

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231589

输配电网多主体参与的碳-电耦合市场双层交易决策方法

马佳彤, 张儒峰, 付麟博, 陈厚合

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 碳市场的引入改变了传统化石燃料机组的发电成本, 从而影响其在电力市场中的竞价行为。同时, 输配电网中涉及不同的市场主体, 需在碳-电市场下研究输配电网的市场交易方法。提出了一种基于输配协同的碳-电耦合市场交易决策方法。首先, 提出了考虑输配协同运行的碳-电耦合市场的交易框架。其次, 构建了一种基于输配协同的多主体交易的碳-电耦合市场双层交易决策模型。上层模型为各个配电市场与发电商的碳-电协同交易决策模型, 下层模型为输电市场和碳市场的出清模型, 量化了碳配额与发电量间的关系。再次, 通过 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件、对偶原理以及 Big-M 法将每个交易主体的双层模型转化为单层具有均衡约束的数学模型 (mathematical problem with equilibrium constraints, MPEC), 所有 MPEC 构成了均衡约束均衡规划 (equilibrium problem with equilibrium constraints, EPEC) 模型, 并通过对角化算法进行求解。最后, 基于 T6-D7-D9 和 T30-D33 系统进行算例分析。结果表明, 所提方法可有效促进电力行业减少碳排放, 降低运行总成本的同时提升社会福利。
关键词: 碳市场; 碳-电耦合; 配电市场; 输配协同

A bi-level trading decision-making method for the carbon-electricity coupling market with multi-agent participation in transmission and distribution networks

MA Jiatong, ZHANG Rufeng, FU Linbo, CHEN Houhe

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The introduction of the carbon market has changed the power generation cost of traditional fossil fuel units, thereby affecting bidding behavior in the electricity market. At the same time, different market players are involved in the transmission and distribution network, and it is necessary to study the market trading method of that network in the carbon-electricity market. This paper proposes a carbon-electricity coupling market trading decision-making method based on transmission and distribution coordination. First, a trading framework for the carbon-electricity coupling market considering the coordinated operation of transmission and distribution networks is proposed. Secondly, a two-layer trading model of the carbon-electricity coupling market based on multi-agent transaction based on transmission and distribution coordination is constructed. The upper models are the carbon-electricity collaborative trading decision-making models of each distribution market and power generators, and the lower models are the clearing models of the transmission and carbon markets. This quantifies the relationship between carbon quota and power generation. Then, the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) condition, the duality principle and the Big-M method are used to transform the bi-level model of each trading agent into a single-layer mathematical model with equilibrium constraints (MPEC), and all MPECs constitute an equilibrium problem with equilibrium constraints (EPEC) model, which is analyzed by the diagonalization method. Finally, case analysis is carried out based on the T6-D7-D9 and T30-D33 systems. The results show that the proposed method can effectively promote the reduction of carbon emissions, reduce the total operating cost and improve social welfare in the power industry.

This work is supported by the National Key R & D Program of China (No. 2023YFB2407300).

Key words: carbon market; carbon-electricity coupling; electricity distribution market; transmission and distribution coordination

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 利用碳交易市场机

制控制温室气体排放已经成为推动我国经济绿色低碳发展的重要抓手^[1]。其中, 电力行业是最大的碳排放行业之一^[2], 建设与其密切相关的碳排放权交易市场是实现电力系统合理降碳的重要手段^[3-5]。

一般情况下, 电力市场与碳市场的形成根源不

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (2023YFB2407300)

同, 市场运作相对独立, 但生产电能往往会产出二氧化碳。因此, 电力市场和碳市场具有密不可分的联系。文献[6]将“限额与交易”机制引入到碳市场中, 针对发电企业同时参与碳市场、电力、天然气三个市场的问题进行策略研究。文献[7]建立了碳-电市场联动的系统动力学模型, 分析了电力市场和碳市场的耦合影响。但目前研究大多假设碳价为定值, 按照机组碳排放量计算其碳排放成本, 并将碳排放成本考虑到发电商的目标函数中^[8-9]。文献[10]对碳市场与电力市场的交易均衡策略进行分析, 以月度为时间尺度, 研究了碳-电耦合市场的联动机制。文献[11]在目标函数中增加了碳排放成本, 主要考虑碳价格对发电商决策的影响。然而上述文献均研究给定碳价下的市场均衡, 以碳排放成本或碳价为边界条件, 较少考虑碳市场出清过程以及碳价的波动。文献[12]用已知的平均碳排放限额(carbon emission allowances, CEAs)价格对电力市场和碳市场进行优化。文献[13]针对市场运营商提出一种市场监管策略, 并通过调整 CEA 价格来优化碳市场价格和电力市场价格。文献[14]基于预测的 CEA 价格研究了碳市场耦合辅助服务市场中虚拟发电厂的投标策略。文献[15]建立了配电网经济调度模型, 并在模型中添加了碳排放约束。文献[16]提出了联合碳-电需求响应模型, 考虑并分析了配电网的风电消纳问题。上述研究中, 对于碳-电市场联合出清研究主体大多仅考虑输电网或单个配电网, 而对于碳市场对输配电网协同运行的影响研究较少。

配电网作为输电网和终端用户之间的纽带, 在能源供应链中担任着从输电网购电并将其高效地分配给最终用户的重要角色^[17]。但随着各种分布式能源(distributed energy resource, DER)大量接入到传统配电网中^[18], 燃气机组、风电机组等在配电网中已获得广泛应用, 输电网与配电网之间的功率流动从单向接收变成双向供给^[19]。目前考虑输、配电网协同运行的电力系统优化运行方法已被广泛研究^[20-21]。文献[22]提出了基于交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)来分析输配电网系统的协调恢复策略。文献[23]利用 ADMM 针对电-气耦合系统的输配协同优化问题进行分布式求解。文献[24]将输配全局电力系统黑启动优化模型分层分解为多个子问题, 并利用目标级联法进行优化求解。文献[25]提出了 Benders 分解法, 并对独立系统运营与配电系统运营商(distribution system operator, DSO)经济调度的分层协调问题进行求解。文献[26]提出了一种基于广义 Benders 分解法(generalized benders decomposition, GBD)的输配电

网无功功率的分解优化方法。文献[27]研究了输配电网系统协调的交流最优潮流模型, 并通过异构分解算法(heterogeneous decomposition algorithm, HGD)对该模型进行求解。文献[28]利用基于异构分解法的广义主从分裂方法对输配协同电力系统中最优潮流和经济调度等问题进行研究。文献[29]构建了考虑输配协同的电网规划模型, 并利用主从分裂方法进行求解。文献[30]提出一种双层模型, 将配电系统的运营问题视为上层问题, 批发市场运营商管理的日前市场出清问题视为下层问题, 并利用 KKT 条件和对偶理论将其转化为单层问题进行求解。但上述文献仅考虑了输配电网的优化运行, 并未引入碳市场, 未考虑输配电网协同的低碳运行。

针对上述问题, 本文提出一种基于输配协同优化的碳-电耦合市场交易决策模型与方法。首先, 提出一种考虑输配电网协同运行参与碳-电耦合市场的双层交易模型框架; 其次, 构建一个考虑多主体交易的输配协同的碳-电耦合市场的双层交易模型。上层模型为配电市场以及发电商的碳-电协同决策模型, 下层模型为碳、电市场的出清模型, 双层模型之间交换传输功率、电价、碳配额交易量以及碳价信息; 然后, 基于 KKT 条件将双层模型转化为单层具有均衡约束的数学模型(mathematical problem with equilibrium constraints, MPEC), 利用对偶原理以及 Big-M 法将每个配电网的 MPEC 线性化为混合整数二阶锥规划(mixed-integer second-order cone program, MISOCP)模型, 将每个发电商的 MPEC 线性化为混合整数线性问题(mixed integer linear problem, MILP)后, 所有交易主体的单层模型组成了均衡约束均衡规划(equilibrium problem with equilibrium constraints, EPEC)模型, 并利用对角化算法求解 EPEC 模型; 最后, 采用 T6-D7-D9 和 T30-D33 系统进行算例分析, 验证了所提模型及方法的有效性和适用性。

1 基于输配协同的碳-电耦合市场交易框架

1.1 电力市场和碳市场的结构关系

我国碳市场分为配额交易市场和国家核证自愿减排量(Chinese certified emission reduction, CCER)市场^[31]。在配额市场中, 配额不足的企业需要在市场中购买碳配额, 而配额盈余的企业则可以将多余的碳配额进行出售并以此获得收益。在 CCER 市场中, 可再生能源可以通过温室气体减排核证兑换 CCER 并将其进行出售, 控排企业可以购买 CCER, 从而替代碳配额完成碳配额清缴。

电力市场和碳市场的结构关系如图 1^[32]所示。

两市场的共同参与主体为配电网和发电企业。在电力市场中，发电商和配电网中的分布式机组通过 TSO(transmission system operator, TSO)管理的输电市场向输电网提供电能，同时配电网和输电网之间存在双向功率流动。在碳市场中，发电商以及配电网内分布式机组和碳市场中的其他行业主体通过碳交易所进行碳配额/CCER 交易，两市场的具体交易过程如下。

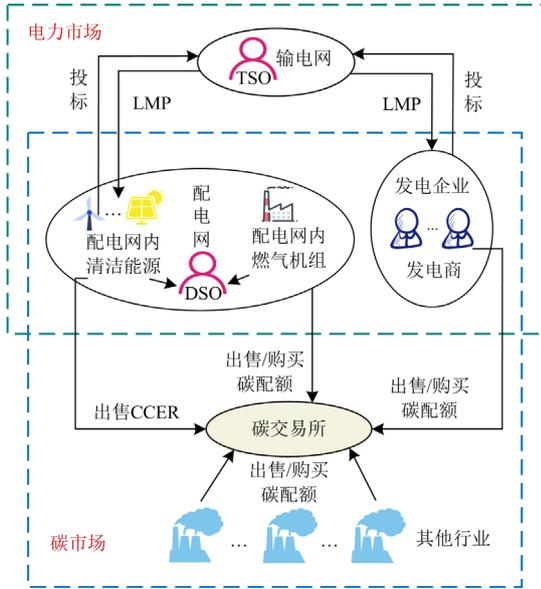


图 1 碳-电市场耦合结构关系

Fig. 1 Structural relationship of carbon-electricity market coupling

在电力市场中，配电网内 DERs 和燃气机组参与 DSO 管理的配电市场出清，并在输电市场中与发电商进行竞争。配电市场层面，DSO 接受来自各 DERs 以及各燃气机组的投标信息进行配电市场的出清，以得到各个 DERs 以及各燃气机组的发电量和配电系统中节点边际电价(distribution locational marginal pricing, DLMP)。输电市场层面，TSO 接受各 DSO 和各发电商的投标信息进行输电市场的出清，以得到各发电商和 DSO 的发电量和节点边际电价(locational marginal pricing, LMP)。

