

绿证-碳交易交互机制下的虚拟电厂优化调度

陈文颖^{1,2}, 郑修诺¹, 闫倩文¹, 王咏梅^{1,2}, 刘卫亮^{1,2}, 王昕³, 康佳珏³

(1. 华北电力大学自动化系, 河北 保定 071003; 2. 保定市综合能源系统状态检测与优化调控重点实验室, 河北 保定 071003; 3. 国家能源集团新能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 在“双碳”战略背景下, 为推动我国新一轮清洁低碳安全高效的新能源体系建设, 提出了绿证-碳交易交互机制下计及电动汽车充放电技术的虚拟电厂优化调度方法。首先, 建立了虚拟电厂数学模型以及负荷侧响应模型, 预测了集群电动汽车的可调节上下限。其次, 考虑电动汽车的碳配额和绿证配额, 建立了阶梯式碳交易模型和绿证交易模型。基于两种机制转换系数设计了绿证-碳交易交互机制, 以虚拟电厂综合成本最小为目标构建优化调度模型。最后, 算例结果表明, 所提模型能够实现虚拟电厂运行的经济性和低碳性, 并对电动汽车充放电模式与渗透率、碳交易价格和绿证交易价格对虚拟电厂运行的影响进行了分析验证。

关键词: 绿证交易; 碳交易; 交互机制; 虚拟电厂; 优化调度

Optimal Scheduling of Virtual Power Plant Under the Green Certificate Carbon Trading Interaction Mechanism

CHEN Wenying^{1,2}, ZHENG Xiunuo¹, YAN Qianwen¹, WANG Yongmei^{1,2}, LIU Weiliang^{1,2}, WANG Xin³,
KANG Jiayao³

(1. Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 2. Baoding key Laboratory of State Detection and Optimization Regulation for Integrated Energy System, Baoding, Hebei 071003, China; 3. National Energy Group New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: Under the background of dual carbon strategy, in order to promote the construction of a new round of clean, low-carbon, safe and efficient new energy system in China, a virtual power plant optimal scheduling strategy method is proposed considering electric vehicle charging and discharging technology under the green certificate carbon trading interaction mechanism. Firstly, the mathematical model of virtual power plant and load side response model are established, and the adjustable upper and lower limits of cluster electric vehicles are predicted. Secondly, considering the carbon quotas and green certificate quotas of electric vehicles, the ladder type carbon trading model and green certificate trading model are established. Based on the conversion coefficients of the two mechanisms, the green certificate carbon trading interaction mechanism is designed, and the optimal scheduling model is constructed with the goal of minimizing the comprehensive cost of virtual power plants. Finally, calculation results show that the proposed model can realize the economy and low-carbon operation of virtual power plant. And the impact of electric vehicle charging and discharging mode and penetration rate, carbon trading price and green certificate trading price on virtual power plant operation are verified and analyzed.

Key words: green certificate trading; carbon trading; interaction mechanism; virtual power plant; optimal scheduling

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(2023JG005); 河北省高等学校科学技术研究项目(CXY2023001); 国家能源集团科技项目(GINY-21-98)。

Foundation item: Supported by the Basic Research Fund for Central Universities Project (2023JG005); the Science and Technology Research Project of Higher Education Institutions in Hebei Province (CXY2023001); the National Energy Group Science and Technology Project (GINY-21-98).

0 引言

在“双碳”战略的大环境下,我国加快建设清洁低碳、安全有效的能源体系,深化电力市场改革,建设新型电力系统。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)中新能源大量替代常规机组,分布式能源(distributed energy recourse, DER)、电动汽车(electric vehicle, EV)等交互式设备广泛接入能够减少CO₂排放^[1-2],负荷结构将更加多元化,源网荷交互和交织,使电网波动加剧,需要对电网进行合理的调度^[3-4]。

以新能源技术为核心的电动汽车具有显著的环境效益,促进了可再生能源的消纳,推动了绿色交通体系的建设,为能源转型提供了重要支撑^[5]。随着“双碳”目标的实施,电动汽车的规模越来越大,电动汽车的充放电行为将会对电力系统的运行产生重要的影响^[6-7]。截至2023年我国EV保有量为1 400万辆,占汽车市场整体份额增至18%,并呈现高速增长态势^[8]。

围绕虚拟电厂经济性运行,国内外学者开展了一定的研究工作。文献[9]考虑不确定因素影响,建立了min-max-min结构的虚拟电厂两阶段鲁棒优化模型,以经济性最优为目标求解极端场景下的最优调度策略。文献[10]建立了一个基于非合作和合作博弈论的多运营商虚拟电厂系统经济最优评估框架,电力交换量和报价根据功率平衡来确定。文献[11]建立了一种非管制电力市场环境下的虚拟电厂日前-日内两阶段模型,提出了以运行成本最小为目标的最优调度策略,为虚拟电厂的经济优化调度提供了新的想法。文献[12]提出了一种考虑消费者心理和价格弹性机制的调峰潜力评估模型,通过刻画用户特征获得具有经济效益最优的控制策略。上述文献主要是研究虚拟电厂经济性最优的调度策略,但是没有考虑到碳排放对环境的影响。

