan, OOI R E H, et al. A review of optimization and decision-making models for the planning of CO₂ capture, utilization and storage (CCUS) systems [J]. Sustainable Production and Consumption, 2018, 13: 1-15.
- [8] FAN Jiangli, XU Mao, LI Fengyu, et al. Carbon capture and storage (CCS) retrofit potential of coal-fired power plants in China: the technology lock-in and cost optimization perspective [J]. Applied Energy, 2018, 229: 326-334.
- [9] 周任军,肖钧文,唐夏菲,等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):61-67.
ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 61-67.
- [10] 孙惠娟,刘昀,彭春华,等. 计及电转气协同的含碳捕集与垃圾焚烧虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术,2021,45(9):3534-3545.
SUN Huijuan, LIU Yun, PENG Chunhua, et al. Optimization scheduling of virtual power plant with carbon capture and waste incineration considering power-to-gas coordination [J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3534-3545.
- [11] 崔杨,邓贵波,曾鹏,等. 计及碳捕集电厂低碳特性的含风电电力系统源-荷多时间尺度调度方法[J/OL]. 中国电机工程学报. [2021-08-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.210697>.
- [12] 田丰,贾燕冰,任海泉,等. 考虑碳捕集系统的综合能源系统“源-荷”低碳经济调度[J]. 电网技术,2020,44(9):3346-3355.
TIAN Feng, JIA Yanbing, REN Haiquan, et al. 'Source-load' low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering carbon capture system [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3346-3355.
- [13] ZHANG Rufeng, CHEN Houhe, LI Xue, et al. Low-carbon economic dispatch model with combined wind-storage system and carbon capture power plants [C] // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [14] 陈志,胡志坚,翁葛宏,等. 基于阶梯碳交易机制的园区综合能源系统多阶段规划[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):148-155.
CHEN Zhi, HU Zhijian, WENG Changhong, et al. Multi-stage planning of park-level integrated energy system based on ladder-type carbon trading mechanism [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 148-155.
- [15] 袁铁江,曹继雷. 计及风电-负荷不确定性的风氢低碳能源系统容量优化配置[J/OL]. 高电压技术. [2022-01-18]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210340>.
- [16] KLEMEŠ J, BULATOV I, COCKERILL T. Techno-economic

- modelling and cost functions of CO₂ capture processes[J]. Computers & Chemical Engineering, 2007, 31(5/6):445-455.
- [17] 卫志农,张思德,孙国强,等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.
- WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15):9-16.
- [18] 陈锦鹏,胡志坚,陈颖光,等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 48-55.
- CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermo-electric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):48-55.
- [19] 崔杨,曾鹏,仲悟之,等. 考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 10-17.
- CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3):10-17.
- [20] MOSKALENKO N, LOMBARDI P, KOMARNICKI P. Multi-criteria optimization for determining installation locations for the power-to-gas technologies[C]//Proceeding of 2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA: IEEE, 2014: 1-5.

作者简介:



李国庆

李国庆(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统运行优化(E-mail: guoqing_li101@163.com);

王冲(1988—),男,副教授,博士,主要研究方向为综合能源电力系统的建模及优化、电力系统弹性策略、电力系统随机优化等(E-mail: chongwang@hhu.edu.cn);

雷顺波(1991—),男,助理教授,博士,主要研究方向为电力与能源系统优化、绿色智联建筑、基础设施弹性等(E-mail: shunbo_lei@gmail.com)。

(编辑 李玮)

Bi-level optimal allocation of power system considering carbon capture technology

LI Guoqing¹, WANG Chong¹, LEI Shunbo², WANG Xiao¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. College of Science and Technology, The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen 518172, China)

Abstract: Carbon capture and storage technology is an effective means to achieve “double carbon” target. Based on the carbon trading mechanism, a low-carbon economics bi-level optimal allocation model considering the joint operation of power to gas, gas turbine, carbon capture system and wind farm is proposed. The upper-level optimization objective is to minimize the system carbon related cost, while the lower-level optimization objective is to minimize the system operation cost, which takes the system operational constraints into consideration, and the decision variables contain active power output of generation unit, power of power to gas and carbon capture assembly. To solve the optimal equilibrium solution of the proposed bi-level optimization model, the KKT condition is used to transform the bi-level optimization problem into a single-level optimization problem. Then, the single-level quadratic programming is converted into the mixed integer linear optimization problem that can be directly solved by using McCormick, meanwhile the CPLEX solver is used to solve the model. Finally, the simulation on IEEE 30-bus system verifies the effectiveness of the proposed model and method. At the same time, adopting the bi-level optimization model reduces the system total cost and increases the emission reduction rate to a certain extent.

