

考虑碳排放的新能源电网电力交易动态定价方法

关艳¹, 高曦莹¹, 陆心怡¹, 蔡亦浓¹, 韩昕檀¹, 宋轩宇¹, 滕云²

(1.国网辽宁省电力有限公司营销服务中心, 辽宁 沈阳 110170; 2.沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 随着“双碳”目标的持续推进,传统的电力交易体系面临新的挑战。为促进实现碳交易与电力交易市场的衔接,文章在考虑区域碳排放的基础上提出了一种基于电网需求侧响应的电能定价方法。首先,考虑碳排放激励及可控负荷参与调峰响应的经济补偿,建立考虑碳排放及调峰成本的负荷调动成本模型;然后,基于博弈思想,将需求侧储能装置及可控负荷作为灵活性资源,制定了需求侧参与的电能定价体系,并构建了1-K型Stackelberg主从博弈决策模型;最后,针对定价问题的非线性特点,采用遗传算法的逆向归纳法对模型进行求解,并进行了实例验证。仿真结果表明,文章提出的考虑区域碳排放的新能源电网电能定价方法能够促进电力系统的最优运营,可实现新型配电网效率、效益双提升。

关键词: 电能定价方法; 碳价需求侧响应; 主从博弈模型; 综合能源服务商

中图分类号: TK51; TK81; TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)01-0112-07

0 引言

目前,电力行业的碳排放已经接近全国碳排放的一半,碳排放交易也已经率先覆盖到了电力市场,在实现“双碳”目标的前提下,发展计及碳交易的成熟电力市场是电力行业完成绿色转型的必经之路^[1]。但在电力市场中,碳排放成本究竟由哪一方来承担也一直是一个存在争议的问题,碳排放的主要来源在发电侧,但缺少需求侧的配合,电力市场中的碳交易推进也存在一定困难。因此,如何将碳交易引入现有的电力市场,完成二者之间的衔接,对于目前的电力行业碳减排来说具有重要意义。

研究人员基于需求侧资源管理对电力市场进行了大量研究,但整体来讲,还未能充分发挥需求侧的碳减排潜力。文献[2]提出了基于改进引力搜索算法的电力市场环境下可再生能源竞标消纳优化模型,并针对交易过程中的不确定概率进行了分析。文献[3]研究能源市场和电力市场的耦合关系,并针对含有可响应分布式电源的配网多目标优化调度进行研究。文献[4]分析了可再生能源接入配网对节点边际的影响,并在此基础上提出了一种考虑需求响应和有功损耗的节点边际电价模型。文献[5]对园区多能源系统进行了研究,并以系统运行成本最小化为目标,设计了电力市场和碳交易市场价格传导机制及园区多能

源系统综合需求侧响应策略。文献[6]对电动汽车用户出行规律进行分析,并在此基础上提出了一种计及电动汽车用户满意度的动态分时充电电价制定策略。

与此同时,许多研究注重源-荷侧共同参与,提出了一系列促进碳市场与电力市场衔接的定价策略。文献[7]为解决现有用户侧营销决策支持模型受到营销策略单一性的影响,收益率较低,经济可行性较差的问题,提出一种计及综合能源服务模式的用户侧营销决策的能源定价机制。文献[8]为促进新能源消纳,提出了基于改进引力搜索算法的电力市场环境下可再生能源竞标消纳优化模型。文献[9]为合理分配电力市场中各主体的利益,提出基于主从博弈的氢储能和碳捕集协同优化的定价策略。

综上所述,针对电网需求侧参与电价制定的研究已有一定积累,但对于需求侧如何参与到碳-电市场的衔接环节中的研究还有待开展。现有的电能定价机制不能完全适用于未来电力交易市场的发展方向,因此,在考虑区域碳排放的基础上,研究一种基于电网需求侧响应的电能定价方法具有重要的现实意义。

