

基于碳绿证市场机制的多区域电力系统 低碳调度模型

彭婧¹, 徐慧慧¹, 田云飞¹, 柴宜¹, 杨国林²

(1.国网甘肃省电力公司发展事业部, 甘肃 兰州 730050; 2.输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 传统能源资源的有限性和供应安全问题促使人们转向能源互联和低碳电力的研究方向。综合能源系统(IES)逐渐成为实现能源协调和节能减排的关键手段。为了管理碳排放和促进可持续能源的利用,文章提出了一种基于碳绿色证书联合市场的多区域综合能源系统调度模型。监管部门对碳排放量进行分配调整,可分别在碳交易系统和绿证市场系统两个渠道进行交换。评估了在 IES 中引入碳绿色证书市场机制的可行性,并提出了绿色证书联合市场框架。采用组合双拍卖(CDA)机制进行竞价,确定绿色证书的最佳价格,建立了供热网络和天然气网络的优化模型,并将其与 IES 的约束相结合,确保系统的稳定运行。该模型分析了碳交易系统、绿证市场系统以及天然气价格的变化对系统运行成本的影响。仿真实验结果表明,该模型能够显著提高 IES 效益并降低碳排放。

关键词: 碳绿证市场; 低碳调度; 组合双拍卖; 综合能源系统

中图分类号: TK9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)08-1120-07

0 引言

在不断增长的全球能源需求和日益严重的气候变化背景下,传统能源资源的有限性和供应安全问题已经成为人们关注的焦点^[1]。作为关键的能源转型方向,能源互联和低碳电力备受研究者和政策制定者的青睐。为了应对气候变化挑战、推动可持续发展以及有效管理碳排放,综合能源系统(IES)逐渐成为实现能源协调、提高能源利用效率的重要手段^[2,3]。

然而,在当前的能源体系中,传统的供需侧管理方式难以适应碳减排、可再生能源大规模渗透等新形势的发展需求^[4]。现有技术和市场机制普遍存在的问题和局限性不仅限制了能源系统的低碳转型速度,也影响了能源系统的灵活性和安全性^[5,6]。因此,寻找一种创新的、更高效的能源管理方式显得尤为紧迫和必要。

传统的电力系统低碳调度方法主要基于供需平衡和成本最小化的原则,在面临碳排放管理和可再生能源大规模接入的挑战下,现有方法存在一定的局限性^[7,8]。随着对碳排放的监管日益严格,

传统方法难以有效应对碳排放约束,导致碳排放量难以控制。此外,随着风能和太阳能等可再生能源的大规模接入电网,其间歇性和不确定性特点给传统的电力系统调度带来挑战。崔杨^[9]针对风电并网后系统的不确定因素,引入模糊机会约束,提出了一种考虑模糊机会约束的低碳型经济调度模型,可有效提高风电消纳水平以及降低碳排放。陈厚合^[10]建立了一种考虑碳排放流理论和以碳价为价格信号的需求响应电力系统两阶段低碳优化调度模型,利用负荷侧调节能力降低总碳排放量,从而降低负荷侧碳排放成本。李佳瑶^[11]在经济目标函数中引入碳交易成本,构建了根据碳排放量计算碳交易成本的阶梯型模型,通过碳排放权裕度控制碳交易成本;建立了考虑碳交易和风荷预测误差的电力系统低碳经济调度模型,通过含有机会约束规划理论的旋转备用约束处理风电和负荷预测误差的不确定性。