虚拟电厂可以通过引入碳排放机制(carbon emissions trading, CET)和绿证交易机制(green certificate trading, GCT)来减少碳排放。文献[13]建立了基于二级碳市场与绿证分配的源荷低碳经济调度模型,以综合运维成本最小为目标优化调度,仿真表明该策略能有效提高环保企业收益,鼓励高碳排放企业向低碳转型。文献[14]综合考虑

电-碳-绿证市场和需求响应机制,基于区间线性规划构建了虚拟电厂优化调度模型,验证了该模型的安全可靠性和经济性。文献[15-16]以绿证-碳交易机制为背景建立了配电网经济低碳优化调度模型,通过算例仿真验证了其有效性。文献[17]同时考虑绿证交易和碳交易制度,并引入高载能需求响应机制,构建了“源-荷”互补优化调度模型,能够增大新能源消纳和减少系统碳排放。CET与GCT等市场目前处于并行运行状态,现有研究虽然同时关注了CET和GCT,但对绿证市场的低碳特性分析不足,绿证市场在减少碳排放方面的作用尚未得到充分体现。两个市场之间的协同效应需要进一步加强,如何优化CET与GCT的交互机制是一个重要的研究方向。

为了解决上述问题,本文提出了绿证-碳交易交互机制下计及电动汽车充放电技术的虚拟电厂优化调度方法。首先,建立了虚拟电厂数学模型以及负荷侧响应模型,预测了集群电动汽车的可调节上下限;其次,考虑电动汽车碳配额与其绿证配额,建立了阶梯式碳交易模型和绿证交易模型,基于两种机制转换系数设计了绿证-碳交易交互机制,以虚拟电厂综合成本最小为目标构建优化调度模型;最后,算例结果表明,所提模型能够实现虚拟电厂运行的经济性和低碳性,并对电动汽车充放电模式与渗透率、碳交易价格和绿证交易价格对虚拟电厂运行的影响进行了分析验证。

1 虚拟电厂结构及模型

1.1 虚拟电厂结构

虚拟电厂具有整合分布式能源资源的能力,能够参与电力市场交易,优化电力系统的运行效率,提高分布式能源的利用率,为可再生能源的大规模接入提供了有效解决方案。本文所研究的虚拟电厂结构图如图1所示。其中包括:风力发电(wind turbine, WT)、光伏发电(photovoltaic power, PV)、微型燃气轮机(micro gas turbine, MT)、储能系统(energy storage, ES)、电动汽车(electric vehicle, EV)和常规负荷。

1.2 数学模型

1.2.1 光伏发电模型

光伏出力和地理方位、太阳辐射强度和光伏装

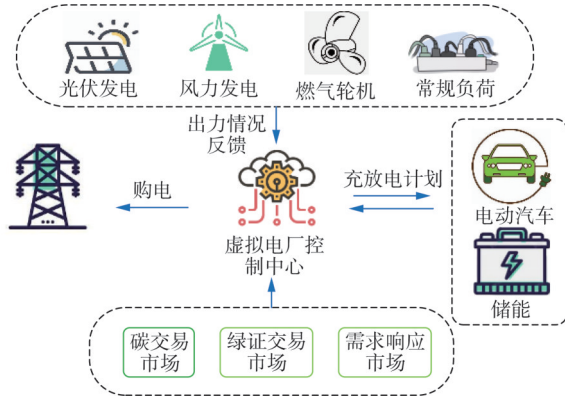


图1 虚拟电厂结构图

Fig.1 Virtual power plant structure diagram

机容量等有关,如式(1)所示^[18]。

$$P_v(t) = \begin{cases} \frac{Q_t^2}{Q_s r_c} W_{sr}, & 0 < Q_t \leq r_c \\ \frac{Q_t}{Q_s} W_{sr}, & r_c < Q_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_v(t)$ 为光伏出力; Q_s 为标准测试条件下的太阳辐射强度; r_c 为实际环境下的太阳辐射强度; W_{sr} 为光伏额定输出功率; Q_t 为 t 时段太阳辐射强度。其中,屋顶光伏计算如式(2)~(3)所示。

$$T = \frac{I \times Q \times \eta_v}{1000} \quad (2)$$

$$Q = S [\sin(\alpha_v + \beta_v) / \sin \alpha_v] + \cos \gamma_v \times H_v / \tan \alpha_v \quad (3)$$