1 考虑碳减排的负荷调动成本模型

1.1 负荷侧减碳激励计算模型

为促进需求侧可控负荷对于碳减排的响应,

收稿日期: 2023-09-08。

基金项目: 国网辽宁省电力有限公司科技项目(2022YF-93)。

作者简介: 关艳(1974-),女,高级工程师,研究方向为电力营销。E-mail: wqw199305@163.com

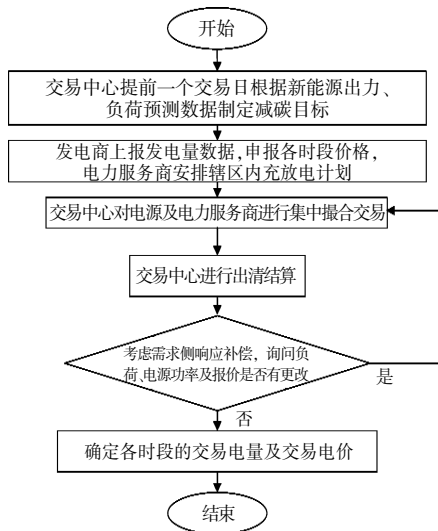


图2 电力服务商参与的市场交易定价流程
Fig.2 Electricity transaction pricing process

依照电网各时段需求对各发电商与电力服务商进行集中撮合交易, 并统一确定各交易时段从各电站购买的电量, 进行出清结算, 电价的结算在每个时段采用统一出清电价。

④考虑需求侧应对各参与者所产生的收益影响, 根据出清结果, 交易中心询问是否有发电商须要更改报价及电量信息, 电力服务商确认储能及可控负荷是否更改供用电时间, 若有则返回步骤③, 直至参与交易的各方均不再改变申报信息, 该交易日的现货交易完成。

3 基于主从博弈决策的电价优化模型

在本文建立的电力交易机制中, 各发电商及电力服务商将报价信息申报至电力交易中心, 最终的出清电价与购电量由电力交易中心确定。在电力服务商的报价过程中, 服务商的利润受可控负荷用户及储能装置功率调整的影响。用户及储能装置改变供用电行为, 须根据服务商的要求, 做出响应决策。因此, 本文建立1个电力服务商与k个可控负荷用户及储能装置的博弈模型, 构建一个1-K型Stackelberg主从博弈模型^[13-15]。

3.1 电力服务商的定价主导博弈模型

电力服务商在制定申报电价的过程中主要考虑两个决策变量, 即储能充放电决策与可控负荷增减功率补偿, 因此本文将储能充放电调用成本合并并在可控负荷调用成本中, 以电力服务商经济收益最大为目标函数, 建立电力服务商在主从博弈中的定价模型。

①电力服务商电价优化目标函数

在建立优化目标函数之前, 首先引入电力服务商交易日实际偏差电量的概念:

$$\Delta Q_r = \eta_\omega Q_b \quad (5)$$

式中: ΔQ_r 为交易日的实际偏差电量; η_ω 为电量偏差系数; Q_b 为日前竞标电量。

电力服务商经济收益由3部分组成: 购电成本 Π_1 , 由电力服务商供电量和市场出清电价决定; 调用可控负荷响应成本 Π_2 , 由负荷减碳激励与经济补偿决定; 售电收益 Π_3 , 由售电量及终端售电价格决定, 本文采用蒙特卡罗抽样生成场景, 目标函数为所有场景下的电力服务商经济收益最大。

$$\max E_{ES} = \Pi_3 - \Pi_1 - \Pi_2 \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Pi_1 = \sum p_\omega \sum_{t=1}^T (Q_b \pm \Delta Q_{r,\omega}^\pm) p_{t,s} \Delta t \\ \Pi_2 = \sum_{t=1}^T (U_{cl,t}^\pm + U_c) \Delta t \\ \Pi_3 = \sum p_\omega \sum_{t=1}^T (Q_b \pm \Delta Q_{r,\omega}^\pm) p_{t,l} \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