如何将碳排放管理与可再生能源大规模接入相结合,实现电力系统低碳调度,是当前研究的重要挑战之一。须要寻找一种新的调度方法,能够兼

收稿日期: 2024-03-13。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52077018)。

作者简介: 彭婧(1989-),女,硕士,中级工程师,主要从事电源接网政策及相关研究。E-mail:544355088@qq.com

通信作者: 杨国林(1994-),男,博士,副教授,研究方向为高电压技术及外绝缘技术。

顾碳排放管理、可再生能源利用和电力系统稳定性。绿证交易作为一种市场机制,能够激励可再生能源的发展和利用,但目前大部分研究在低碳调度中未充分考虑绿证交易的影响。

本文提出了一种基于碳绿色证书联合市场机制的多区域综合能源系统调度模型。该模型结合了监管部门对碳排放量的分配调整,同时在碳交易系统和绿证市场系统中开展碳交换,推动可持续能源的利用和碳排放管理。在该模型中,引入绿色证书联合市场框架,应用组合双拍卖(CDA)机制进行竞价,确定绿色证书的最佳价格,通过优化供热网络和天然气网络模型,并与 IES 的约束相结合,确保系统稳定运行。该方法将碳排放管理、可再生能源接入和绿证交易相结合,通过优化调度策略实现供需平衡、成本最小化和碳排放降低的目标。

1 碳绿色证书联合交易模式与框架

1.1 碳排放交易模型

碳排放交易(Carbon Emission Trading, CET)机制是指通过建立合法的碳排放权分配机制,允许交易控制碳排放。CET 机制的实施使企业能够根据监管部门设定的碳配额调整生产计划。碳配额是指政府免费分配给企业的碳排放标准,如果企业产生的碳排放量高于分配量,则从 CET 市场购买碳排放量;若企业产生的碳排放量低于分配量,则可以通过出售剩余的碳排放权获得收益。需要注意的是,本文涉及的 CET 仅在一个地区进行,不能跨地区交易。

国内外碳排放权分配方式主要有自由分配、拍卖分配和自由拍卖混合分配。本文使用基线法和预分配法确定 IES 中自由碳排放的份额。IES 中的碳排放源主要包括燃气轮机和燃气锅炉,其自由碳排放份额如下:

$$\begin{cases} C_L = C_q + C_h \\ C_q = P_g^i \cdot B_g \cdot F_c \cdot F_r \cdot F_l \\ C_h = Q_b^i \cdot B_h \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_L, C_q, C_h 分别为总排放物、燃气轮机、燃气锅炉的碳配额; F_c, F_r, F_l 分别为加热装置的修正系数、冷却装置的修正系数、负荷(输出)系数的修正系数; B_g, B_h 分别为燃气轮机、燃气锅炉的二氧化碳排放基准; P_g^i, Q_b^i 分别为燃气轮机、燃气锅炉的

功率。

IES 的实际碳排放量 C_p 由燃气轮机和燃气锅炉的功率输出决定,其计算式为

$$C_p = \sum_{i=1}^T \left[a_1 + b_1 P_g^i + c_1 (P_g^i)^2 \right] + \sum_{i=1}^T \left[a_2 + b_2 Q_b^i + c_2 (Q_b^i)^2 \right] \quad (2)$$

式中: a_1, b_1, c_1 为燃气轮机的碳排放系数; a_2, b_2, c_2 为燃气锅炉的碳排放系数。

在求解优化问题时,将系统碳排放量进行分段线性化处理,每个区间的调度模型变为混合整数非线性规划问题(MINLP)。本文基于微型燃机组分段线性化的成本函数原理,使用分段线性化模型描述和优化微型燃气轮机和燃气轮机的部分线性电热耦合曲线,以实现快速求解和应用。

本文采用阶梯 CET 控制 IES 的碳排放^[2]。阶梯 CET 模型如下:

$$C_{CO_2} = \begin{cases} \lambda(C_p - C_L), C_p \leq C_L + d \\ \lambda d + (1 + \lambda)\lambda(C_p - C_L - d), \\ C_L + d < C_p \leq C_L + 2d \\ 2\sigma\lambda d + (1 + 2\sigma)\lambda(C_p - C_L - 2d), \\ C_L + 2d < C_p \leq C_L + 3d \\ 3\sigma\lambda d + (1 + 3\sigma)\lambda(C_p - C_L - 3d), \\ C_L + 3d < C_p \leq C_L + 4d \\ 4\sigma\lambda d + (1 + 4\sigma)\lambda(C_p - C_L - 4d), \\ C_p > C_L + 4d \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_{CO_2} 为碳交易所消耗的费用; λ 为 CET 价格; σ 为分层 CET 价格增长率; d 为碳排放间隔长度。