式中: T 为光伏输出功率; Q 为单位面积接收的太阳辐照度; I 为光伏容量; η_v 为光伏综合效率; S 为太阳直射辐射强度; α_v 为太阳光线与水平面的夹角; β_v 为光伏板与水平面的倾斜角度; γ_v 为光伏板的朝向方位角; H_v 为光伏阵列的安装高度。

1.2.2 风力发电模型

风力发电需要考虑其实际风速、切入风速、额定风速和切出风速,风电机组的出力如式(4)所示^[19]。

$$P_{wt}(t) = \begin{cases} \frac{v_t - v_{in}}{v_r - v_{in}} P_r, & v_{in} < v_t \leq v_r \\ P_r, & v_r < v_t \leq v_{out} \\ 0, & v_t \leq v_{in} \text{ 或 } v_t \geq v_{out} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{wt} 为风电机组的输出功率; P_r 为风电机组的额定功率; v_t 为实际风速; v_{in} 为切入风速; v_r 为额定风速; v_{out} 为切出风速。

1.2.3 储能模型

作为灵活性调度资源的储能装置可以在负荷

峰值的时候放电来补充能源供应不足的问题,也可以在能源供应过剩的时候储存这些资源,从而体现其灵活性和可持续性。储能模型表达式如式(5)~(7)所示。

$$P_{es, ch, t} = \begin{cases} -P_{es, t}, & P_{es, t} < 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{es, dis, t} = \begin{cases} P_{es, t}, & P_{es, t} > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$S_{SOC, t} = S_{SOC, t-1} + \frac{\mu_{ch} P_{es, ch, t} \Delta t - P_{es, dis, t} \Delta t / \mu_{dis}}{E_{es}} \quad (7)$$

式中: $P_{es, t}$ 为 t 时段储能功率; $P_{es, ch, t}$ 和 $P_{es, dis, t}$ 分别为 t 时段内储能的充放电功率; μ_{ch} 和 μ_{dis} 分别为储能的充放电效率; $S_{SOC, t}$ 、 $S_{SOC, t-1}$ 分别为 t 时段和 $t-1$ 时段的储能电量; Δt 为 t 时段和 $t-1$ 时段的时间差; E_{es} 为储能的额定容量。

1.2.4 电动汽车模型

电动汽车的入网时间、充电需求以及离网时间与电动汽车日行驶里程有关,其概率密度函数如式(8)所示。

$$f(L) = \frac{1}{L \sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln L - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2} \right] \quad (8)$$

式中: L 为行驶里程; μ_L 与 σ_L 分别为期望值与标准差。

电动汽车入网时间的概率密度函数如式(9)所示。

$$f_s(t_{start}) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_{start} - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2} \right], & \mu_s - 12 < t_{start} < 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_{start} - \mu_s + 24)^2}{2\sigma_s^2} \right], & 0 < t_{start} < \mu_s - 12 \end{cases} \quad (9)$$

式中: t_{start} 为入网时间; μ_s 与 σ_s 分别为期望值与标准差。

电动汽车离网时间与电动汽车起始充电时间和停车时长有关,概率密度函数如式(10)所示。

$$f_z(t_{end}) = \frac{1}{t_{end} \sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln t_{end} - \mu_z)^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (10)$$

式中: t_{end} 为离网时间; μ_z 与 σ_z 分别为期望值与标准差。

单辆电动汽车的充放电能力随时间动态变化,不同时间段的功率范围反映了电动汽车的充放电能力变化,通过建立时间相关的模型来准确描述电动汽车的功率特性,如式(11)所示。

$$\begin{cases}
E_{EV \max, i, t} = \min \{ (E_{i, T_{o,i}} + P_{ev \max, i} (t - T_{o,i}) \Delta t), E_{ex, i} \} & t \in (T_{o,i}, T_{eq, i}) \\
E_{EV \min 2, i, t} = \max \{ (E_{ex, i} + P_{ev \min, i} (T_{eq, i} - t) \Delta t), E_{ev \min, i} \} & t \in (T_{o,i}, T_{eq, i}) \\
E_{EV \min 1, i, t} = \max \{ (E_{i, T_{o,i}} + P_{\min, i} (t - T_{o,i}) \Delta t), E_{ev \min, i} \} & t \in (T_{o,i}, T_{eq, i}) \\
E_{EV \min, i, t} = \max (E_{EV \min 1, i, t}, E_{EV \min 2, i, t}) \\
P_{EV, \max, i, t} = \min \{ (E_{EV \max, i, t+1} - E_{EV \min, i, t+1}) / \Delta t, P_{ev \max, i} \} \\
P_{EV, \min, i, t} = \max \{ (E_{EV \min, i, t+1} - E_{EV \max, i, t+1}) / \Delta t, P_{ev \min, i} \}
\end{cases} \quad (11)$$