式中: p_ω 为场景 ω 发生的概率; $\Delta Q_{r,\omega}^\pm$ 为场景 ω 下的交易日实际偏差电量; Δt 为电力服务商调度时间间隔; $p_{t,s}$ 为调度时段内的电力市场出清电价; $p_{t,l}$ 为面向终端用户的售电价。

②电力服务商电价优化约束条件

$$\begin{cases} Q_{\omega,t}^- = \sum (\Delta P_{cl}^+ - \Delta P_{cl}^-) + Q_b \eta_\omega \\ Q_{\omega,t}^+ = \sum (\Delta P_{cl}^- - \Delta P_{cl}^+) - Q_b \eta_\omega \end{cases} \quad (8)$$

式中: $Q_{\omega,t}^+$, $Q_{\omega,t}^-$ 分别为电力服务商在场景 ω 下 t 时段的正、负偏差电量。

3.2 基于可控负荷与储能响应的从属博弈模型

3.2.1 可控负荷响应优化目标函数

制定可控负荷优化目标时, 本文主要考虑使可控负荷通过配合电网进行功率增减来获得更多的收益, 因此, 将可控负荷响应效益最大作为目标函数:

$$\begin{cases} \max E_{cl} = \{U_{cl}^\pm - C_{cl}^\pm\} \\ C_{cl}^\pm = \Delta P_{cl}^\pm (p_{t,l}^s - p_{t,l}^e) \end{cases} \quad (9)$$

式中: C_{cl}^{\pm} 为可控负荷增减功率成本,具体表示为可控负荷响应的功率转移前后价格差,若 C_{cl}^{\pm} 为正,则表示可控负荷响应带来收益,反之带来损失; $p_{t,l}^s, p_{t,l}^e$ 分别为功率转移前及转移后的终端电价。

3.2.2 可控负荷响应约束条件

① 负荷是否参与响应约束

在可控负荷中,负荷增减功率的成本存在变化,若负荷的增减功率成本大于参与响应获得的经济补偿,此时,负荷不会选择参与需求侧响应,约束条件可表示为

$$U_{cl}^{\pm} - C_{cl}^{\pm} > 0 \quad (10)$$

② 可控负荷功率调整范围约束

$$0 \leq |\Delta P_{cl}^{\pm}| \leq |\Delta P_{cl,max}^{\pm}| \quad (11)$$

式中: $|\Delta P_{cl,max}^{\pm}|$ 为可控负荷功率增减量的最大允许值。

③ 可控负荷功率增减状态约束

$$v_{cl}^+ + v_{cl}^- \leq 1 \quad (12)$$

式中: v_{cl}^+, v_{cl}^- 分别为可控负荷的功率增加状态和减少状态,上式表示可控负荷只能处在增减状态中的一种状态下。

④ 可控负荷功率调整频次约束

$$\sum_{t=1}^{T-1} (v_{cl,t+1}^{\pm} - v_{cl,t}^{\pm}) \leq T_{max}^{\pm} \quad (13)$$

式中: T_{max}^{\pm} 为可控负荷的功率增减状态的最大改变频次。

3.2.3 储能系统响应目标函数

储能电站在参与响应的过程中,根据电力服务商给出的充放电计划,制定自身的分时电价,使其自身收益达到最大化,目标函数可表示为

$$\max E_s = p_{t,l} P_{s,out} - p_{t,l} P_{s,in} - E_{in} - E_{op} \quad (14)$$

式中: $p_{t,l}$ 为面向终端用户的售电价; $P_{s,in}$ 为储能装置充电功率; $P_{s,out}$ 为储能装置放电功率; E_{op} 为储能装置的运维成本; E_{in} 为储能的投资成本。