在碳市场中，首先为各个发电企业进行初始碳配额的分配。若初始碳配额小于发电企业所排放的碳排量，即配额不足，则需要通过碳交易在市场中购买碳配额或 CCER；相反，若发电企业初始碳配额大于自身的碳排放量，即配额盈余，则可以将剩余的碳配额或 CCER 通过碳交易所出售到市场中^[33-34]。本文默认碳市场中存在其他行业(指钢铁、造纸、化工等高污染行业)参与碳配额的交易^[35]。

文中采用免费配额分配方法^[36]，基于碳排基准

对发电企业的碳配额总量进行分配。

$$A_i = \sigma_i G_i^h \eta_i \quad (1)$$

式中： A_i 为发电企业 i 在一个履约周期内的初始碳配额； G_i^h 为发电企业 i 在一个履约周期内的历史供电量； σ_i 为发电企业 i 的供电基准值； η_i 为发电企业 i 的修正系数。

发电企业 i 的碳排放总量为

$$E_i = \sum_t G_{i,t} \times I_i \quad (2)$$

式中： E_i 表示发电企业 i 的碳排放总量； $G_{i,t}$ 表示发电企业 i 在 t 时刻的发电量； I_i 表示发电企业 i 的单位碳排放系数。

由式(1)和式(2)可得发电企业 i 在碳市场中碳配额的竞标量 A_i^C 为

$$A_i^C = A_i - \sum_t G_{i,t} \times I_i \quad (3)$$

1.2 输配电网多主体参与的碳-电耦合市场双层交易框架

基于输配电网之间的功率流动以及发电商参与输电市场的出清，本文提出的考虑输配电网协同运行的碳-电耦合市场出清双层模型框架如图 2 所示，具体如下所述。

在电力市场中，各个发电商以及 DSO 在输电市场进行电能交易。在碳市场中，发电商、DSO 和碳市场中的其他行业进行碳配额/CCER 交易。DSO 负责配电网的碳-电协同决策，参与到输电市场和碳市场中。

1) 上层 1: 配电市场由 DSO 组织市场集中出清，以在电、碳两市场中总成本最小为目标决定自身交易决策。考虑到输配电网之间的功率流动，DSO 接收到各 DERs 以及各燃气机组的投标信息，以最小运行成本为目标进行配电市场的出清。配电网内燃气机组碳配额以及清洁能源初始 CCER 的使用量和价格影响其在电力市场的投标量，再根据配电网内发电机组的发电量确定自身的碳排放量以确定其在碳市场投标的碳配额。

2) 上层 2: 发电商以在电、碳两市场中总利润最大为目标决定自身交易决策。发电商初始碳配额的使用情况及价格会影响其在电力市场的投标量，再根据其发电量确定自身的碳排放量以确定其在碳市场投标的碳配额。

3) 下层 1: 输电市场由 TSO 组织市场集中出清。上层多个 DSO 以及发电商向 TSO 提交报价及供电量，TSO 根据申报情况，以运行成本最小为目标进行市场出清。电价采用 LMP 结算^[37]。

4) 下层 2: 碳市场由碳交易所组织市场集中出

清。上层 DSO 和发电商根据输电市场的出清结果和碳排放强度(carbon emission intensity, CEI)计算其 CEA 需求后, 向碳市场运营商提交供应/采购投标以及碳报价(包括其他行业), 碳交易所将根据所有

交易主体的申报情况, 以碳配额交易期间的社会福利最大化为目标进行市场出清, 并将 CEA 的交易量和碳市场出清价格传回。

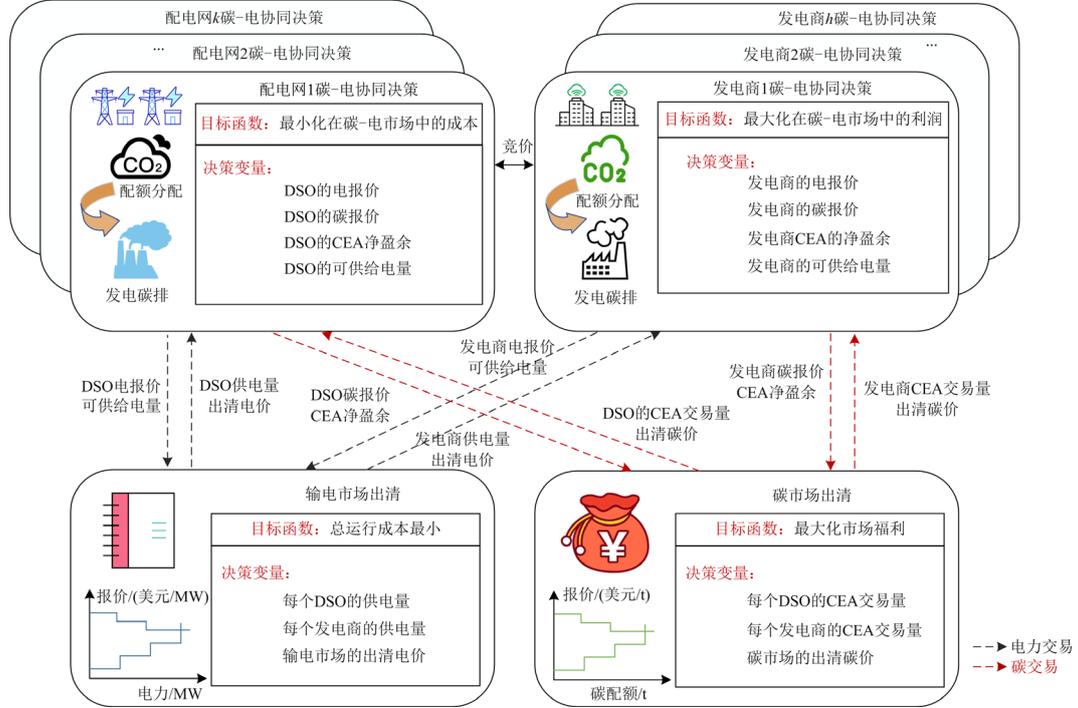


图 2 输配电网多主体参与的碳-电耦合市场双层交易框架图

Fig. 2 Two-tier trading framework diagram of carbon-electricity coupling market with multi-agent participation in transmission and distribution networks

DSO 和发电商通过发电和交易决策连接电力市场和碳市场, 且两市场的减排目标一致。所有交易主体综合考虑两市场供需、价格走势、碳排放水平和配额分配, 从而做出最优决策。

2 输配电网多主体参与的碳-电耦合市场双层交易模型构建

2.1 上层模型 I: 配电系统碳-电协同交易决策模型

上层模型 I 为 DSO 代理的配电系统碳-电协同决策模型, 配电市场以在输电市场与碳市场中的成本最小化为目标, 决定自身在下层模型中的碳-电协同竞标策略。

目标函数式(4)表示最小化配电系统 k 的总运行成本。

$$\min R_k^E + R_k^C \quad (4)$$

式中, R_k^E 、 R_k^C 分别表示在输电市场和在碳市场中的成本。

在输电市场中的成本 R_k^E 表达式如式(5)所示。

式(5)中第 1 项表示总发电成本, 第 2 项表示和输电市场交互电能的成本或收益。

$$R_k^E = \sum_t \sum_h (\lambda_{k,h,t}^G \cdot P_{k,t}^{hG} - \lambda_{j,t}^E \cdot P_{k,h,t}^G) \quad (5)$$

式中: $\lambda_{k,h,t}^G$ 为配电系统 k 中发电机组 h 在 t 时刻的单位发电成本; $P_{k,t}^{hG}$ 为配电系统 k 中发电机组 h 在 t 时刻的发电量; $\lambda_{j,t}^E$ 为 t 时刻节点 j 的出清电价; $P_{k,h,t}^G$ 为配电系统 k 中发电机组 h 在 t 时刻和输电电网交互的电量(假设售出的电能为正, 购买的电能为负)。

在碳市场中的成本 R_k^C 为

$$R_k^C = \lambda^C \sum_h A_{k,h}^C \quad (6)$$

式中: λ^C 为碳市场的出清碳价; $A_{k,h}^C$ 为配电系统 k 中发电机组 h 在碳市场中交易的碳配额量(设售出的碳配额为负, 购买的碳配额为正)。电价和碳价分别通过输电市场和碳市场出清获得。

配电系统碳-电协同决策模型的约束条件如下:

式(7)为配电系统 k 中节点 j 的有功功率平衡约束；式(8)为配电系统 k 中节点 j 的无功功率平衡约束；式(9)为电压降方程；式(10)为线路 ij 潮流约束；式(11)为节点 j 的电压上下限约束；式(12)、式(13)分别为节点 j 处电源有功、无功上下限约束；式(14)、式(15)分别为配电系统 k 中发电机组 h 在碳市场和电力市场的报价上下限约束；式(16)为配电系统 k 中发电机组 h 的可供电量约束；式(17)为配电系统 k 中发电机组 h 的碳配额清缴约束(配电系统 k 的初始碳配额与在碳市场中交易的碳配额之和等于其碳排放总量)。

$$\sum_{i \in a_1(j)} P_{ij,t} - l_{ij,t} r_{ij} - \sum_{e \in a_2(j)} P_{je,t} + \sum_h P_{k,j,t}^{hG} - P_{D,j,t} - \sum_h P_{k,h,t}^G = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i \in a_1(j)} Q_{ij,t} - l_{ij,t} x_{ij} - \sum_{e \in a_2(j)} Q_{je,t} + \sum_h Q_{k,j,t}^{hG} - Q_{D,j,t} = 0 \quad (8)$$

$$u_{j,t} = u_{i,t} - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) + ((r_{ij})^2 + (x_{ij})^2) l_{ij,t} \quad (9)$$

$$\|2P_{ij} \quad 2Q_{ij} \quad l_{ij} - u_{ij}\| \leq l_{ij} + u_{ij} \quad (10)$$

$$(V_{j,\min})^2 \leq u_{j,t} \leq (V_{j,\max})^2 \quad (11)$$

$$P_{k,t,\min}^{hG} \leq P_{k,j,t}^{hG} \leq P_{k,t,\max}^{hG} \quad (12)$$

$$Q_{k,t,\min}^{hG} \leq Q_{k,j,t}^{hG} \leq Q_{k,t,\max}^{hG} \quad (13)$$

$$\alpha_{k,h}^{C\min} \leq \alpha_{k,h}^C \leq \alpha_{k,h}^{C\max} \quad (14)$$

$$\alpha_{k,h}^{G\min} \leq \alpha_{k,h}^G \leq \alpha_{k,h}^{G\max} \quad (15)$$

$$P_{k,h,t}^{\text{netG}} = P_{k,t,\max}^{hG} - P_{k,h,t}^{\text{KG}} \quad (16)$$

$$A_{k,h} + A_{k,h}^C = \sum_t P_{k,j,t}^{hG} \cdot I_{k,h} \quad (17)$$

式中： $a_1(j)$ 是末端节点 j 的线路始端节点集合； $a_2(j)$ 是始端节点 j 的线路末端节点集合； $P_{ij,t}$ 和 $Q_{ij,t}$ 分别表示 t 时刻线路 ij 上从节点 i 到节点 j 流动的有功功率和无功功率； $P_{je,t}$ 和 $Q_{je,t}$ 分别表示 t 时刻线路 je 上从节点 j 到节点 e 流动的有功功率和无功功率； r_{ij} 和 x_{ij} 分别表示节点 i 和 j 之间的电阻和电抗； $l_{ij,t}$ 表示 t 时刻节点 i 和 j 之间的电流的平方； l_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的电流的平方； u_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的电压的平方； $P_{D,j,t}$ 和 $Q_{D,j,t}$ 分别表示 t 时刻节点 j 上的有功负荷和无功负荷； $u_{i,t}$ 表示 t 时刻节点 i 的电压的平方； $u_{j,t}$ 表示 t 时刻节点 j 的电压的平方； $V_{j,\min}$ 和 $V_{j,\max}$ 分别表示节点 j 电压的下限和上限； $P_{k,j,t}^{hG}$ 和 $Q_{k,j,t}^{hG}$ 分别表示 t 时刻配电网节点 j 上发电机组 h 的有功功率输出和无功功率输出； $P_{k,t,\min}^{hG}$ 和

$P_{k,t,\max}^{hG}$ 分别表示配电系统 k 中发电机组 h 输出的有功功率的下限和上限； $Q_{k,t,\min}^{hG}$ 和 $Q_{k,t,\max}^{hG}$ 分别表示配电系统 k 中发电机组 h 输出的无功功率的下限和上限； $\alpha_{k,h}^C$ 和 $\alpha_{k,h}^G$ 分别表示配电系统 k 中发电机组 h 在碳市场和电力市场中的报价； $\alpha_{k,h}^{C\min}$ 和 $\alpha_{k,h}^{C\max}$ 分别表示配电系统 k 中发电机组 h 在碳市场中报价的下限和上限； $\alpha_{k,h}^{G\min}$ 和 $\alpha_{k,h}^{G\max}$ 分别表示配电系统 k 中发电机组 h 在电力市场中报价的下限和上限； $P_{k,h,t}^{\text{KG}}$ 表示 t 时刻配电系统 k 中发电机组 h 满足自身负荷时的发电量； $P_{k,h,t}^{\text{netG}}$ 表示 t 时刻配电系统 k 中发电机组 h 可以提供给输电网电量的上限； $I_{k,h}$ 表示配电系统 k 中发电机组 h 的单位基准碳排放量； $A_{k,h}$ 表示配电系统 k 中发电机组 h 的初始分配的碳排放配额； $A_{k,h}^C$ 表示配电系统 k 中发电机组 h 在碳市场中碳排放配额的交易量。

2.2 上层模型 II：发电商碳-电协同决策模型

同上层模型 I 类似，上层模型 II 为发电商的碳-电协同决策模型，发电商以最大化自身在输电市场与碳市场中的总利润为目标，从而决定在下层模型中的碳-电协同竞标策略。

目标函数式(18)表示发电商 f 的利润最大化。

$$\max R_f^E + R_f^C \quad (18)$$

式中， R_f^E 、 R_f^C 分别表示在电力现货市场中的利润和在碳市场中的利润。

在电力现货市场中的利润 R_f^E 表达式如式(19)：

第 1 项表示发电商的售电收益，第 2 项表示发电商的发电成本。

$$R_f^E = \sum_t (\lambda_{j,t}^E \cdot P_{f,t}^G - \lambda_{f,t}^G \cdot P_{f,t}^G) \quad (19)$$

式中： $P_{f,t}^G$ 表示发电商 f 在 t 时刻向输电网出售的电量； $\lambda_{f,t}^G$ 表示发电商 f 在 t 时刻的单位发电成本。

在碳市场中的利润 R_f^C 表达式为

$$R_f^C = -\lambda^C A_f^C \quad (20)$$

式中， A_f^C 为发电商 f 在碳市场中交易的碳配额量(售出的碳配额为负，购买的碳配额为正)。

发电商碳-电协同决策模型的约束条件如下：

式(21)、式(22)分别为发电商 f 在碳市场和电力市场的报价上下限约束；式(23)为发电商 f 碳配额清缴约束。

$$\alpha_f^{C\min} \leq \alpha_f^C \leq \alpha_f^{C\max} \quad (21)$$

$$\alpha_f^{\text{Gmin}} \leq \alpha_f^{\text{G}} \leq \alpha_f^{\text{Gmax}} \quad (22)$$

$$A_f + A_f^{\text{C}} = \sum_t P_{f,t}^{\text{G}} \cdot I_f \quad (23)$$

式中: α_f^{C} 和 α_f^{G} 分别表示发电商 f 在碳市场和电力市场中的报价; α_f^{Cmin} 和 α_f^{Cmax} 分别表示发电商 f 在碳市场中报价的下限和上限; α_f^{Gmin} 和 α_f^{Gmax} 分别表示发电商 f 在电力市场中报价的下限和上限; I_f 表示发电商 f 的单位基准碳排放量; A_f 表示发电商 f 的初始分配的碳排放配额。

2.3 下层模型 I: 输电市场出清模型

在所有发电商与配电网内发电机组申报完电报价以及可发电量后, TSO 出清输电市场。市场出清模型以输电系统总发电成本最小为优化目标, 如式(24)所示。式(25)为输电系统总功率平衡方程; 式(26)为配电网供电能力约束; 式(27)为发电商可发电量上下限约束; 式(28)为线路传输功率的上下限约束。

$$\min \sum_t \left[\sum_{k,h} (\alpha_{k,h}^{\text{G}} \cdot P_{k,h,t}^{\text{G}}) + \sum_f (\alpha_f^{\text{G}} \cdot P_{f,t}^{\text{G}}) \right] \quad (24)$$

$$\sum_{k,h} P_{k,h,t}^{\text{G}} + \sum_f P_{f,t}^{\text{G}} - P_{n,t}^{\text{D}} = 0 : \lambda_{n,t} \quad (25)$$

$$P_{k,h,t}^{\text{Gmin}} \leq P_{k,h,t}^{\text{G}} \leq P_{k,h,t}^{\text{netG}} : \varepsilon_{k,h,t}^{\text{Gmin}}, \varepsilon_{k,h,t}^{\text{Gmax}} \quad (26)$$

$$P_{f,t}^{\text{Gmin}} \leq P_{f,t}^{\text{G}} \leq P_{f,t}^{\text{Gmax}} : \varepsilon_{f,t}^{\text{Gmin}}, \varepsilon_{f,t}^{\text{Gmax}} \quad (27)$$

$$-L_l \leq \sum_{n=1}^N \sum_{k,h} S_{l-n} \cdot P_{k,h,t}^{\text{G}} + \sum_{n=1}^N \sum_f S_{l-n} \cdot P_{f,t}^{\text{G}} - \sum_{n=1}^N S_{l-n} \cdot P_{n,t}^{\text{D}} \leq L_l : \mu_{l,t}^{\text{min}}, \mu_{l,t}^{\text{max}} \quad (28)$$

式中: $P_{n,t}^{\text{D}}$ 表示节点 n 处负荷; $P_{k,h,t}^{\text{Gmin}}$ 表示配电网中发电机组 h 出力的下限; $P_{f,t}^{\text{Gmin}}$ 和 $P_{f,t}^{\text{Gmax}}$ 分别表示发电商 f 出力的下限和上限; L_l 表示输电线路 l 允许流经的最大有功功率; S_{l-n} 表示节点 n 与线路 l 的发电转移因子; N 表示节点 n 的集合。各约束冒号后的变量为该约束对应的对偶变量。

2.4 下层模型 II: 碳市场出清模型

碳市场由碳交易所进行集中出清^[38]。碳市场的出清以碳配额交易期间的社会福利最大化为目标, 如式(29)所示: 第 1 项表示 DSO 在碳市场中的交易成本; 第 2 项表示所有发电商在碳市场中的交易成本; 第 3 项表示所有其他行业主体在碳市场中的交易成本。式(30)表示市场碳配额数量平衡约束。式(31)表示其他行业市场主体 q 所交易的碳配额数量约束。

$$\max \sum_{k,h} \alpha_{k,h}^{\text{C}} \cdot A_{k,h}^{\text{C}} + \sum_f \alpha_f^{\text{C}} \cdot A_f^{\text{C}} + \sum_q \alpha_q^{\text{C}} \cdot A_q^{\text{C}} \quad (29)$$

$$\sum_{k,h} A_{k,h}^{\text{C}} + \sum_f A_f^{\text{C}} + \sum_q A_q^{\text{C}} = 0 : \lambda^{\text{C}} \quad (30)$$

$$A_q^{\text{Cmin}} \leq A_q^{\text{C}} \leq A_q^{\text{Cmax}} : \varepsilon_q^{\text{Cmin}}, \varepsilon_q^{\text{Cmax}} \quad (31)$$