式中： $E_{EV \max, i, t}$ 、 $E_{EV \min, i, t}$ 、 $E_{ev \min, i}$ 和 $E_{ex, i}$ 分别为在 t 时段 i 车的最大、最小电量以及车允许的最小电量和车主期望离网时的电量； $E_{i, T_{o,i}}$ 为电动汽车并网时电量； $T_{o,i}$ 和 $T_{eq, i}$ 分别为 i 车并网时刻和离网时刻； $P_{EV \max, i}$ 和 $P_{EV \min, i}$ 分别为 i 车的充放功率最大值； $P_{EV, \max, i, t}$ 和 $P_{EV, \min, i, t}$ 分别为在 t 时段 i 车的充放电功率最大值和最小值； $E_{EV \min 1, i, t}$ 和 $E_{EV \min 2, i, t}$ 分别为由离网时段往前部分的电量最小值与并网时段往后部分的电量最小值。

采用映射方法构建单辆电动汽车的调节潜力模型，保持其约束不变通过数学变换将电动汽车个体变量空间映射到超立方体空间。超立方体空间包含了所有可能的充放电模式，通过这种方法将多辆电动汽车的模型压缩为一个聚合模型，聚合模型能够显著降低模型的复杂程度。

闵可夫斯基加法在欧几里得空间中具有适用性，其通过空间膨胀操作实现多空间叠加，能够有效聚合电动汽车个体的特性，该方法将电动汽车集群等效为一个广义设备，通过广义聚合模型表征集群电动汽车的可调节上下限^[20]，如式(12)所示。

$$A_v = \{P_{j, t, ch, \max}, E_{j, t, \min}, E_{j, t, \max}, \Delta E_{j, t}\} \quad (12)$$

式中： $P_{j, t, ch, \max}$ 为第 j 辆车在 t 时段的充电功率上限； $E_{j, t, \max}$ 和 $E_{j, t, \min}$ 分别为第 j 辆车在 t 时段的电量上下限； $\Delta E_{j, t}$ 为第 j 辆车在 t 时段的电量变化。

假定电动汽车并网后的荷电状态是 $S_{OC, st}$ ，用户预期离网后电动汽车的荷电状态是 $S_{OC, end}$ ，电动汽车的充电功率是 P_{charge} ，单辆电动汽车的典型充放电界限模型如图2所示。能量轨迹上界为：电动汽车在 t_{in} 入网后以 P_{charge} 充电直至充电结束荷电状态 $S_{OC, end}$ ，并维持该状态到 t_{out} 离网；能量轨迹下界为：电动汽车在 t_{in} 入网后开始放电直至 $S_{OC, dis}$ ，并在 t_{out} 离网前以 P_{charge} 充电至充电结束荷电状态 $S_{OC, end}$ ；上界和下界之间的所有能量变化路径均为可行轨迹^[21]。

1.3 负荷侧响应模型

虚拟电厂为激励负荷参与调度在引入CET与GCT的同时引入需求响应机制，为描述用户侧负荷需求响应(demand response, DR)能力，考虑到负荷具有可转移特性以及可中断特性的情况下，该负荷模型如式(13)所示。

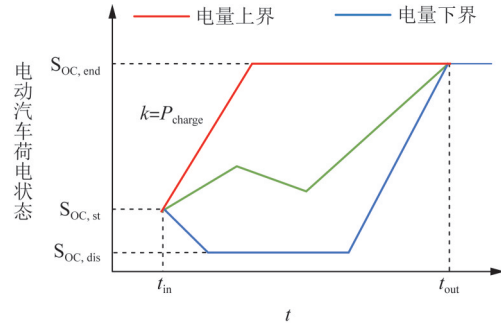


图2 单辆电动汽车充放电界限模型

Fig. 2 Charge discharge limit model of single electric vehicle

$$\begin{cases}
P_t^{SL, \min} < P_t^{SL} < P_t^{SL, \max} \\
\sum_{t=1}^T P_t^{SL} = 0 \\
0 < P_t^{IL} < \varepsilon P_t^0
\end{cases} \quad (13)$$

式中： P_t^{SL} 为 t 时段负荷转移功率； P_t^{IL} 为负荷中断功率； $P_t^{SL, \max}$ 和 $P_t^{SL, \min}$ 分别为负荷转移功率的上、下限； P_t^0 为 t 时段原始电负荷； ε 为可中断负荷占比系数； T 为一天时段数量，取24。