3.2.4 储能系统约束条件

① 储能设备充放电功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{s,out} \leq u P_{s,out,max} \\ 0 \leq P_{s,in} \leq (1-u) P_{s,in,max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: u 为布尔电量,表示储能装置状态,本文利用布尔电量对储能装置充放电状态进行了限制,使储能不能同时处在充电状态和放电状态。

② 储能设备荷电状态约束

$$0 \leq S_t \leq 1 \quad (16)$$

式中: S_t 为储能设备的荷电量。

4 求解流程

在本文建立的主从博弈模型中,主导者与跟随者优化问题均为非线性问题,因此选择适用于非线性问题迭代求解的遗传算法逆向归纳方法进行求解。如图3所示,模型的求解算法主要通过对主导者及跟随者的目标函数进行循环迭代,最终达到主导者与跟随者之间的均衡状态,并输出最终的博弈结果,即前文提到的电力服务商全天分时报价。

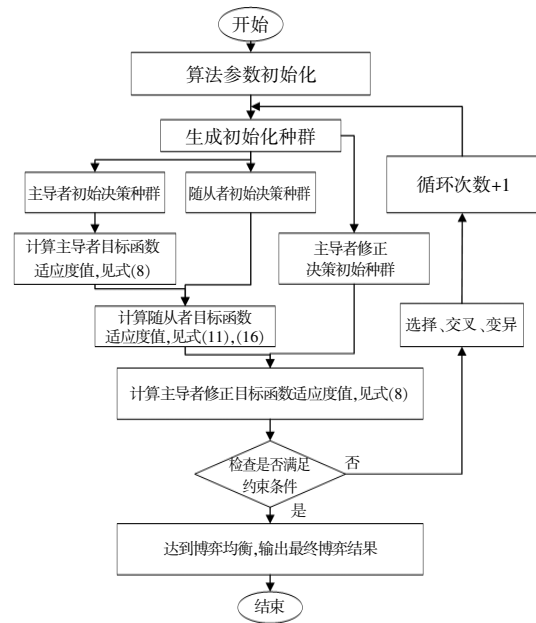


图3 求解算法流程
Fig.3 Solving algorithm

5 算例仿真

5.1 仿真系统设置

为验证本文提出的电力服务商参与的新能源电网电价制定方法的有效性及其优越性,本文建立电力服务商运营仿真系统,对提出的电能定价方法进行仿真验证。电网的原始交易电价及峰、平、谷时段的电价如图4所示,电网中的风电、光伏出力及负荷需求功率日前预测值如图5所示,系统中接入的储能设备参数见表1。