式中: α_q^{C} 和 A_q^{C} 分别为其他行业 q 在碳市场中碳配额的报价以及交易量; A_q^{Cmax} 表示其他行业市场主体 q 所交易碳配额数量的最大值; λ^{C} 为式(30)的对偶变量, 表示碳市场中出清碳价。

2.5 模型转化

本文提出的考虑输配电网协同运行的碳-电市场耦合的双层交易模型含有多个交易主体, 难以直接求解, 故需要对上述问题进行模型转化。模型转化求解思路为: 先将每个交易主体的双层模型转化为单层 MPEC, 即所有交易主体的 MPEC 组成一个 EPEC 问题, 在纳什均衡原理的基础上利用对角化算法对 EPEC 进行求解。

2.5.1 MPEC 转化

针对本文所提出的双层交易模型, 利用 KKT 条件将下层模型转化为原-对偶问题, 进而将双层模型转化为 MPEC, 通过 Big-M 法将下层模型中的互补松弛条件进行线性化处理, 最终配电网转化后的模型为 MISOCP 问题, 发电商转化后的模型为 MILP 问题。

下层输电市场模型等价的 KKT 条件如式(32)一式(39)所示。式(32)和式(33)为下层模型 I 中拉格朗日函数的一阶偏导数, 式(34)一式(39)为 KKT 条件中的互补松弛条件。下层碳市场模型等价的 KKT 条件如式(40)一式(44)所示。式(40)一式(42)为下层模型 II 中拉格朗日函数的一阶偏导数, 式(43)和式(44)为 KKT 条件中的互补松弛条件。其中每个互补条件的形式 $0 \leq \psi \perp g(x) \geq 0$ 表示满足 $\psi \geq 0$ 、 $g(x) \geq 0$ 和 $\psi g(x) = 0$ 三个约束。

$$\alpha_{k,h}^{\text{G}} - \lambda_{n,t} + \varepsilon_{k,h,t}^{\text{Gmin}} - \varepsilon_{k,h,t}^{\text{Gmax}} + \sum_{l=1}^N S_{l-n} (\mu_{l,t}^{\text{min}} - \mu_{l,t}^{\text{max}}) = 0 \quad (32)$$

$$\alpha_f^{\text{G}} - \lambda_{n,t} + \varepsilon_{f,t}^{\text{Gmin}} - \varepsilon_{f,t}^{\text{Gmax}} + \sum_{l=1}^N S_{l-n} (\mu_{l,t}^{\text{min}} - \mu_{l,t}^{\text{max}}) = 0 \quad (33)$$

$$0 \leq (P_{k,h,t}^{\text{G}} - P_{k,h,t}^{\text{Gmin}}) \perp \varepsilon_{k,h,t}^{\text{Gmin}} \geq 0 \quad (34)$$

$$0 \leq (P_{k,h,t}^{\text{netG}} - P_{k,h,t}^{\text{G}}) \perp \varepsilon_{k,h,t}^{\text{Gmax}} \geq 0 \quad (35)$$

$$0 \leq (P_{f,t}^{\text{G}} - P_{f,t}^{\text{Gmin}}) \perp \varepsilon_{f,t}^{\text{Gmin}} \geq 0 \quad (36)$$

$$0 \leq (P_{f,t}^{\text{Gmax}} - P_{f,t}^{\text{G}}) \perp \varepsilon_{f,t}^{\text{Gmax}} \geq 0 \quad (37)$$

$$0 \leq \sum_{n=1}^N \sum_{k,h} S_{l-n} \cdot P_{k,h,t}^{\text{G}} + \sum_{n=1}^N \sum_f S_{l-n} \cdot P_{f,t}^{\text{G}} - \sum_{n=1}^N S_{l-n} \cdot P_{n,t}^{\text{D}} + L_l \perp \mu_{l,t}^{\text{min}} \geq 0 \quad (38)$$

$$0 \leq \left(-\sum_{n=1}^N \sum_{k,h} S_{l-n} \cdot P_{k,h,t}^G - \sum_{n=1}^N \sum_f S_{l-n} \cdot P_{f,t}^G + \sum_{n=1}^N S_{l-n} \cdot P_{n,t}^D + L_l \right) \perp \mu_{l,t}^{\max} \geq 0 \quad (39)$$

$$\alpha_{k,h}^C - \lambda^C = 0, \forall h \quad (40)$$

$$\alpha_f^C - \lambda^C = 0, \forall f \quad (41)$$

$$\alpha_q^C - \lambda^C - \varepsilon_q^{\text{Cmin}} + \varepsilon_q^{\text{Cmax}} = 0 \quad (42)$$

$$0 \leq A_q^C - A_q^{\text{Cmin}} \perp \varepsilon_q^{\text{Cmin}} \geq 0, \forall q \quad (43)$$

$$0 \leq A_q^{\text{Cmax}} - A_q^C \perp \varepsilon_q^{\text{Cmax}} \geq 0, \forall q \quad (44)$$

本文所提出的每个交易主体的MPEC中存在非线性的双线性项和互补约束条件，难以直接求解。因此，本节首先将非线性互补约束转换为线性约束，然后将目标函数中的双线性项进行线性化，从而使所提出的MPEC转换为MISOCP或MILP，实现模型的高效求解。

1) 下层输电市场的约束(26)–(28)替换为输电市场的互补条件(45)–(56)：每个互补约束的 $0 \leq \psi \perp g(x) \geq 0$ 公式可基于Big-M方法进行线性化^[39]，替换为 $0 \leq \psi \leq gM_1$ 和 $0 \leq g(x) \leq (1-g)M_2$ ，其中 g 是一个二进制变量， M_1 和 M_2 是足够大的值。MPEC的补充约束可转换为

$$0 \leq \varepsilon_{k,h,t}^{\text{Gmin}} \leq M_1^{\text{min}} \cdot g_{1t}^{\text{min}} \quad (45)$$

$$0 \leq P_{k,h,t}^G - P_{k,h,t}^{\text{Gmin}} \leq M_1^{\text{min}} \cdot (1 - g_{1t}^{\text{min}}) \quad (46)$$

$$0 \leq \varepsilon_{k,h,t}^{\text{Gmax}} \leq M_1^{\text{max}} \cdot g_{1t}^{\text{max}} \quad (47)$$

$$0 \leq P_{k,h,t}^{\text{netG}} - P_{k,h,t}^G \leq M_1^{\text{max}} \cdot (1 - g_{1t}^{\text{max}}) \quad (48)$$

$$0 \leq \varepsilon_{f,t}^{\text{Gmin}} \leq M_2^{\text{min}} \cdot g_{2t}^{\text{min}} \quad (49)$$

$$0 \leq P_{f,t}^G - P_{f,t}^{\text{Gmin}} \leq M_2^{\text{min}} \cdot (1 - g_{2t}^{\text{min}}) \quad (50)$$

$$0 \leq \varepsilon_{f,t}^{\text{Gmax}} \leq M_2^{\text{max}} \cdot g_{2t}^{\text{max}} \quad (51)$$

$$0 \leq P_{f,t}^{\text{Gmax}} - P_{f,t}^G \leq M_2^{\text{max}} \cdot (1 - g_{2t}^{\text{max}}) \quad (52)$$

$$0 \leq \mu_{l,t}^{\text{min}} \leq M_3^{\text{min}} \cdot g_{3t}^{\text{min}} \quad \forall t \quad (53)$$

$$0 \leq \sum_{n=1}^N S_{l-n} \cdot P_{k,t}^G + \sum_{n=1}^N S_{l-n} \cdot P_{f,t}^G - \sum_{n=1}^N S_{l-n} \cdot P_{n,t}^D + L_l \leq M_3^{\text{min}} \cdot (1 - g_{3t}^{\text{min}}) \quad \forall k, \forall f, \forall t \quad (54)$$

$$0 \leq \mu_{l,t}^{\text{max}} \leq M_3^{\text{max}} \cdot g_{3t}^{\text{max}} \quad \forall t \quad (55)$$

$$0 \leq L_l - \sum_{n=1}^N S_{l-n} \cdot P_{k,t}^G - \sum_{n=1}^N S_{l-n} \cdot P_{f,t}^G + \sum_{n=1}^N S_{l-n} \cdot P_{n,t}^D \leq M_3^{\text{max}} \cdot (1 - g_{3t}^{\text{max}}) \quad \forall k, \forall f, \forall t \quad (56)$$

式中： M_1^{min} 、 M_1^{max} 、 M_2^{min} 、 M_2^{max} 、 M_3^{min} 、 M_3^{max} 均是足够大的值； $g_{1,t}^{\text{min}}$ 、 $g_{1,t}^{\text{max}}$ 、 $g_{2,t}^{\text{min}}$ 、 $g_{2,t}^{\text{max}}$ 、 $g_{3,t}^{\text{min}}$ 、 $g_{3,t}^{\text{max}}$ 均

是二进制变量。

2) 下层碳市场的约束(30)–(31)替换为碳市场的互补条件(57)–(60)。

$$0 \leq \varepsilon_q^{\text{Cmin}} \leq M_4^{\text{min}} \cdot g_{4,t}^{\text{min}} \quad \forall q \quad (57)$$

$$0 \leq A_q^C - A_q^{\text{Cmin}} \leq M_4^{\text{min}} \cdot (1 - g_{4,t}^{\text{min}}) \quad \forall q \quad (58)$$

$$0 \leq \varepsilon_q^{\text{Cmax}} \leq M_4^{\text{max}} \cdot g_{4,t}^{\text{max}} \quad \forall q \quad (59)$$

$$0 \leq A_q^{\text{Cmax}} - A_q^C \leq M_4^{\text{max}} \cdot (1 - g_{4,t}^{\text{max}}) \quad \forall q \quad (60)$$

式中： M_4^{min} 、 M_4^{max} 是足够大的值； $g_{4,t}^{\text{min}}$ 、 $g_{4,t}^{\text{max}}$ 是二进制变量。