综合负荷模型，可以推导出需求侧虚拟电厂电等效负荷，如式(14)所示。

$$P_{r, t} = P_t^{GL} + P_t^{SL} - P_t^{IL} \quad (14)$$

式中： $P_{r, t}$ 为虚拟电厂等效负荷功率； P_t^{GL} 为 t 时刻固定负荷。

2 绿证-碳交易机制

本节考虑电动汽车碳配额和绿证配额，建立了阶梯式碳交易模型和绿证交易模型，基于两种机制

转换系数设计了绿证-碳交易交互机制。

2.1 碳交易机制

2.1.1 碳交易原理

碳排放权交易机制是一种以市场原则为基础的环境经济政策工具,有助于应对气候变化挑战。在这种机制下,政府允许企业和组织买卖碳排放配额,政府设定一个总的碳排放配额上限,并将这个总量分配给参与者(通常是企业),企业必须持有足够数量的碳配额来抵扣其碳排放量,如果企业的排放量不超过其持有的碳配额,它可以出售剩余的配额;如果排放量超过其持有的碳配额,它则需要从市场上购买额外的配额。通过市场交易,企业可以灵活地管理碳排放成本以及控制碳排放量^[22-23]。

2.1.2 各主体碳配额

对虚拟电厂各主体的碳配额分配可以参照《碳排放权交易管理办法》,与前一天各设备的发电量有关,计算公式如式(15)~(18)所示。

$$E_t = \sum_{g=1}^{G_N} E_{g,t} + \sum_{w=1}^{W_N} E_{w,t} + \sum_{p=1}^{P_N} E_{p,t} + \sum_{v=1}^{V_N} E_{ev,t} \quad (15)$$

$$E_{g,t} = \alpha_g P'_{g,t} \quad (16)$$

$$E_{w,t} = \alpha_w P'_{w,t} \quad (17)$$

$$E_{p,t} = \alpha_p P'_{p,t} \quad (18)$$

式中: E_t 为在 t 时段的碳配额; V_N 、 G_N 、 P_N 和 W_N 分别为电动汽车、燃气轮机、光伏和风机的数量; $E_{g,t}$ 、 $E_{ev,t}$ 、 $E_{p,t}$ 和 $E_{w,t}$ 分别为 t 时段燃气轮机、电动汽车、光伏和风机的碳配额; α_g 、 α_p 和 α_w 分别为燃气轮机、光伏和风机的碳配额系数,参考国家公布的“区域电网基准线排放因子”^[24]; $P'_{g,t}$ 、 $P'_{w,t}$ 和 $P'_{p,t}$ 分别为前一天的 t 时段燃气轮机、风机和光伏的发电功率。

电动汽车碳配额为行驶相同里程情况下相比于燃油汽车减少的碳排放量^[25],计算公式如式(19)~(21)所示。

$$E_{ev,t} = P_{ev,t} L_{ev} E_{gas} - \frac{P_{ev,t}}{P_{z,t}} C_{z,t} \quad (19)$$

$$C_{z,t} = \sum_{g=1}^{G_N} P_{g,t} c^G + C_{buy,t} \quad (20)$$

$$P_{z,t} = \sum_{g=1}^{G_N} P_{g,t} + \sum_{w=1}^{W_N} P_{w,t} + \sum_{p=1}^{P_N} P_{p,t} \quad (21)$$

式中: $P_{ev,t}$ 为电动汽车在 t 时段的充电功率; L_{ev} 为电动汽车的能耗效率,即单位电量可行驶距离; E_{gas} 为传统内燃机汽车的单位距离碳排放因子; $C_{z,t}$ 为虚拟电厂在 t 时段电网购电量和燃气轮机产生的

碳排放量的总和; c^G 为燃气轮机的单位碳排放因子; $C_{buy,t}$ 为上级电网购电的碳排放量; $P_{g,t}$ 、 $P_{w,t}$ 和 $P_{p,t}$ 分别为燃气轮机、风机和光伏的发电功率。

2.1.3 阶梯式碳交易机制

为有效控制企业的碳排放总量,监管机构引入了阶梯式碳交易机制,该机制根据企业的实际排放量设置不同的价格区间,企业的排放量超过免费配额越多,适用的碳价越高,虚拟电厂的阶梯式碳交易模型如式(22)~(23)所示。

$$f_{co_2} = \begin{cases} -c_{co_2}(C_c - C_z), & C_c - v < C_z \leq C_c \\ c_{co_2}(C_z - C_c), & C_c < C_z \leq C_c + v \\ c_{co_2}v + c_{co_2}(1 + \beta_{co_2})(C_c - C_z - v), & C_c + v < C_z \leq C_c + 2v \\ c_{co_2}(2 + \beta_{co_2})v + c_{co_2}(1 + 2\beta_{co_2})(C_c - C_z - 2v), & C_c + 2v < C_z \leq C_c + 3v \\ c_{co_2}(3 + 3\beta_{co_2})v + c_{co_2}(1 + 3\beta_{co_2})(C_c - C_z - 2v), & C_c + 3v < C_z \end{cases} \quad (22)$$

$$C_a = C_z + C_{ev} \quad (23)$$

式中: f_{co_2} 为碳排放源的碳交易成本; c_{co_2} 为碳交易市场的基础价格; β_{co_2} 为阶梯碳价的增长系数; v 为碳排放量的分段区间长度; C_z 为虚拟电厂电网购电量和燃气轮机产生的碳排放总量; C_c 为政府免费分配的碳排放额度; C_a 为碳排放源的实际碳排放量; C_{ev} 为电动汽车的碳排放量。