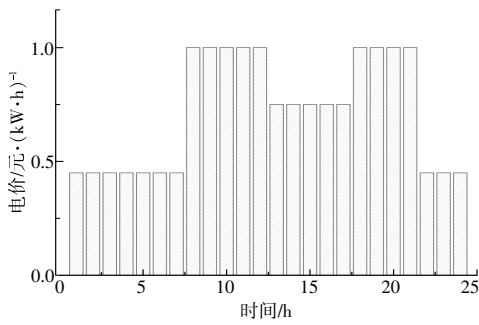


图4 原始交易电价
Fig.4 Original transaction price

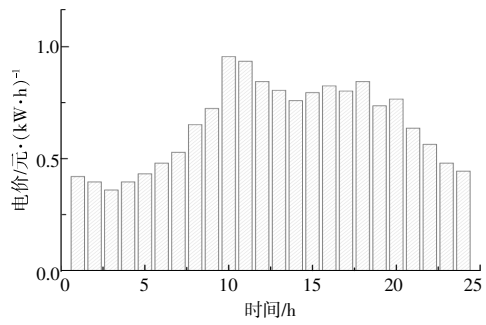


图6 S1场景下优化后的新能源电网分时电价
Fig.6 Electricity price under S1

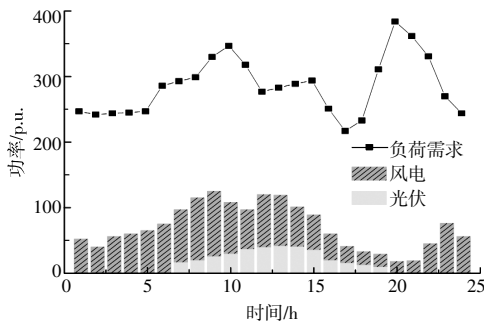


图5 风光负荷预测数据

Fig.5 Load demand and new energy power forecasting data

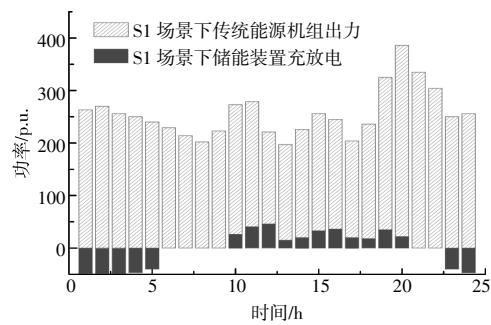


图7 S1场景下各电源出力

Fig.7 Output power of traditional power unit and energy storage under S1

表1 储能设备参数

Table 1 Basic parameters of energy storage

最大充放电功率/kW	充放电效率	运行维护成本/元·(kW·h) ⁻¹
50	0.9	30

为验证本文提出的电能定价方法的优越性,设置2个仿真场景S1,S2进行对比分析,在S1场景中采用本文提出的方法对电能进行定价,在S2场景中采用图4中的原始分时电价进行仿真。

5.2 本文提出方法的可行性分析

在S1场景下,在仿真系统中配置容量为20 kW·h的储能设备,并采用本文提出的新能源电网电能定价方法与求解算法对电价进行求解,得到优化后的分时电价如图6所示。在此电价下的系统各类电源出力预测曲线如图7所示。

由图6,7可以看出,采用本文提出的电能定价方法求解后,新电价能够使电网通过电价引导各电源及负荷有序充放电,进而起到削峰填谷的作用。在夜间电价较低时段,即23:00-24:00和0:00-5:00,储能设备处于充电状态,能够吸收一部分风电出力,减少弃风;在白天电价较高时段,即11:00-20:00,储能装置处于放电状态,在保证储能自身经济收益的同时,一定程度上减轻电网的调峰压力。

在图6所示的分时电价下,全天各时段储能装置的荷电状态如图8所示。由图8可以看出,储能装置在夜间电价较低时段,即23:00-05:00进行充电,并且充电时一直维持较大功率,直至荷电量达到较高的状态。在白天电价较高时段,即11:00-20:00,储能装置由电力服务商安排放电时间,配合电网需求进行放电,与图7中给出的储能充放电时段相一致。

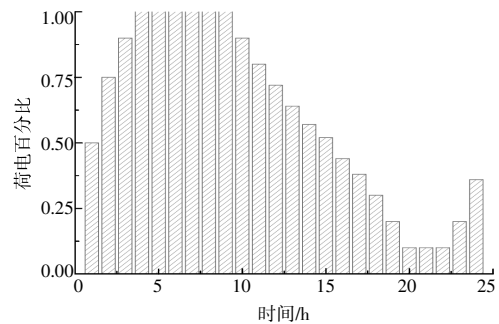


图8 S1场景下储能装置荷电状态

Fig.8 SOC of energy storage under S1

5.3 储能装置容量对电价的影响分析

为了分析储能装置的容量配置对电价产生的影响,在S1场景下的仿真系统中配置容量为40 kW·h的储能设备,同样采用本文提出的新能源

电网电价求解方法进行求解,得到的分时电价如图 9 所示。

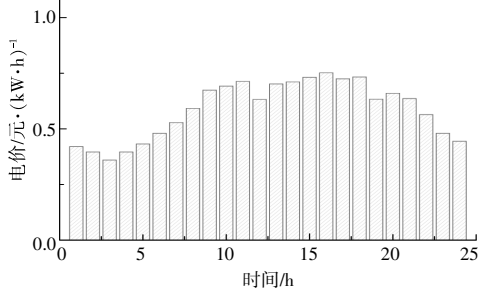


图 9 增大储能装置容量后的分时电价
Fig.9 Electricity price under larger capacity of energy storage