3) 输电市场目标函数中包含双线性项 $\lambda_{j,t}^E \cdot P_{k,h,t}^G$ 和 $\lambda_{j,t}^E \cdot P_{f,t}^G$ ，可以基于强对偶理论进行线性化^[40]，转化后的双线性项可以表示为

$$\begin{aligned} \lambda_{j,t}^E P_{k,h,t}^G + \lambda_{j,t}^E P_{f,t}^G &= \lambda_{n,t} P_{n,t}^D - \sum_{k'+k \in K} \varepsilon_{k',h,t}^{\text{Gmax}} P_{k',h,t}^{\text{netG}} - \\ &\sum_f \varepsilon_{f,t}^{\text{Gmax}} P_{f,t}^{\text{Gmax}} + \mu_{l,t}^{\text{min}} (-L_l + \sum_n S_{l-n} \cdot P_{n,t}^D) + \\ &\mu_{l,t}^{\text{max}} (-\sum_n S_{l-n} \cdot P_{n,t}^D - L_l) + \lambda_{n,t} P_{n,t}^D - \sum_k \varepsilon_{k,h,t}^{\text{Gmax}} P_{k,h,t}^{\text{netG}} - \\ &\sum_{f'+f \in F} \varepsilon_{f',t}^{\text{Gmax}} P_{f',t}^{\text{Gmax}} + \mu_{l,t}^{\text{min}} (-L_l + \sum_n S_{l-n} \cdot P_{n,t}^D) + \\ &\mu_{l,t}^{\text{max}} (-\sum_n S_{l-n} \cdot P_{n,t}^D - L_l) \end{aligned} \quad (61)$$

式中： K 表示配电系统 k 的集合； F 表示发电商 f 的集合； k' 表示 K 中除配电系统 k 外所有配电系统的集合； f' 表示 F 中除发电商 f 外所有发电商的集合。

4) 碳市场目标函数中的双线性项 $\lambda^C \cdot A_{k,h}^C$ 和 $\lambda^C \cdot A_f^C$ 可以表示为

$$\lambda^C A_f^C + \lambda^C A_{k,h}^C = 2 \times \sum_q (\varepsilon_q^{\text{Cmin}} A_q^{\text{Cmin}} - \varepsilon_q^{\text{Cmax}} A_q^{\text{Cmax}}) \quad (62)$$

由此，利用MEPC的线性化形式，将DSO的MPEC重新表述为MISOCP问题，将发电商的MPEC重新表述为MILP问题，转化后每个交易主体单层模型如下所述。

配电市场：

$$\begin{aligned} \max \sum_t (\lambda_{n,t} P_{n,t}^D - \sum_{k'+k \in K} \varepsilon_{k',h,t}^{\text{Gmax}} P_{k',h,t}^{\text{netG}}) - \\ \sum_t \sum_f \varepsilon_{f,t}^{\text{Gmax}} P_{f,t}^{\text{Gmax}} + \sum_t \mu_{l,t}^{\text{min}} (-L_l + \sum_n S_{l-n} \cdot P_{n,t}^D) + \\ \sum_t \mu_{l,t}^{\text{max}} (-\sum_n S_{l-n} \cdot P_{n,t}^D - L_l) - \sum_t \sum_f \lambda_{f,t}^G \cdot P_{f,t}^G + \\ \sum_q (\varepsilon_q^{\text{Cmin}} A_q^{\text{Cmin}} - \varepsilon_q^{\text{Cmax}} A_q^{\text{Cmax}}) \end{aligned} \quad (63)$$

约束条件为式(7)一式(17)、式(32)一式(39)以及式(45)一式(56)。

发电商:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_t \lambda_{n,t} P_{n,t}^D - \sum_t \sum_k \varepsilon_{k,h,t}^{\text{Gmax}} P_{k,h,t}^{\text{netG}} - \\ & \sum_t \sum_{f'+f \in H} \varepsilon_{f',t}^{\text{Gmax}} P_{f',t}^{\text{Gmax}} + \sum_t \mu_{l,t}^{\min} (-L_l + \sum_n S_{l-n} \cdot P_{n,t}^D) + \\ & \sum_t \mu_{l,t}^{\max} (-\sum_n S_{l-n} \cdot P_{n,t}^D - L_l) - \sum_t \sum_f \lambda_{f,t}^G \cdot P_{f,t}^G + \\ & \sum_q (\varepsilon_q^{\text{Cmin}} A_q^{\text{Cmin}} - \varepsilon_q^{\text{Cmax}} A_q^{\text{Cmax}}) \end{aligned} \quad (64)$$

约束条件为式(20)一式(23)、式(40)一式(44)以及式(57)一式(60)。

2.5.2 EPEC 求解

利用对角化算法迭代求解 EPEC^[41]。在本文中, DSO 和发电商为并列关系。在每次迭代中, 通过将具有发电能力的(本文指 DSO 和发电商)所有其他 MPEC 的决策变量的值(指除自身以外的交易主体)设置为它们在上一次迭代中求解的值, 来求解所有交易主体(所有的 DSO 和发电商)的 MPEC, 直到满足预设的停止标准或者达到预设的最大迭代次数时算法结束。设 Γ_i^D 为所有交易主体 i 的上层问题中的决策变量集。

该算法的详细过程描述如下:

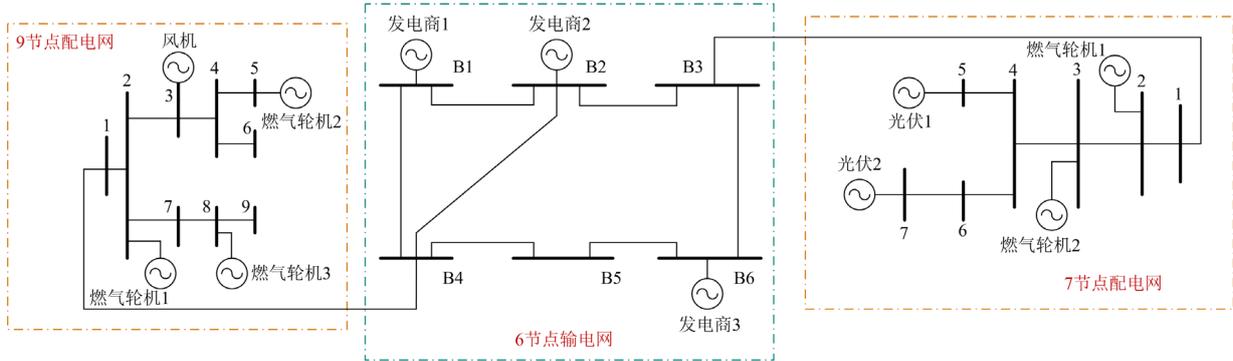


图3 T6-D7-D9 系统结构图

Fig. 3 T6-D7-D9 system structure diagram

碳市场中除上述发电机组以外, 还包含 3 个其他行业的市场主体。配电网和发电商相关参数如表 1—表 3 所示^[42]。图 4 给出了各个电网负荷以及配电网内分布式能源数据。

为了分析碳市场、电力市场耦合交易时碳-电协同效果以及配电网参与碳市场出清的影响, 依据本文所提模型和方法分别对以下 3 个场景进行算例分析。

1) 对于每个交易主体 $i(i=1,2,\dots,I)$, 确定上层问题中决策变量的初始值 Γ_i^{D0} , 设置算法收敛性的精度 ε 以及最大迭代次数 N_D 。设置迭代次数 $n_D = A$ 。

2) 在已知其他交易主体的决策变量($\Gamma_{i'}^D = \Gamma_{i'}^{D0}$, $i' \neq i$)的情况下, 求解交易主体 i 的 MPEC。MPEC 的解, 即交易主体 i 的最优决策变量是 Γ_i^{D1} 。

3) 若 $\|\Gamma_i^{D1} - \Gamma_i^{D0}\|_2 \leq \varepsilon$, 则最优策略 $\Gamma_i^D = \Gamma_i^{D1}$ 已被找到; 如果 $\|\Gamma_i^{D1} - \Gamma_i^{D0}\|_2 > \varepsilon$, 则继续进行迭代。

4) 设置 $n_D = n_D + A$, $\Gamma_i^{D0} = \Gamma_i^{D1}$ 返回到步骤 2) 继续运行。

5) 若迭代次数达到最大值 $n_D = N_D$, 则停止算法并报告没有找到解决方案, 此时可调整决策变量初始值 Γ_i^{D0} , 继续求解。

以上模型可在 Matlab 2016a 中使用 CVX 工具箱建模, 并调用 Mosek 求解器进行求解。

3 算例分析

为验证所提模型的有效性和适用性, 本文采用 T6-D7-D9 和 T30-D33 两个系统进行算例分析。

3.1 T6-D7-D9 系统数据

假设有 2 个配电网和 3 个发电商同时参与输电市场和碳市场交易。发电商 1、2 为燃煤发电商, 发电商 3 为燃气发电商。网络拓扑结构如图 3 所示。

表 1 7 节点配电网内燃气轮机参数

Table 1 Gas turbine parameters in the 7-node distribution network

燃气机组	发电容量/MW	成本/(美元/MW)	碳排放强度/(t/MWh)	初始碳配额/t
C1	1.6	63	0.495	11.85
C2	1.3	68	0.482	9.63

表 2 9 节点配电网内燃气轮机参数
Table 2 Gas turbine parameters in the 9-node distribution network

燃气机组	发电容量/ MW	成本/ (美元/MW)	碳排放强度/ (t/MWh)	初始碳 配额/t
C1	1.3	65	0.432	9.95
C2	1.7	70	0.413	13.02
C3	1.2	62	0.476	9.19

表 3 发电商参数

Table 3 Generator parameters

发电商	发电容量/ MW	成本/ (美元/MW)	碳排放强度/ (t/MWh)	初始碳 配额/t
G1	250	19	0.895	3232.23
G2	130	25	0.775	1129.54
G3	115	37	0.425	468.28