2.2 绿证交易机制

2.2.1 绿证交易机制原理

绿证交易机制的主要目标是促进可再生能源的开发与使用。在这种机制下,政府或相关机构向可再生能源发电企业颁发一定数量的绿色发电证书(绿证),并允许这些企业在市场上进行绿证的买卖交易。绿证通常是衡量可再生能源发电量的重要凭证,绿色证书交易机制将绿证配额指标转化为可交易的商品,其数量与企业实际产生的可再生能源电力成正比,市场主体可以通过交易绿色证书完成配额要求,增加清洁能源发电出力^[26-27]。

2.2.2 绿色证书配额

新能源的绿证配额与其出力正相关,配额公式如式(24)~(25)所示。

$$Q_{w,t} = \xi_w P_{w,t} \quad (24)$$

$$Q_{p,t} = \xi_p P_{p,t} \quad (25)$$

式中: $Q_{w,t}$ 和 $Q_{p,t}$ 分别为风力发电和光伏发电在 t 时段获得的绿证数量; ξ_w 和 ξ_p 分别为单位风力发电、

光伏发电的绿证转换系数。

燃气轮机的绿证配额与其出力情况和上期绿证配额的完成情况有关,燃气轮机绿证配额如式(26)所示。

$$Q_{g,t} = [K_g \gamma + A_{g,t-1}(1 - \gamma)][Q_{w,t} + Q_{p,t}] \quad (26)$$

式中: K_g 为燃气轮机出力在总出力中的占比; γ 为绿证配额系数; $A_{g,t-1}$ 为燃气轮机上期绿证配额完成比例。

由于电动汽车充电需要购电,因此电动汽车在参与绿证机制中也需要被赋予一定的碳配额,计算如式(27)所示。

$$Q_{ev,t} = \mu P_{ev,t} \quad (27)$$

式中 μ 为电动汽车的绿证配额系数。

2.3 绿证-碳交易交互机制

虚拟电厂能够聚合不同类型的分布式能源,可以作为一个独立的主体参与碳交易机制和绿证交易机制。在碳交易机制中,燃气轮机、电动汽车用户和新能源机组参与碳排放权的买卖;在绿色证书交易机制中,符合标准的可再生能源发电企业可以出售绿色证书,燃气轮机和电动汽车用户需要完成绿证配额要求,通过绿证交易市场购买绿色证书,其中,免费的绿证配额和碳配额可以用于抵消部分碳排放量,本文提出了一种基于转换系数的市场交互机制,图3展示了两个市场之间的转换流程。虚拟电厂需要同时满足电力需求、碳配额和绿证配额,可再生能源发电企业直接参与绿证交易机制,并通过出售绿色证书间接参与碳交易机制,能够提高虚拟电厂的经济性,同时助于增强虚拟电厂的环境友好性。

转换流程如下。

1) 计算 VPP 的碳排放量

通过碳排放流或碳足迹等方式计算 VPP 所产生的碳排放量,部分以政府等相关部门分配的碳配额和其绿电减排量作为抵扣,可以得到 VPP 产生的碳排放量。

2) 计算 VPP 的绿证数量及绿证背后所代表的碳减排量。

通过 VPP 生产或消纳的新能源机组产生的电量来确定绿证数量,将新能源发电量与火力发电量进行对比分析,量化绿色证书所代表的碳减排效果,绿色证书的数量反映了新能源发电的规模,火力发电的碳排放数据为计算减排量提供了基准,以此计