由图 9 可以看出,储能容量增大后,电网的电价求解结果相对于图 6 产生了一些变化。在白天用电高峰时段,即 11:00-20:00,电价先降低,而后保持不变。这是由于在用电高峰时段初期,大容量储能装置能够分担更多的供电压力,此时电价会出现一定幅度的降低。但随着储能装置荷电量的降低,其供电能力随之降低,对电网的调峰压力的分担能力也随之降低,此时电价逐渐恢复原有水平。

5.4 本文提出方法对碳减排的影响分析

为验证本文提出的电能定价方法对于电网碳减排的促进效果,设置场景 S2 与场景 S1 进行对比。在 S2 场景下采用图 4 所示的原始电价对系统中的多种类电源出力进行预测,所得结果如图 10 所示。S1 与 S2 场景下电源出力产生的碳排放结果如图 11 所示。

由图 10 与图 7 对比可知,S2 场景下的储能装置的充放电功率均小于 S1 场景,说明与原始电价相比,本文提出的新能源电网电价求解方法更能够调动储能装置的充放电潜力。在夜间用电低

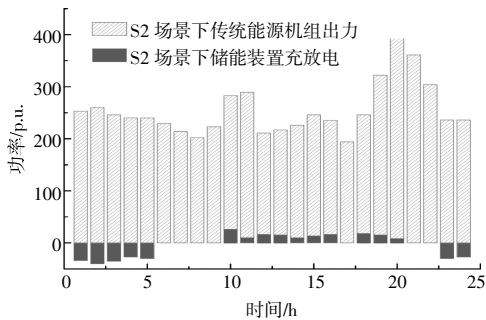


图 10 S2 场景下的电源出力
Fig.10 Output of traditional power unit and energy storage under S2

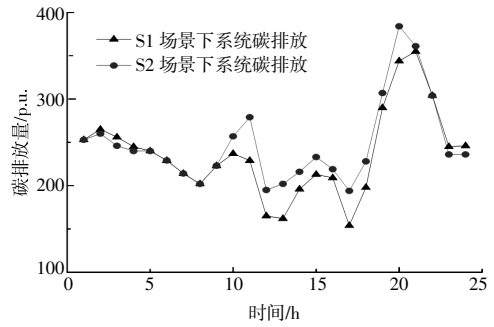


图 11 S1 与 S2 场景下系统碳排放对比
Fig.11 Carbon emissions comparison between S1 and S2

谷时期,S1 场景下的储能装置的充电积极性较高,充电功率更大,在白天用电高峰时期,S1 场景下储能装置的放电量更大,对于供电的支撑效果更加明显。由图 11 可以看出,在采用本文提出的电能定价方法的 S1 场景下,系统的整体碳排放量更小,尤其是在白天的用电高峰时段,即 11:00-20:00,S1 场景下的储能装置能够替代更多的传统机组出力,进而实现系统的碳减排。

6 结论

本文基于博弈理论思想,建立了需求侧参与的电能定价体系,将可控负荷及储能系统作为灵活性资源,在考虑区域碳排放的基础上提出了一种基于电网需求侧响应的电能定价方法。将碳排放作为负荷碳减排激励成本,建立了考虑碳减排的负荷调动成本模型。在构建的需求侧参与电能定价体系基础上,设计了 1-K 型 Stackelberg 主从博弈决策模型,由电力服务商及灵活性资源参与博弈定价,并进行了仿真验证。仿真结果表明,基于主从博弈决策的新能源电网电能定价方法,考虑了电力服务商和可控负荷自身的经济效益,能够根据电网各时段的不同用电需求制定分时电价,进而充分发挥储能系统的充放电潜力,减轻传统调峰机组的调峰压力,促进新能源电网中的新能源消纳,实现碳减排的目标。