Key words: carbon capture and storage; bi-level optimization; KKT condition; low-carbon economics; ladder-type carbon trading model

附录 A

对于该问题,本节采用拉格朗日乘子法将下层优化问题转化为 KKT 最优条件,下层模型式(21)-(26)可转化为式(A1)-(A8)。

$$\frac{\partial L_2}{\partial P_{F,i}} = a_i - \mu_{F,i,t}^{\min} + \mu_{F,i,t}^{\max} - \mu_{\text{wind},w,t}^{\min} + \mu_{\text{wind},w,t}^{\max} = 0 \quad (\text{A1})$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial P_{\text{P2G},i}} = K_{\text{P2G}} - \mu_{\text{P2G},j,t}^{\min} + \mu_{\text{P2G},j,t}^{\max} - \mu_{\text{wind},w,t}^{\min} + \mu_{\text{wind},w,t}^{\max} = 0 \quad (\text{A2})$$

$$0 \leq P_{F,i,t} - w_i P_B - P_{F,i}^{\min} \perp \mu_{F,i,t}^{\min} \geq 0 \quad (\text{A3})$$

$$0 \leq P_{F,i}^{\max} - w_i P_B - P_{F,i,t} \perp \mu_{F,i,t}^{\max} \geq 0 \quad (\text{A4})$$

$$0 \leq P_{\text{P2G},j,t} - P_{\text{P2G},j}^{\min} \perp \mu_{\text{P2G},j,t}^{\min} \geq 0 \quad (\text{A5})$$

$$0 \leq P_{\text{P2G},j}^{\max} - P_{\text{P2G},j,t} \perp \mu_{\text{P2G},j,t}^{\max} \geq 0 \quad (\text{A6})$$

$$0 \leq P_{\text{wind},w,t} \perp \mu_{\text{wind},w,t}^{\min} \geq 0 \quad (\text{A7})$$

$$0 \leq P_{\text{wind},w,t}^{\text{pre}} - P_{\text{wind},w,t} \perp \mu_{\text{wind},w,t}^{\max} \geq 0 \quad (\text{A8})$$

式中: L_2 为下层优化模型对应的拉格朗日函数; 式(A1)、(A2)为拉格朗日函数对变量求导为 0; 式(A3)、(A4)为机组上下限约束的 KKT 条件, $\mu_{F,i,t}^{\max}$ 、 $\mu_{F,i,t}^{\min}$ 分别为机组出力上下限约束对应的拉格朗日乘子; 式(A5)、(A6)为 P2G 装置上下限约束的 KKT 条件, $\mu_{\text{P2G},j,t}^{\max}$ 、 $\mu_{\text{P2G},j,t}^{\min}$ 分别为 P2G 装置出力上下限约束对应的拉格朗日乘子; 式(A7)、(A8)为风电上下限约束的 KKT 条件, $\mu_{\text{wind},w,t}^{\max}$ 、 $\mu_{\text{wind},w,t}^{\min}$ 分别为风电出力上下限约束对应的拉格朗日乘子。

约束式(A1)—(A8)的形式为决策变量与拉格朗日乘子之积为 0,是一种特殊的非线性结构,因此可通过大 M 法(M 为一个较大的正数)引入 0-1 整数将非线性约束转化为线性混整约束。以式(A3)为例,其可转换为式(A9)和式(A10)所示的线性约束形式。

$$0 \leq P_{F,i,t} - w_i P_B - P_{F,i}^{\min} \leq \tau_{F,i,t}^{\min} M \quad (\text{A9})$$

$$0 \leq \mu_{F,i,t}^{\min} \leq (1 - \tau_{F,i,t}^{\min}) M \quad (\text{A10})$$

式中: $\tau_{F,i,t}^{\min}$ 为 0-1 整数变量,表示火电机组是否出力,当 $\tau_{F,i,t}^{\min}=1$ 时,表示机组出力不等于最小技术出力(即 $P_{F,i,t} - w_i P_B - P_{F,i}^{\min} \neq 0$),此时拉格朗日乘子为 0,不起作用约束;当 $\tau_{F,i,t}^{\min}=0$ 时,对应的拉格朗日乘子不为 0,因此起作用约束。综上, $\tau_{F,i,t}^{\min}$ 与 $P_{F,i,t} - w_i P_B - P_{F,i}^{\min}$ 中必有一项为 0,与原约束式(A3)相等价。因此,同理可以实现对约束式(A1)—(A8)的转化,从而实现下层模型的线性化。该双层模型经过处理转化成了一个混合整数线性规划问题,可直接利用 MATLAB 调用 CPLEX 工具包求解。