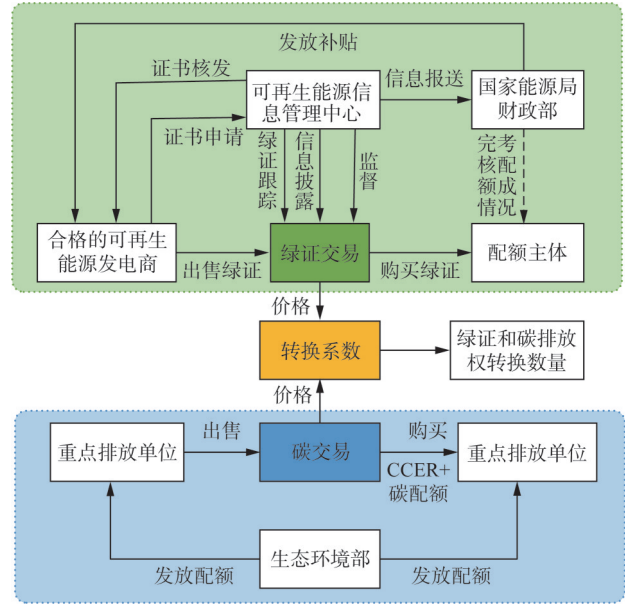


图3 绿证-碳交易交互机制

Fig. 3 Green certificate carbon trading interaction mechanism

算出绿证背后所代表的碳减排量。

3) 确定转换系数

转换系数 k 由两个市场的基础交易价格确定,如式(28)所示。

$$k = \frac{c_{co_2}}{c_{green}} \quad (28)$$

式中: c_{co_2} 为碳交易市场上的基础交易价格; c_{green} 为绿证交易市场上的基础交易价格。

4) 参与绿证-碳交易交互机制

可再生能源发电企业未直接参与碳交易,而是通过出售绿证参与碳交易市场,重新计算绿证和碳排放权数量,如式(29)~(30)所示。

$$N'_{green} = N_{green} - N_{tr} \quad (29)$$

$$C'_a = C_a - kN_{tr} - \lambda N'_{green} \quad (30)$$

式中: N'_{green} 为企业参与绿证-碳交易机制后出售或购买绿证的数量; N_{tr} 为参与市场转换的绿证数量; N_{green} 为企业出售或购买绿证的数量; C'_a 为企业参与绿证-碳交易机制后碳排放源的实际碳排放量; λ 为绿色证书的碳减排折算系数。

3 虚拟电厂优化调度模型

3.1 目标函数

以阶梯碳交易成本 f_{co_2} 、购能成本 f_{buy} 、需求响应负荷费用 f_{DR} 、绿证交易收益 f_{green} 和电动汽车成本 f_{ev} 所构成的虚拟电厂综合成本最小为目标函数,其

中,其余成本均为虚拟电厂除电动汽车外的成本,如式(31)~(33)所示。

$$\min f_1 = \min (f_{\text{co}_2} + f_{\text{buy}} + f_{\text{DR}} - f_{\text{green}} + f_{\text{ev}}) \quad (31)$$

$$f_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^T c_{\text{grid},t} P_{\text{grid},t} + \sum_{t=1}^T c_{\text{p},t} P_{\text{p},t} + \sum_{t=1}^T c_{\text{w},t} P_{\text{w},t} \quad (32)$$

$$f_{\text{ev}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{ev},t}^{\text{p}} - C_{\text{ev},t}^{\text{co}_2} + C_{\text{ev},t}^{\text{green}}) \quad (33)$$

式中: $c_{\text{grid},t}$ 为 t 时刻与上级电网间的交互电价; $c_{\text{p},t}$ 和 $c_{\text{w},t}$ 分别为 t 时刻购买光伏发电和风力发电电价; $P_{\text{grid},t}$ 为 t 时刻和上级电网的交互功率; $C_{\text{ev},t}^{\text{p}}$ 为 t 时刻电动汽车充放电成本; $C_{\text{ev},t}^{\text{co}_2}$ 为 t 时刻电动汽车碳减排收益; $C_{\text{ev},t}^{\text{green}}$ 为 t 时刻电动汽车绿证交易成本。

3.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$P_{\text{p},t} + P_{\text{w},t} + P_{\text{g},t} + P_{\text{ev},\text{dis},t} + P_{\text{es},\text{dis},t} + P_{\text{grid},t} = P_{\text{load},t} + P_{\text{ev},\text{ch},t} + P_{\text{es},\text{ch},t} \quad (34)$$

式中: $P_{\text{ev},\text{ch},t}$ 和 $P_{\text{ev},\text{dis},t}$ 分别为 t 时刻电动汽车充放电功率; $P_{\text{es},\text{ch},t}$ 和 $P_{\text{es},\text{dis},t}$ 分别为 t 时刻储能充放电功率; $P_{\text{load},t}$ 为 t 时刻负载功率。

2) 与电网交互功率约束

$$P_{\text{grid}} \geq 0 \quad (35)$$

式中 P_{grid} 为与电网交互功率。

3) 风电出力、光伏出力约束

$$0 \leq P_{\text{w},t} \leq P_{\text{w}}^{\text{max}} \quad (36)$$

$$0 \leq P_{\text{p},t} \leq P_{\text{p}}^{\text{max}} \quad (37)$$

式中 $P_{\text{w}}^{\text{max}}$ 和 $P_{\text{p}}^{\text{max}}$ 分别为风电机组和光伏机组最大出力。

4) 燃气轮机出力约束

$$P_{\text{g}}^{\text{min}} \leq P_{\text{g},t} \leq P_{\text{g}}^{\text{max}} \quad (38)$$

$$-R_{\text{g}}^{\text{D}} \Delta t \leq P_{\text{g},t} - P_{\text{g},t-1} \leq R_{\text{g}}^{\text{U}} \Delta t \quad (39)$$