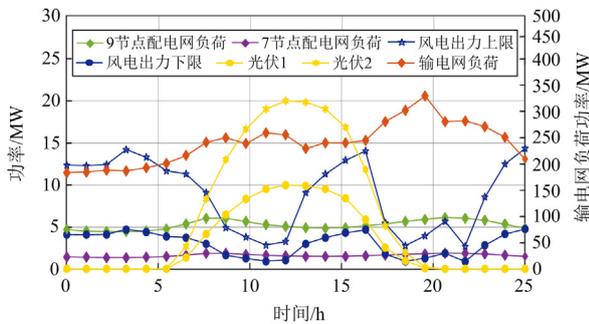


图 4 各电网负荷以及分布式能源数据

Fig. 4 Data of individual grid loads and distributed power sources

场景 1: 仅考虑电力市场的均衡分析, 输配电网单独出清, 所有发电机组未施加碳排放总量限制, 碳交易成本用碳税来计算。

场景 2: 仅考虑电力市场的均衡分析, 输配电网协同运行, DSO 和发电商同时参与输电市场出清, 所有发电机组未施加碳排放总量限制, 碳交易成本用碳税来计算。

场景 3(本文所提方法): 考虑碳-电耦合市场均衡分析, DSO 和发电商同时参与输电市场出清, 所有发电机组施加碳排放总量限制, 碳交易成本通过碳市场来计算。

其中场景 1 中输配电网单独出清是指在配电网中将与输电网络连接的节点等效成一个发电机进行功率交换, 得到边界传输功率后, 输电网络再将边界传输功率视为配电网负荷进行出清。为对比所有场景的交易结果, 碳排放量按碳税计算碳排放成本, 碳税为 30 美元/t^[39]。碳市场与碳税的不同为: 碳税的价格固定且碳配额总量没有上限, 而碳市场是控制碳

配额总量的自由交易市场, 一般价格是变化的, 由市场出清后得到。

3.2 数据分析

3.2.1 考虑输配协同运行对电力市场出清的影响

1) 不同场景下配电网 DLMPs 对比

为分析考虑输配协同后电力市场对配电市场出清价格的影响, 图 5 和图 6 给出了场景 1 和场景 2 下配电市场的节点边际电价结果对比图。

配电网内的 DLMPs 是由电源电量报价、网损和网络约束等多方面因素共同决定的, 因此各个节点的 DLMP 不完全相同。从图 5 和图 6 可以看出, 场景 2 下的 7 节点、9 节点配电网的 DLMPs 要略低于场景 1, 这是由于在考虑输配协同运行后, DERs 出力缓解了输电网络的供能压力, 降低了输电网络中各节点的 LMP, 从而降低了配电网的购电价格, 进而降低了 DLMPs。因此, 相比于场景 1, 场景 2 中通过降低输电市场中节点的 LMP 从而降低配电市场的 DLMPs, 以上结果证明了输配协同运行可有效降低配电网系统的节点边际电价。

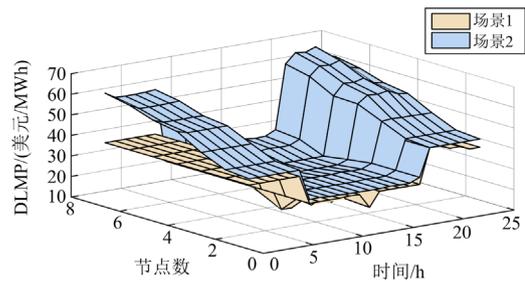


图 5 不同场景下 7 节点配电市场的 DLMPs

Fig. 5 DLMPs in the 7-node power distribution market in different scenarios

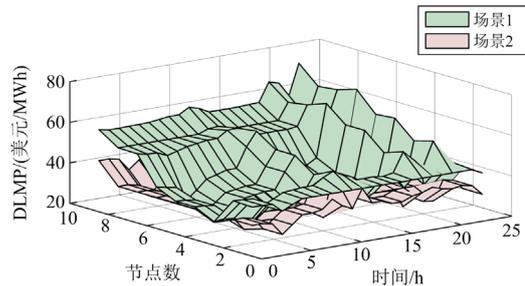


图 6 不同场景下 9 节点配电市场的 DLMPs

Fig. 6 DLMPs in the 9-node power distribution market in different scenarios

2) 不同场景下输电网络 LMPs 对比

为分析考虑输配协同后电力市场对输电市场出清价格的影响, 图 7 给出了 3 种场景下输电市场的

各节点边际电价的结果对比图。

由图 7 可知, 在考虑输配协同运行后, 场景 2 相较于场景 1 在 6~9 时段和 19~21 时段输电系统中 LMP 有所下降, 是由于该时段配电网中 DERs 出清量大量增加, 从而使得输电网络中的电能供应得到缓解, 进而降低输电市场出清后的 LMPs。

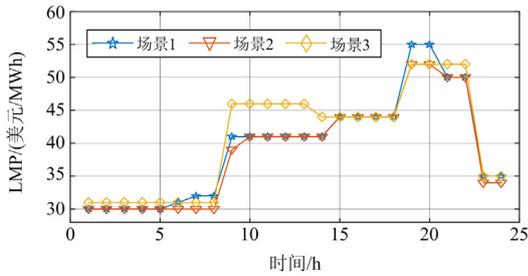


图 7 不同场景下输电市场各节点的 LMPs
Fig. 7 LMPs of each node in the transmission market in different scenarios

3) 不同场景下发电机组出力对比

本小节以发电商 2 和 9 节点配电网中燃气轮机 3 为例进行分析。场景 1 和场景 2 下输电网内发电商 2 和 9 节点配电网中燃气轮机 3 的有功出力情况分别如图 8 和图 9 所示。

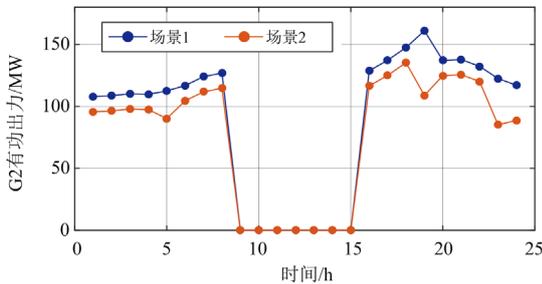


图 8 不同场景下发电商 2 出力对比图
Fig. 8 Comparison charts of power generator 2 output in different scenarios

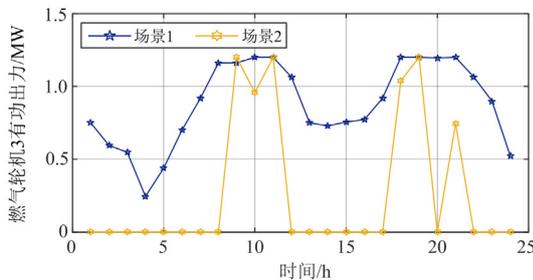


图 9 不同场景下 9 节点配电网内燃气轮机 3 出力对比图
Fig. 9 Comparison diagram of the output of gas unit 3 in the 9-node distribution network in different scenarios

由图 8 和图 9 可以看出, 考虑输电网络和配电网之间的相互协同作用后, 场景 2 中输电网络中的传统发电机组和配电系统中的燃气轮机的出力明显降低, 是因为协同运行后系统消纳了大量风电与光伏。由此可知, 考虑输电网协同优化调度可以提高清洁能源的消纳水平, 实现网络资源优化配置, 进而在保证满足全系统负荷需求的前提下, 提高能源利用效率, 促进新能源消纳。

3.2.2 碳-电市场耦合对市场交易效果的影响

1) 不同场景下系统出清价格的对比

由图 7 可以看出, 考虑到配电市场对输电市场的影响, 场景 2 的输电市场的节点边际电价相较于场景 1 也有所降低, 但场景 3 中考虑碳-电市场耦合下的电价比场景 2 下未引入碳市场的价格相对较高, 在 9~14 时段尤为明显。其原因在于, 燃煤机组属于碳排放量较高的机组, 在场景 3 中由于碳配额总量的约束导致成本较低的 G1、G2 中标量降低, 而燃气机组 G3 价格虽高, 但凭借其低碳属性, 出清交易量增加, 进而导致节点边际电价略有升高。同时碳-电市场耦合后, 各个发电机组进行竞价时会考虑到发电过程中的碳成本, 故电价也会有所增加。上述现象体现了因碳市场中碳配额总量限制导致电能紧缺进而使得电价升高, 反映了碳市场下电能的稀缺性。

2) 不同场景下发电商交易量的对比

图 10 给出了场景 2 和场景 3 下电力市场发电商的交易量结果对比图。

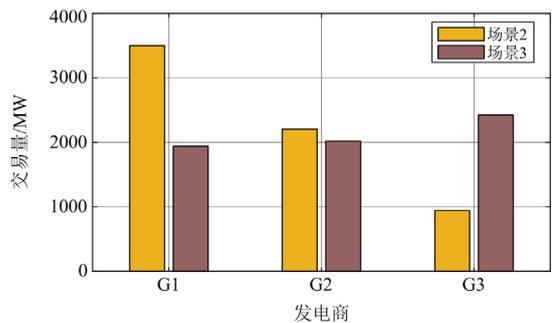


图 10 不同场景下的电力市场中发电商的交易量
Fig. 10 Clearing volume of power generators in the electricity market in different scenarios

由图 10 可以看出, 场景 3 考虑碳市场后燃煤机组 G1、G2 的出清量相对降低, 而燃气机组 G3 的出清量有所增加。这是由于在场景 2 中未考虑碳市场以及碳排放量限制的影响, 且燃煤机组的竞价价低于燃气机组, 故出清量相对较高。而在场景 3 中, 考虑了碳排放的影响, 故部分燃煤发电机组的发电

量由碳排放系数较低的燃气机组替代，整体碳排放量下降。以上结果证明碳市场的引入可以降低碳排放系数较高机组的发电空间，进而由碳排放系数较低的发电机组替代，对降低系统碳排放量，推动能源减碳有重要意义。

3) 不同场景下发电商利润情况对比

图 11 给出了 3 种场景下发电商的利润情况。针对发电商获得利润而言，场景 3 中考虑电力市场与碳市场耦合后，燃气发电商的利润得到明显增加，而燃煤发电商的利润相对降低，以上情况与图 10 中其发电功率的升降趋势是相同的。由此可知，燃气发电商凭借清洁优势，在碳-电耦合市场中其竞争力高于燃煤发电商。

3.2.3 各发电机组的竞标策略分析

表 4 为时段 9 下各发电机组的竞标策略结果。由表 4 可以看出，场景 2 下出清电价为 39 美元/MWh，而场景 3 下出清电价为 46 美元/MWh，场景 3 的发电机组的电价高于场景 2。原因在于考虑碳-电市场耦合后，发电机组在优化自身竞标策略时会考虑碳市场价格以及碳配额数量约束，从而导致节点边际电价升高。