附录 B

表 B1 火电厂燃料类型和排放参数

Table B1 Fuel type and emission characteristics of thermal power plant

发电 机组	电力网 节点	燃料 类型	发电成本 系数		有功下限/ MW	有功上限/ MW	碳排放强度/ [t · (MW · h) ⁻¹]	碳排放配额/ [t · (MW · h) ⁻¹]
			<i>a</i>	<i>b</i>				
G ₁	4	煤炭	0.0625	3.2	0	650	1.186	0.798
G ₂	12	煤炭	0.0583	3.25	0	700	1.186	0.798
G ₃	22	天然气	0.5	0	0	900	0.455	0.434
G ₄	27	天然气	0.5	0	0	900	0.455	0.434
G ₅	23	煤炭	0.0250	3	0	550	1.186	0.798
G ₆	13	煤炭	0.0250	3	0	500	1.186	0.798

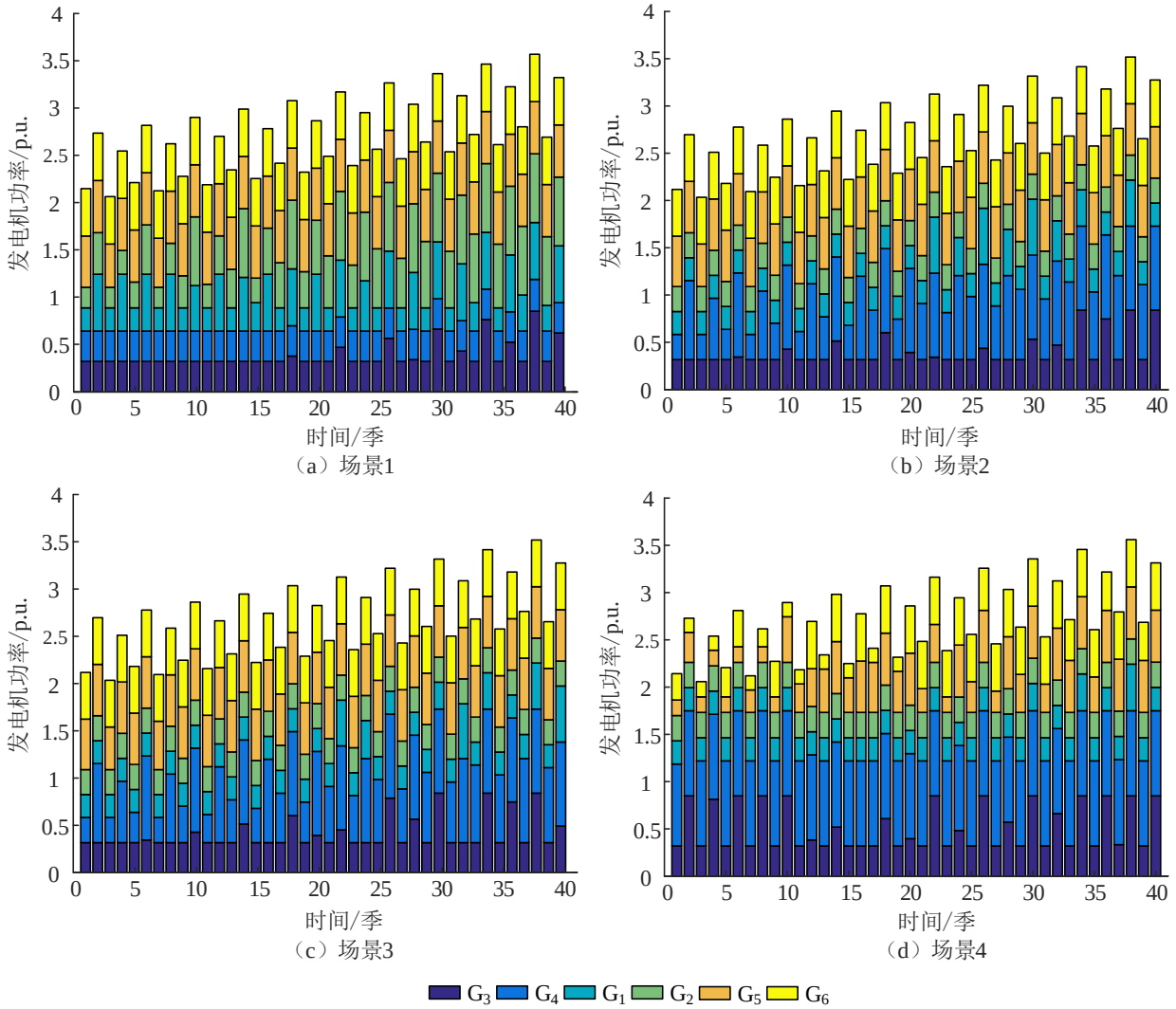


图 B1 不同场景下的发电机功率
Fig.B1 Generator power in different scenarios