随着阶梯的增加,每层 CET 价格会增加 $\sigma\lambda$ 。当 $C_p < C_L$ 时, C_{CO_2} 为负,表示 CET 机制带来了好处。

1.2 绿证交易模型

绿色证书是指颁发给可再生能源发电企业的证书,证明该企业的一部分电力来自可再生能源。绿证交易(Green Certificate Trading, GCT)是确保可再生能源投资组合标准有效实施的配套措施。实施可再生能源投资组合标准和 GCT 机制的目的是逐步将可再生能源发电从政府直接补贴过渡到市场补贴。

GCT 分为两种情况:一种是当 IES 消耗的可再生能源发电量低于每日配额分配量时,购买绿

色证书, 如果购买后仍然达不到标准, 将受到处罚; 另一种是当可再生能源发电量大于每日配额分配量时, 可以通过出售绿色证书获利。其模型为

$$C_{gre} = \begin{cases} \frac{P_w - P_{res}}{1000} c_{gre}^b - C(P_{res} - P_w), P_w < P_{res} \\ \frac{P_w - P_{res}}{1000} c_{gre}^s, P_w \geq P_{res} \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_{gre} 为 GCT 所消耗的费用; P_w, P_{res} 分别为可再生能源的实际消耗量、每日配额; c_{gre}^b, c_{gre}^s 分别为绿色证书的购买、销售价格。

GCT 市场的最低和最高售价涉及可再生能源的市场定价和交易限制。最低售价是指 GCT 市场中可再生能源绿证的最低交易价格, 通常用于确保可再生能源项目的经济可行性和吸引投资; 最高售价是指 GCT 市场中可再生能源绿证的最高交易价格, 通常用于限制 GCT 价格的上限, 以防止价格异常波动或操纵。GCT 市场的最低售价应为可再生能源电价附加资金补贴的现值, 最高售价不应高于相应电力的可再生能源上网电价与燃气轮机基准电价之间的差额。GCT 市场的最低和最高售价如下所示:

$$c_{gre}^{min} = \frac{1000(s_i - c)}{(1+r_i)^{h_i+d_i}} \quad (5)$$

$$c_{gre}^{max} = 1000(s_i - c) \quad (6)$$

式中: s_i 为第 i 个绿色证书的上网电价; c 为微型燃气轮机的基准价格; r_i 为第 i 次可再生能源的贴现率; h_i 为第 i 项可再生能源补贴资金的结算周期; d_i 为第 i 项可再生能源补贴资金的延期支付周期。

此外, 绿色证书配额会受到以下约束:

$$\sum_{i=1}^n G\alpha_i P_i - G_{gre} = G \sum_{i=1}^n \eta_i P_{i0} \quad (7)$$

式中: G, G_{gre} 分别为 GCT 量化系数、GCT 的数量; α_i 为某一时间内第 i 个可再生能源的比例; P_i, P_{i0} 分别为可再生能源的实际分配功率、初始分配功率; η_i 为第 i 个可再生能源的利用效率。

1.3 组合双拍卖模型

CDA 模型是一种用于满足参与者在一段时间内的交易需求, 且交易时间早于结算时间的期货合约。需求的性质等价于参与者的供应能力, 与可再生能源配额制度存在一定偏差。该模型有利