参考文献:

- [1] 金红洋,申永山,滕云,等.考虑碳减排的多能源系统网格化优化调度方法 [J]. 可再生能源,2023,41(2): 261-267.
- [2] 薛斌,张小东,任景,等.基于改进引力搜索算法的电力市场环境可再生能源竞标消纳优化[J].可再生能源,2023,41(6):845-852.
- [3] 付岚,单智习,牟光臣.含可响应资源的综合能源多目

- 标低碳优化调度[J].可再生能源, 2022, 40(7): 972-979.
- [4] 李嫚, 李先锋, 边俐争, 等. 考虑需求响应和有功损耗的含可再生能源配网节点边际电价[J]. 可再生能源, 2022, 40(1): 128-135.
- [5] 陈锦涛, 杨苹, 陈滢, 等. 基于综合需求侧响应策略的园区多能源系统优化运行 [J]. 可再生能源, 2021, 39(2): 222-228.
- [6] 谭维玉, 雷雨, 李军, 等. 计及动态分时电价的电动汽车参与电网调度研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(11): 1515-1522.
- [7] 孔赞, 陈猛, 曹凯, 等. 计及综合能源服务模式的用户侧营销决策支持模型[J]. 微型电脑应用, 2023, 39(6): 34-37, 45.
- [8] 薛斌, 张小东, 任景, 等. 基于改进引力搜索算法的电力市场环境下可再生能源竞标消纳优化[J]. 可再生能源, 2023, 41(6): 845-852.
- [9] 陈晚晴, 项康利, 林晓凡, 等. 基于主从博弈的综合能源系统电氢碳运行优化 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 10(2): 1-8.
- [10] 叶宇静, 邢海军, 米阳, 等. 考虑低碳需求响应及主从博弈的综合能源系统低碳优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 10(2): 1-17.
- [11] A Y Saber, G K Venayagamoorthy. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [12] 杨洪朝, 牛犇, 孟科, 等. 考虑可控负荷功率调整的电力服务商分段式补偿定价决策[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 100-108.
- [13] 凌静. 含可再生能源的跨区电力交易机制与风险评估研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [14] 张青苗, 陈来军, 马恒瑞, 等. 基于主从博弈的共享储能分时电价策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 82-88.
- [15] 杨威, 龚学良, 曾智健, 等. 碳排放交易市场机制对电力市场的影响: 基于碳价需求响应的电力市场用户行为分析[J]. 南方电网技术, 2022, 16(8): 59-67.

A dynamic pricing method for power trading of new energy power grid considering carbon emission reduction

Guan Yan¹, Gao Xiying¹, Lu Xinyi¹, Cai Yinong¹, Han Xintan¹, Song Xuanyu¹, Teng Yun²
(1.State Grid Liaoning Electric Power Supply Co.,Ltd. Marketing Service Center, Shenyang 110170, China;
2.Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: With the construction and promotion of greener grid, the old electricity marketing process is facing new challenges. Therefore, in order to suit the new requirements of electricity marketing, this paper proposes an electricity pricing method based on the careful consideration of regional carbon emissions. Firstly, consider the economic compensation of carbon emission reduction incentive and controllable load participating in peak regulation response, a load mobilization cost model considering carbon emission and peak regulation cost is established. Then, based on the idea of game theory, the demand-side controllable load and energy storage device are used as schedulable resources to construct a 1-K Stackelberg master-slave game decision model. Finally, the inverse induction method is attached to solve the model. We can see from the results that the proposed electricity pricing method of new energy power grid considering regional carbon emissions can promote the optimal operation of power system and realize the double improvement of efficiency and benefit of new distribution network.

Keywords: electricity pricing method; carbon-oriented demand response; master-slave game decision-making model; comprehensive energy service providers