表 4 时段 9 下多主体竞标策略结果

Table 4 Bidding strategy for each market participant in period 9

发电机组	场景 2		场景 3			
	出清电价/(美元/MWh)	电力竞标量/MW	出清电价/(美元/MWh)	电力竞标量/MW	碳配额价格/(美元/t)	碳配额竞标量/t
7 节点配电网	39	2.9	46	2.9	32	21.48
9 节点配电网	39	3.21	46	3.21	32	32.16
发电商 1	39	250	46	250	32	593.24
发电商 2	39	130	46	130	32	-436.24
发电商 3	39	115	46	115	32	-134.64

3.2.4 考虑输配协同的碳-电市场耦合对经济性的影响分析

为分析所提出考虑输配电网协同运行的碳-电市场耦合对系统运行经济性的影响，表 5 给出了在 3 种场景下的碳市场、电力市场交易结果。

由表 5 可以看出，相比于场景 1 和场景 2，场景 3 的碳排放量为 3959.6 t，较场景 1 减少了 74 t，较场景 2 减少了 1157 t，这是因为场景 3 考虑输配电网相互作用的同时还引入了碳市场，说明开展碳市场后碳排放量得到了有效管控。同时场景 3 的电力市场成本虽较场景 2 小幅增加，但其碳市场成本和总成本均最低，市场总成本为 24.23 万美元，较场景 1 降低 12.3%，较场景 2 降低 20.7%。由此可知，所提方法可以有效地降低整个市场的运行总成本和系统的碳排放总量，提升社会福利。

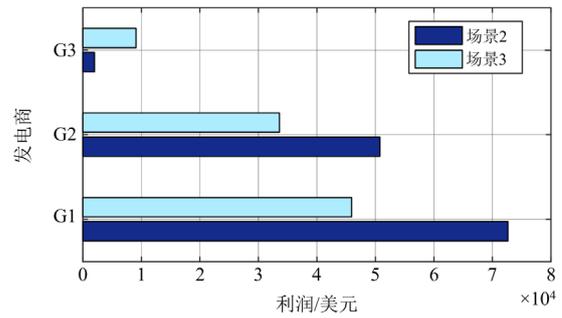


图 11 不同场景下的发电商利润

Fig. 11 Profit of power generators in different scenarios

引入碳市场后，当配额充足时，发电机组可通过向碳市场出售碳配额来降低自身的发电成本来达到在两市场中利润最大的目的；当配额短缺时，为使自身总成本尽可能最低，发电机组可以通过调整发电计划来减少自身碳排放量以在碳市场购买尽可能少的碳配额。由此可知，碳-电市场耦合可以使发电机组实现自身碳成本在电力市场的有效疏导，并通过调整自身在碳市场中的竞标策略从而使自身利益最大化。

3.2.5 考虑输配协同的碳-电市场耦合对经济性的影响分析(按年度组织交易)

本文中电力市场和碳市场均以时间尺度为例来说明模型的有效性。但一般对于某个企业来说，其最终能够交易的配额都是要执行完一个履约周期后再进行结算，故本节将算例时长扩大到一个履约周期(一年)计算各场景的交易结果，如表 6 所示。

由表 6 可以看出，按年度组织交易后，场景 3 在考虑输配协同运行的碳-电市场耦合后，其碳排放总量以及在碳-电耦合市场的总成本较场景 1 和场景 2 均有所降低，场景 3 下碳排放总量为 136.9 万 t，两市场总成本为 8640 万美元，相较于场景 1 减少了 13.2%，比场景 2 减少了 12.1%。由此可知，碳交易市场若以较长时间尺度组织交易，文中所提模型仍有较好的适用性。

表 5 各场景的交易结果

Table 5 Trading results of each scenario

场景	碳排量/t	电力市场生产 成本/美元	碳市场成本/ 美元	总成本/ 美元	所有发电机组在电力 市场中的利润/美元	所有发电机组在碳市场 中的利润/美元
场景 1	4033.7	155.5×10^3	121.0×10^3	276.5×10^3	78.7×10^3	—
场景 2	4709.7	153.4×10^3	141.3×10^3	294.7×10^3	104.2×10^3	—
场景 3	3959.6	123.5×10^3	118.8×10^3	242.3×10^3	109.1×10^3	29.6×10^3

表 6 各场景的交易结果(按年度组织交易)

Table 6 Trading results for each scenario (organize transactions on an annual basis)

场景	碳排量/t	电力市场生产 成本/美元	碳市场成本/ 美元	总成本/ 美元	所有发电机组在电力 市场中的利润/美元	所有发电机组在碳市场 中的利润/美元
场景 1	1452.1×10^3	56.0×10^6	43.6×10^3	99.6×10^6	28.3×10^6	—
场景 2	1751.0×10^3	51.6×10^6	46.7×10^3	98.3×10^6	37.6×10^6	—
场景 3	1369.7×10^3	47.5×10^6	38.9×10^3	86.4×10^6	35.3×10^6	10.7×10^6

3.3 T30D33 算例系统

为验证所提模型及方法对于更大规模系统的适用性, 本节采用 T30D33 系统^[43]进行算例分析。该系统由 3 个 33 节点配电网以及 1 个 30 节点输电网

组成, 本节中的发电机组分别为 3 个配电网和 6 个发电商, 3 个配电网连接在输电网的 18、24、30 节点, 系统结构图如图 12 所示。

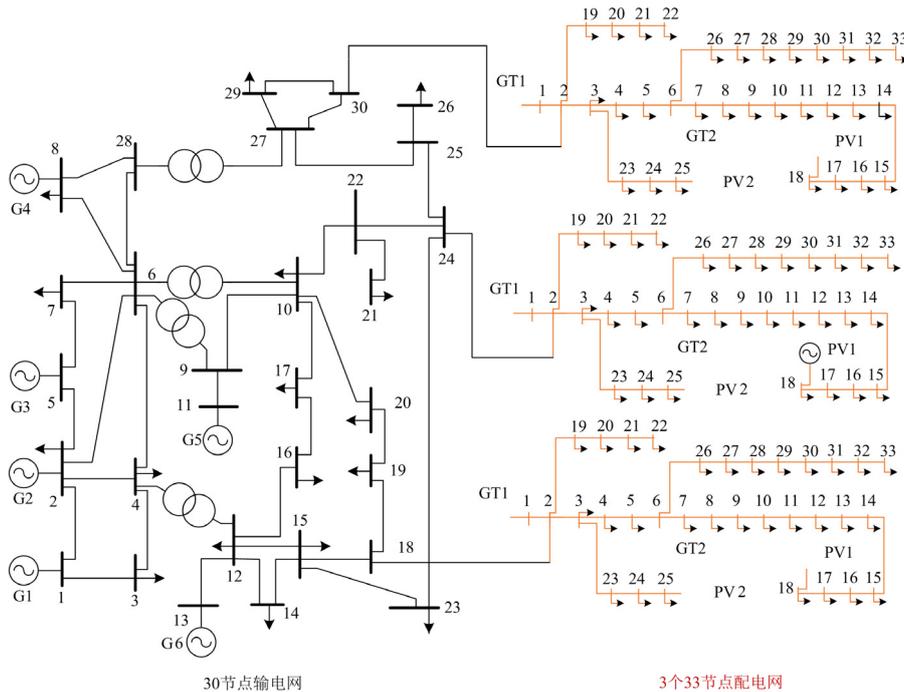


图 12 T30D33 系统结构图

Fig. 12 Structure diagram of T30D33 system

不同场景下两市场的交易结果如表 7 所示。由表 7 可以看出, 场景 1 中不考虑输配协同作用且不引入碳市场时, 碳排量为 7.03 万 t, 且两市场的运行总成本最高, 发电机组的利润也最低。场景 2 考虑了输配电网相互作用但未引入碳市场时碳排量最高为 7.98 万 t, 但市场运行成本降低, 发电机组的

利润也有所增加。相较于场景 1 和场景 2, 场景 3 考虑了输配协同运行的电力市场和碳市场的耦合后, 系统碳排量最低为 6.30 万 t, 场景 3 的市场总成本最低, 为 392.5 万美元, 且所有发电机组总利润相较于场景 1 增加了 46.9%。由此可知, 考虑输配电网协同运行的碳-电耦合市场在降低全系统碳

排总量的同时还可以降低系统运行总成本, 增加社会福利。此外, 该算例求解时间为 785.8 s, 上述计

算结果也表明了文中所提方法及模型对于较大规模的系统仍具有适用性。

表 7 各场景的交易结果

Table 7 Trading results of each scenario

场景	碳排量/t	电力市场生产成本/美元	碳市场成本/美元	总成本/美元	所有发电机组在电力市场中的利润/美元	所有发电机组在碳市场中的利润/美元
场景 1	70 317	3234.8×10^3	2109.5×10^3	5344.3×10^3	1030.8×10^3	—
场景 2	79 785	1549.7×10^3	2393.6×10^3	3943.3×10^3	1931.3×10^3	—
场景 3	63 024	2034.4×10^3	1890.7×10^3	3925.1×10^3	1514.9×10^3	1233.9×10^3

4 结论

碳市场作为一种市场减排手段, 将为电力市场交易带来显著影响。为了深入研究碳市场对考虑输电网协同运行的电力市场交易的影响, 本文构建了考虑碳市场出清过程的多交易主体的双层交易模型。其中, 上层模型为各个交易主体的碳-电协同最优决策模型, 下层模型为电力市场和碳市场的出清模型, 并将所提出的双层模型利用 KKT 条件、Big-M 法以及对角化算法进行转化和有效求解。相关结论如下:

1) 与传统的考虑输电市场仅由发电商进行供电、DSO 不参与输电市场出清相比, 所构建的考虑输电网协同运行的电力市场优化模型可有效降低输电网的节点边际电价, 实现网络资源优化配置, 降低市场总成本, 提高清洁能源消纳水平。

2) 相较于未开展碳市场, 考虑碳-电市场耦合可以降低碳排量较高的发电机组的发电功率, 降低系统的碳排放总量, 且碳-电耦合市场可以提高清洁能源竞争力, 缓解碳市场的减排压力。

3) 本文所提出的考虑输配协同多主体参与的碳-电市场双层交易方法可促进电力市场在碳排放量和市场成本间取得均衡, 并同时兼顾系统运行的低碳性和经济性, 促进碳-电市场的有效协同。

参考文献

- [1] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. [2020-09-22]. <http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content5546168.htm>.
- [2] 吴琪, 赵宣茗, 张佳诚, 等. 促进新能源消纳的电-碳市场耦合激励型出清机制[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 14-27. WU Qi, ZHAO Xuanming, ZHANG Jiacheng, et al. Electricity-carbon market coupling incentive clearing mechanism to promote consumption of new energy[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 14-27.
- [3] 吉斌, 昌力, 陈振寰, 等. 基于区块链技术的电力碳排放权交易市场机制设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 1-10.