于绿证卖家提前锁定交易价格, 规避交易风险。

在绿色证书拍卖市场中, 参与者分为绿色证书卖家和买家。参与者可以根据对绿色证书的需求设计自己的投标策略, 绿色证书购买者可以获得各种投标逻辑, 以激励他们积极参与绿色证书市场。绿色证书卖家的投标包括绿色证书数量矩阵 X_s 和绿色证书价格矩阵 Y_s , 其表达式如下:

$$X_s = \begin{matrix} \begin{matrix} s & & s \\ x_{1,1} & \cdots & x_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s & & s \\ x_{n,1} & \cdots & x_{n,d} \end{matrix} \\ n \in N_s, d \in D \end{matrix} \quad (8)$$

$$Y_s = \begin{matrix} \begin{matrix} s & & s \\ y_{1,1} & \cdots & y_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s & & s \\ y_{n,1} & \cdots & y_{n,d} \end{matrix} \\ n \in N_s, d \in D \end{matrix}$$

式中: $x_{n,d}^s, y_{n,d}^s$ 分别为绿色证书卖方 n 在 d 期内的绿色证书投标数量、投标价格; D 为投标周期的集合; N_s 为绿色证书卖家的集合。

绿色证书卖家的中标结果由矩阵 Z_s 表示。

$$Z_s = \begin{matrix} \begin{matrix} s & & s \\ z_{1,1} & \cdots & z_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s & & s \\ z_{n,1} & \cdots & z_{n,d} \end{matrix} \\ n \in N_s, d \in D \end{matrix} \quad (9)$$

式中: $z_{n,d}^s$ 为时段 d 中 n 个中标的绿色证书数量。

绿色证书购买者的投标包括绿色证书数量矩阵 X_b 和投标价格矩阵 Y_b 。

$$X_b = \begin{matrix} \begin{matrix} b & & b \\ x_{1,1} & \cdots & x_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b & & b \\ x_{n,1} & \cdots & x_{n,d} \end{matrix} \\ n \in N_b, d \in D \end{matrix} \quad (10)$$

$$Y_b = \begin{matrix} \begin{matrix} b & & b \\ y_{1,1} & \cdots & y_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b & & b \\ y_{n,1} & \cdots & y_{n,d} \end{matrix} \\ n \in N_b, d \in D \end{matrix}$$

$$X_m^b = [x_{m,1}^b, \dots, x_{m,d}^b] \quad (11)$$

式中: X_m^b 为绿色证书购买者 m 的绿色证书数量投标矩阵; N_b 为绿色证书购买者的集合。

1.4 碳绿色证书联合市场模型

为了完善 CET 和 GCT 机制, 增加市场交易的灵活性, 本文设计了一种碳绿色证书联合交易市场框架, 具体交易流程框架如图 1 所示。在碳绿色证书联合交易市场框架中, 用户/工厂与 IES 的

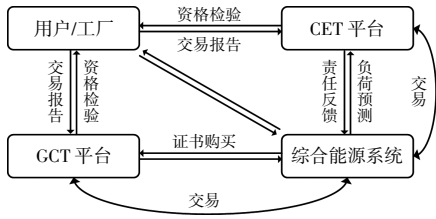


图 1 碳绿色证书联合交易市场框架示意图

Fig.1 Schematic diagram of the carbon green certificate joint trading market

关系是双向的,这种关系涉及能源的供需、交易机制以及对环境影响的约束。用户/工厂可以通过市场机制购买或出售碳排放权和绿证,对 IES 的运营产生影响。IES 根据市场交易结果调整能源供应策略,以确保系统的经济性和环保性。IES 的运行效率和市场机制的有效性会影响用户/工厂的能源使用成本和环保责任。

具体交易流程如下。

① IES 向监管机构提交申请,并在监管机构审批合格后参加 GCT 和 CET。然后监管机构为每个 IES 分配不同的碳排放量和可再生能源碳配额。

② 符合配额要求的 IES 可以在 GCT 和 CET 平台上出售绿色证书和碳排放权。IES 或其他不符合配额要求的机构可以在该平台上购买,否则他们将受到处罚。

该框架不仅响应国家政策要求,而且降低了 IES 的运营成本。

2 基于碳绿证联合市场的优化调度模型

2.1 目标函数

对于考虑 CET 和 GCT 机制的多区域综合能源系统 (Multi District Integrated Energy Systems, MDIES),目标是将总成本降至最低,其中包括能源采购成本、CET 和 GCT 成本以及设备运营和维护成本。目标函数式为

$$C=C_e+C_{\text{gas}}+C_{\text{es}}+C_{\text{hs}}+C_{\text{CO}_2}-C_{\text{gre}} \quad (12)$$

$$C_e=\sum_{t=1}^h (c_{\text{grid}}^t \cdot P_{\text{grid}}^t \cdot \Delta t) \quad (13)$$

$$C_{\text{gas}}=c_{\text{gas}} \sum_{t=1}^h \left(\frac{P_{\text{g}}^t}{\eta_{\text{g}}} + \frac{Q_{\text{b}}^t}{\eta_{\text{b}}} \right) \Delta t \quad (14)$$

$$C_{\text{hs}}=\sum_{t=1}^h \left(\frac{c_{\text{grid}}^t \cdot Q_{\text{hs},c}^t}{Q_{\text{hs},d}^t \cdot \Delta t} \right) \quad (15)$$

式中: C_e 为电力成本; C_{gas} 为天然气成本; C_{es} 为电

池储能成本; C_{hs} 为储热成本; C_{CO_2} 为 CET 的消费成本; $\eta_{\text{g}}, \eta_{\text{b}}$ 分别为微型燃气轮机、燃气锅炉的效率; c_{gas} 为天然气价格; c_{grid}^t 为电价; $Q_{\text{hs},c}^t$ 为储热罐的热功率; $Q_{\text{hs},d}^t$ 为储热罐的放电功率。

假设电池单次充放电的使用成本相同,购买成本为 C_{pur} ,无损坏的使用次数为 M_{cycles} ,则每次充放电的成本 c_r 为

$$c_r=\frac{C_{\text{pur}}}{M_{\text{cycles}}} \quad (16)$$

$$C_{\text{es}}=\sum_{t=1}^h \left[c_r \left(\frac{P_{\text{es},c}^t / P_{\text{es},d}^t}{C_{\text{capacity}}} \right) \right] \quad (17)$$

式中: $P_{\text{es},c}^t, P_{\text{es},d}^t$ 分别为电池充放电功率; C_{capacity} 为蓄电池容量。

2.2 约束条件

① 电气总线平衡约束

$$P_{\text{grid}}^t + P_{\text{g}}^t + P_{\text{pv}}^t + P_{\text{wt}}^t + P_{\text{es},d}^t = L_e^t + P_{\text{ec}}^t + P_{\text{es},c}^t \quad (18)$$