- JI Bin, CHANG Li, CHEN Zhenhuan, et al. Blockchain technology based design and application of market mechanism for power carbon emission allowance trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 1-10.
- [4] 秦博宇, 周星月, 丁涛, 等. 全球碳市场发展现状综述及中国碳市场建设展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 186-199. QIN Boyu, ZHOU Xingyue, DING Tao, et al. Review on development of global carbon market and prospect of China's carbon market construction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 186-199.
- [5] 李贵君, 赵兴勇, 刘昊炆, 等. 考虑梯级碳交易机制和电转气两阶段运行的综合能源系统优化[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(3): 331-340. LI Guijun, ZHAO Xingyong, LIU Haoyang, et al. Integrated energy system optimization considering cascading carbon trading mechanism and two-stage operation of power-to-gas[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(3): 331-340.
- [6] CHEN Sheng, CONEJO A J, WEI Zhinong. Conjectural-variations equilibria in electricity, natural-gas, and carbon-emission markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4161-4171.
- [7] 冯天天. 绿证交易及碳交易对电力市场的耦合效应分析模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016. FENG Tiantian. Coupling induction analysis model of tradable green certificates and carbon emission trading acting on electricity market in China[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [8] 马云聪, 武传涛, 林湘宁, 等. 计及碳排放权交易的光热电站市场竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 82-92. MA Yuncong, WU Chuantao, LIN Xiangning, et al. Bidding strategy for a concentrated solar power plant participating in the electricity market with the background of carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 82-92.
- [9] 贺文, 陈珍萍, 胡伏原, 等. 基于一致性的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023,

- 51(19): 42-53.
- HE Wen, CHEN Zhenping, HU Fuyuan, et al. Consensus-based low-carbon economic dispatching of integrated energy systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(19): 42-53.
- [10] LIU Y X, ZHANG N, KANG C, et al. Impact of carbon market on China's electricity market: an equilibrium analysis[C]// *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, July 16-20, 2017, Chicago, USA: 1-5.
- [11] 邓盛盛, 陈皓勇, 肖东亮, 等. 发电商参与碳市场与电力中长期市场联合决策模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(22): 1-10.
- DENG Shengsheng, CHEN Haoyong, XIAO Dongliang, et al. A joint decision making model for power generators to participate in the carbon market and the medium-and long-term power markets[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(22): 1-10.
- [12] CHEN Q, KANG C, XIA Q, et al. Optimal flexible operation of a CO₂ capture power plant in a combined energy and carbon emission market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(3): 1602-1609.
- [13] XENOPHO A K, HILL D J. Emissions reduction and wholesale electricity price targeting using an output-based mechanism[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 1050-1063.
- [14] YANG Dechang, HE Shaowen, CHEN Qiuyue, et al. Bidding strategy of virtual power plant considering carbon-electricity trading[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019, 5(3): 306-314.
- [15] 黑田健, 马郡英树, 横山隆一, 等. 考虑电力系统低碳效益的配电网分布式发电系统最优配置方法[J]. *电网技术*, 2012, 36(12): 22-34.
- KEN K, HIDEKI M, RYUICHI Y, et al. Optimal allocation of dispersed generations in distribution networks to realize low-carbon power system[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(12): 22-34.
- [16] 王冲, 葛玉林, 鞠平, 等. 基于碳排放动态分配调度优先级的配电系统低碳经济运行[J]. *电网技术*, 2023, 47(11): 4467-4481.
- WANG Chong, GE Yulin, JU Ping, et al. Low-carbon economic operation of distribution system based on carbon emission dynamic allocation dispatch priority[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(11): 4467-4481.
- [17] 周天睿, 康重庆. 基于碳排放流的配电系统低碳优化运行方法研究[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(3): 241-247.
- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing. Research on low-carbon oriented optimal operation of distribution networks based on carbon emission flow theory[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(3): 241-247.
- [18] KOUTSOUKIS N C, SIAGKAS D O, GEORGILAKIS P S, et al. Online reconfiguration of active distribution networks for maximum integration of distributed generation[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 14(2): 437-448.
- [19] 丰颖, 俞志皓, 孙景文, 等. 输配协同的配电网态势快速感知方法[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(12): 37-44.
- FENG Ying, YUN Zhihao, SUN Jingwen, et al. Fast situation awareness method for distribution network coordinated with transmission grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(12): 37-44.
- [20] 张旭, 王洪涛. 高比例可再生能源电力系统的输配协同优化调度方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(3): 67-75.
- ZHANG Xu, WANG Hongtao. Optimal dispatch method of transmission and distribution coordination for power systems with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(3): 67-75.
- [21] KARGARIAN A, FU Y. System of systems based security-constrained unit commitment incorporating active distribution grids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(5): 2489-2498.
- [22] NEJAD R R, SUN W, GOLSHANI A. Distributed restoration for integrated transmission and distribution systems with DERs[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6): 4964-4973.
- [23] 兰鹏, 沈晓东, 吴刚, 等. 基于交替方向乘子法的输配-天然气系统分布式优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(23): 21-30.
- LAN Peng, SHEN Xiaodong, WU Gang, et al. Distributed optimal scheduling for transmission- distribution-natural-gas system based on alternating direction method of multipliers[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(23): 21-30.
- [24] 张强, 赵晋泉, 戴则梅, 等. 基于目标级联分析的输配电网黑启动分布式协同优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(3): 111-120.
- ZHANG Qiang, ZHAO Jinquan, DAI Zemei, et al. Distributed coordinated optimization method for black-start of transmission and distribution networks based on analytical target cascading[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(3): 111-120.
- [25] YUAN Z, HESAMZADEH M R. Hierarchical coordination of TSO-DSO economic dispatch considering large-scale integration of distributed energy resources[J]. *Applied Energy*, 2017, 195(2): 600-615.
- [26] LIN C, WU W, ZHANG B, et al. Decentralized reactive power optimization method for transmission and distribution networks accommodating large-scale DG integration[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(1):

- 363-373.
- [27] LI Zhengshuo, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Coordinated transmission and distribution AC optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1228-1240.
- [28] RENANI Y K, EHSAN M, SHAHIDEHPOUR M. Optimal transactive market operations with distribution system operators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6692-6701.
- [29] 刘盾盾, 柳璐, 程浩忠, 等. 基于广义主从分裂理论与配电网相协同的输电网规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5856-5866.
- LIU Dundun, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Transmission expansion planning coordinated with distribution networks based on generalized master-slave splitting theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5856-5866.
- [30] SHEIKHAHMADIA P, BAHRAMARAB S, MAZZAC A, et al. Bi-level optimization model for the coordination between transmission and distribution systems interacting with local energy markets[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2021, 124.
- [31] 碳排放权交易管理办法(试行)[EB/OL]. [2020-12-31]. https://www.mee.gov.cn/gzk/gz/202112/t20211213_963865.shtml.
- [32] 叶晨, 牟玉亭, 王蓓蓓, 等. 考虑动态碳交易曲线的电-碳市场出清模型及节点边际电价构成机理分析[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 613-624.
- YE Chen, MOU Yuting, WANG Beibei, et al. Mechanism of locational marginal prices and clearing model of electricity and carbon market considering dynamic carbon trading curve[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 613-624.
- [33] 檀勤良, 丁毅宏, 魏咏梅, 等. 碳交易及模糊预算下火电企业碳减排最优策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3707-3715.
- TAN Qinliang, DING Yihong, WEI Yongmei, et al. Research on optimal strategy of carbon emission reduction for thermal power enterprises under carbon trading and fuzzy budget[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3707-3715.
- [34] 江岳文, 陈巍. 电-碳-配额制耦合交易综述与展望[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 1-13.
- JIANG Yuewen, CHEN Wei. Review and prospect of coupled electricity-carbon-renewable portfolios trading[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 1-13.
- [35] 孙晓聪, 丁一, 包铭磊, 等. 考虑发电商多时间耦合决策的碳-电市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 1-11.
- SUN Xiaocong, DING Yi, BAO Minglei, et al. Carbon-electricity market equilibrium analysis considering multi-time coupling decision of power producers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 1-11.
- [36] 中华人民共和国生态环境部. 2019—2020 年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(发电行业)[EB/OL].(2020-12-30)[2022-12-30].<https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202012/W020201230736907121045.pdf>
- [37] LIU Yikui, LI Jie, WU Lei. Distribution system restructuring: distribution LMP via unbalanced ACOPF[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4038-4048.
- [38] JIANG Kai, LIU Nian, YAN Xiaohe, et al. Modeling strategic behaviors for GENCO with joint consideration on electricity and carbon markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(5): 4724-4738.
- [39] FORTUNY-AMAT J, MCCARL B. A representation and economic interpretation of a two-level programming problem[J]. Journal of the Operational Research Society, 1981, 32(9): 783-792.
- [40] FANG Xin, HU Qinran, LI Fangxing, et al. Coupon-based demand response considering wind power uncertainty: a strategic bidding model for load serving entities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1025-1037.
- [41] DAI Ting, QIAO Wei. Finding equilibria in the pool-based electricity market with strategic wind power producers and network constraints[J]. IEEE Transactions on power systems, 2017, 32(1): 389-400.
- [42] KARGARIAN A, FU Y. System of systems based security constrained unit commitment incorporating active distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2489-2498.
- [43] CHEN Zhe, LI Zhengshuo, GUO Chuangxin, et al. Fully distributed robust reserve scheduling for coupled transmission and distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 169-182.

收稿日期: 2023-12-25; 修回日期: 2024-02-17

作者简介:

马佳彤(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为碳市场、电力市场; E-mail: majiatong111@aliyun.com

张儒峰(1990—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为综合能源建模、分析与优化运行; E-mail: zhangrufeng@ncepu.edu.cn

付麟博(1995—), 女, 博士, 主要研究方向为综合能源系统优化运行、电力市场. E-mail: fulinbo123@aliyun.com

(编辑 魏小丽)