式中: P_{pv}^t 为光伏功率; P_{wt}^t 为风电功率; L_e^t 为电负荷; P_{ec}^t 为电力制冷功率。

② 燃气轮机热电平衡约束

$$\eta_{\text{wh}} \cdot Q_{\text{wh}}^t = L_h^t \quad (19)$$

式中: η_{wh} 为燃气轮机效率; Q_{wh}^t 为燃气轮机功率; L_h^t 为热负荷。

③ 电池运行限制

$$\begin{cases} U_{\text{es},c}^t \cdot P_{\text{es},c}^{\text{min}} \leq P_{\text{es},c}^t \leq U_{\text{es},c}^t \cdot P_{\text{es},c}^{\text{max}} \\ U_{\text{es},d}^t \cdot P_{\text{es},d}^{\text{min}} \leq P_{\text{es},d}^t \leq U_{\text{es},d}^t \cdot P_{\text{es},d}^{\text{max}} \\ W_{\text{es}}^t = W_{\text{es}}^{t-1} + \left(\eta_{\text{es},c} \cdot P_{\text{es},c}^t - \frac{P_{\text{es},d}^t}{\eta_{\text{es},d}} \right) \Delta t \\ W_{\text{es}}^{\text{min}} \leq W_{\text{es}}^{t+1} \leq W_{\text{es}}^{\text{max}} \\ U_{\text{es},d}^t + U_{\text{es},c}^t \in (0, 1) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_{\text{es},c}^{\text{max}}, P_{\text{es},c}^{\text{min}}$ 分别为电池充电功率的最大、最小值; $P_{\text{es},d}^{\text{max}}, P_{\text{es},d}^{\text{min}}$ 分别为电池放电功率的最大、最小值; $W_{\text{es}}^{\text{max}}, W_{\text{es}}^{\text{min}}$ 分别为电池能量存储的最大、最小值; $U_{\text{es},c}^t, U_{\text{es},d}^t$ 分别为电池充电和放电时的开关状态; W_{es}^t 为 t 时刻电池的能量; $\eta_{\text{es},c}, \eta_{\text{es},d}$ 分别为电

池充电、放电效率。

④储热设备的限制条件

$$\begin{cases} U_{hs,c}^t \cdot Q_{hs,c}^{t,\min} \leq \dot{Q}_{hs,c}^t \leq U_{hs,c}^t \cdot Q_{hs,c}^{t,\max} \\ U_{hs,d}^t \cdot Q_{hs,d}^{t,\min} \leq \dot{Q}_{hs,d}^t \leq U_{hs,d}^t \cdot Q_{hs,d}^{t,\max} \\ W_{hs}^t = W_{hs}^{t-1} + \left(\eta_{hs,c} \cdot \dot{Q}_{hs,c}^t - \frac{\dot{Q}_{hs,d}^t}{\eta_{hs,d}} \right) \Delta t \\ W_{hs}^{\min} \leq W_{hs}^t \leq W_{hs}^{\max} \\ U_{hs,d}^t + U_{hs,c}^t \in (0, 1) \end{cases} \quad (21)$$

式中： $Q_{hs,c}^{t,\max}$, $Q_{hs,c}^{t,\min}$ 分别为储热设备的最大、最小充电量； $Q_{hs,d}^{t,\max}$, $Q_{hs,d}^{t,\min}$ 分别为储热设备的最大、最小排放热量； W_{hs}^{\max} , W_{hs}^{\min} 分别为储热设备的最大、最小储热程度； $U_{hs,c}^t$, $U_{hs,d}^t$ 分别为储热系统在 t 时刻的开关状态； W_{hs}^t 为 t 时刻储热系统的存储能量； $\eta_{hs,c}$, $\eta_{hs,d}$ 分别为储热系统储热、放热效率。

⑤燃气轮机运行限制

$$\begin{cases} \dot{P}_g^t = F_g^t \cdot \eta_g \\ U_g^t \cdot \dot{P}_g^{t,\min} \leq \dot{P}_g^t \leq U_g^t \cdot \dot{P}_g^{t,\max} - R_D \\ \dot{P}_g^t - \dot{P}_g^{t-1} \leq R_D \end{cases} \quad (22)$$

式中： $\dot{P}_g^{t,\max}$, $\dot{P}_g^{t,\min}$ 分别为燃气轮机功率的上、下限； F_g^t 为燃气轮机在 t 时刻的燃料消耗量； U_g^t 为燃气轮机在 t 时刻的开关状态； R_D 为上升限制。

⑥光伏和风能限制

$$\begin{cases} 0 \leq P_{pv}^t \leq P_{pv,t}^{t,p} \\ 0 \leq P_{wt}^t \leq P_{wind,t}^{t,p} \end{cases} \quad (23)$$

式中： $P_{pv,t}^{t,p}$ 为光伏系统功率上限； $P_{wind,t}^{t,p}$ 为风能系统功率上限。

3 仿真验证

本文以 MDIES 为例,验证所提出模型的有效性,系统结构如图 2 所示。MDIES 分为 3 个分区:生活区、学习区和工厂区。每个分区都是一个小型 IES,但设备容量不同。3 个分区通过热网与天然气管网相连。天然气价格定为 0.349 元/m³,热网管道的长度和参数如表 1 所示。在不同阶段,初始碳交易价格设定为 0.15 元/kg,间隔内每增加一次,CET 价格就会增加 0.2 元/kg。

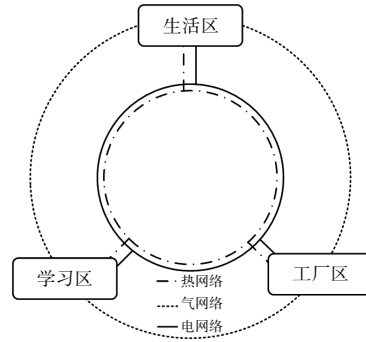


图 2 多区域综合能源系统结构

Fig.2 Structure of multi regional integrated energy system

表 1 不同区域下的管道长度和参数

区域	生活区	学习区	工厂区
长度/km	1.2	1.0	1.4
直径/m	0.5	0.5	0.5
流量/m ³ ·s ⁻¹	3	3	3
阻力/N	20	20	20
热比/J·kg ⁻¹	0.006	0.006	0.005

本文使用了 MDIES 中的热网模型,为了验证供暖网络在系统中的作用,选择一个冬季案例进行仿真模拟。为了验证模型的稳定性,本文设置 4 个场景来检验 CET 和 GCT 对系统成本的影响。案例 1 设定为典型的 MDIES 最优操作方法,案例 2 设置为仅考虑 CET 机制的 MDIES 的最优操作方法,案例 3 设置为仅考虑 GCT 机制的 MDIES 的最优操作方法,案例 4 设定为综合考虑 CET 和 GCT 的 MDIES 的最优操作方法。

绿色证书的交易数量和价格参照系统中的可再生能源容量确定,绿色证书的交易数量为 45~95,单价为 80~120 元。大多数绿色证书的购买价格和销售单价均为 85 元,这意味着当交易数量为 50~90 时,大多数交易方都愿意以 85 元的单价进行交易。因此,该模型中的绿色证书价格设置为 85 元的折衷解决方案。此外,为了进一步降低交易风险和交易双方的损失,拟定的罚款为交易价格的 3 倍。

表 2 列出了 4 种案例下的系统成本。由表 2 可以看出:案例 4 中系统的总成本最低,与案例 1 相比,系统成本降低了 21.5%;与仅考虑 GCT 机制的案例 2 相比,系统成本降低了 12.3%;与仅考虑 CET 机制的案例 3 相比,系统成本降低了 11.6%。这源于同时考虑 CET 和 GCT 机制后,一

表 2 不同案例下系统成本
Table 2 System costs under different cases

案例	运行成本/元	CET/元·kg ⁻¹	GCT/元·个 ⁻¹	总成本/元
1	83 615	0	0	83 615
2	83 615	0	8 817	74 798
3	84 529	11 108	0	74 267
4	84 529	10 111	8 802	65 616

方面强化了碳排放约束,增加了CET的效益;另一方面,该系统增加了可再生能源的消耗,并可获得额外的GCT效益。因此在同时考虑CET和GCT机制后,可以提高系统运行的经济性。

4 结论

本文针对传统能源资源有限性与供应安全性问题,以及碳排放管理的需求,提出了一种基于碳绿色证书联合市场机制的多区域综合能源系统调度模型。通过引入碳交易系统和绿证市场系统,以及优化供热网络和天然气网络,实现了能源资源的高效利用、碳减排的有效管理和综合能源系统的稳定运行,本文得出以下结论。

①基于碳绿色证书联合市场机制的多区域综合能源系统调度模型,为促进可持续能源利用和降低碳排放提供了一种有效途径和新思路。该模型能够有效引导电力系统进行低碳调度,充分利用可再生能源、优化碳排放管理,提高能源系统的效益和可持续性。

②引入组合双拍卖机制确定绿色证书的最佳价格,能够有效激励各区域间能源资源的优化配置和碳排放的管理。通过市场机制的引入,能够更好地调动各方的积极性,推动碳减排目标的实现,促进能源系统的协同发展和碳排放的减少。

③本文建立的绿色证书联合市场框架,为多区域综合能源系统的协同调度提供了新的思路 and 参考。将碳交易系统和绿证市场系统相结合,不仅

为碳排放管理提供了更多选择、更灵活的手段,也推动了区域间的能源共享和碳减排技术的交流,有助于提升整体能源系统的效率和稳定性。

参考文献:

- [1] 张云峰.双碳视域下我国能源行业发展特征及未来趋势[J].中国资源综合利用,2023,41(12):159-162.
- [2] 王海洋,李珂,张承慧,等.基于主从博弈的社区综合能源系统分布式协同优化运行策略[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5435-5445.
- [3] 黎静华,朱梦姝,陆悦江,等.综合能源系统优化调度综述[J].电网技术,2021,45(6):2256-2272.
- [4] 王小飞,任洪波,吴琼,等.考虑中长期碳减排约束的区域综合能源系统多阶段动态规划[J].中国电力,2023,56(11):185-196.
- [5] 陈文颖,高鹏飞,何建坤.用MARKAL-MACRO模型研究碳减排对中国能源系统的影响[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(3):342-346.
- [6] 宋晓通,师芊芊,巨云涛,等.综合能源系统低碳规划与运行研究述评[J].高电压技术,2024,50(3):1053-1066.
- [7] 张晓辉,董兴华.含风电场多目标低碳电力系统动态经济调度研究[J].电网技术,2013,37(1):24-31.
- [8] 王荣茂,刘森,张晔,等.基于碳交易与碳捕捉均衡成本的风光火储系统低碳调度技术[J].可再生能源,2023,41(4):562-568.
- [9] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等.考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J].电力自动化设备,2020,40(11):85-93.
- [10] 陈厚合,茅文玲,张儒峰,等.基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(10):1-11.
- [11] 李佳瑶,刘伟娜.考虑碳交易和风荷预测误差的电力系统低碳经济调度[J].浙江电力,2021,40(5):1-6.
- [12] 席佳铭,孙亮,葛沛然,等.考虑电热需求响应的光热-电热综合能源系统源荷协调经济调度[J].东北电力大学学报,2023,43(3):61-71.

A low carbon dispatching model for multi regional power systems based on carbon green certificate market mechanism

Peng Jing¹, Xu Huihui¹, Tian Yunfei¹, Chai Yi¹, Yang Guolin²

(1.Development Division of State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China; 2.State Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment and System Safety and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: The limited availability and supply security issues of traditional energy resources have prompted people to shift towards research on energy interconnection and low-carbon electricity. Integrated energy systems are gradually becoming a key means to achieve energy coordination and energy conservation and emission reduction. In order to manage carbon emissions and promote the utilization of sustainable energy, this paper proposes a multi regional integrated energy system scheduling model based on the carbon green certificate joint market. Regulatory authorities allocate and adjust carbon emissions, and exchange them through two channels: the carbon trading system and the green certificate market system. This article evaluates the feasibility of introducing a carbon green certificate market mechanism in the Integrated Energy System (IES) and establishes a green certificate joint market framework. This article adopts a combined double auction (CDA) mechanism for bidding to determine the optimal price of green certificates, develops optimization models for heating and natural gas networks, and combines them with the constraints of IES to ensure the stable operation of the system. This article analyzes the impact of changes in carbon trading systems, green certificate market systems, and natural gas prices on system operating costs. The simulation experiment results show that the model can significantly improve the efficiency of the comprehensive energy system and reduce carbon emissions.

Keywords: carbon green certificate market; low carbon scheduling; combination double auction; integrated energy system