式中: $P_{\text{g}}^{\text{min}}$ 和 $P_{\text{g}}^{\text{max}}$ 分别为燃气轮机最大输出功率和最小输出功率; R_{g}^{D} 和 R_{g}^{U} 分别为燃气轮机降负荷速率和升负荷速率。

5) 储能约束

储能系统充放电功率约束为:

$$P_{\text{ev},\text{ch},t} \leq P_{\text{BESS}}^{\text{max}} \quad (40)$$

$$P_{\text{ev},\text{dis},t} \leq P_{\text{BESS}}^{\text{max}} \quad (41)$$

式中 $P_{\text{BESS}}^{\text{max}}$ 为储能系统额定最大充放电功率。

储能系统电量约束为:

$$S_{\text{OC},i}(t) = S_{\text{OC},i}(t-1) + \frac{\alpha P_{\text{es},\text{ch}}(t) - \beta P_{\text{es},\text{dis}}(t)}{E_i} \quad (42)$$

$$C_i + D_i \leq 1 \quad (43)$$

式中: α 、 β 为储能设备的充放电效率; $S_{\text{OC},i}(t)$ 为第 i 个储能设备 t 时刻荷电状态水平; E_i 为第 i 个储能设备的额定容量; C_i 、 D_i 分别为第 i 个储能设备充电状态指示变量和放电状态指示变量。

6) 电动汽车约束

电动汽车充电功率约束为:

$$-P_{\text{ev},t}^{\text{max}} \leq P_{\text{ev},t} \leq P_{\text{ev},t}^{\text{max}} \quad (44)$$

式中 $P_{\text{ev},t}^{\text{max}}$ 为电动汽车 t 时刻最大充放电功率。

电动汽车状态变量约束为:

$$u_{\text{ev},\text{ch}} + u_{\text{ev},\text{dis}} \leq 1 \quad (45)$$

式中 $u_{\text{ev},\text{ch}}$ 和 $u_{\text{ev},\text{dis}}$ 分别为电动汽车充放电状态变量。

7) 参与转换的绿证约束

$$0 \leq N_{\text{tr}} \leq N_{\text{green}} \quad (46)$$

3.3 模型求解

本文所建模型以虚拟电厂各设备出力、各时段负荷、电动汽车基础参数以及两市场基础参数作为输入,以电动汽车充放电功率、各设备出力、所转换的碳排放权和绿证等作为决策变量,考虑功率平衡约束、与电网交互功率约束、各设备出力约束、电动汽车功率约束等多方面约束,以阶梯碳排放成本、购能成本、需求响应负荷费用、绿证交易收益和电动汽车成本所构成的综合成本最小为目标进行求解,该模型为混合整数线性规划 MILP (mixed integer linear programming) 问题,本文采用 MATLAB 平台进行模型求解,利用 YALMIP 工具箱建立优化模型,CPLEX 求解器求解以上优化问题,优化调度过程如图4所示。

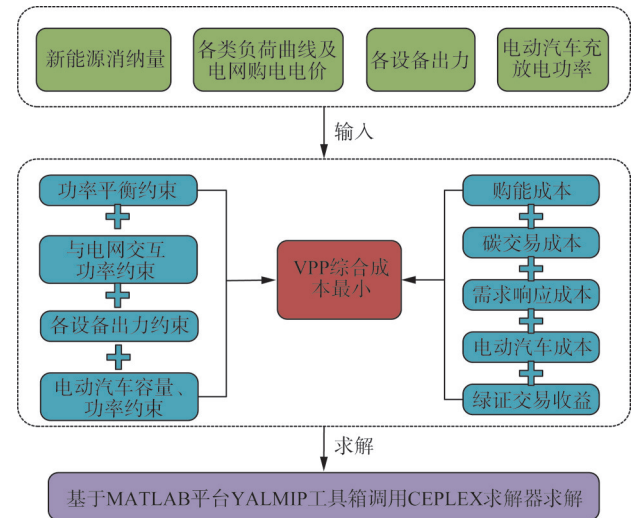


图4 优化调度过程图

Fig. 4 Optimal scheduling process diagram

4 算例分析

4.1 参数设置

为了验证包含电动汽车的虚拟电厂参与碳交易市场和绿证交易市场的可行性以及所提控制策略的优化效果,设计算例进行分析。设置碳交易价格为 50 元/t,绿证基础交易价格为 70 元/本,最大中断负荷比例为[0.15, 0.1, 0.08],中断负荷补偿费用为[650, 700, 800],假设虚拟电厂聚合了 1 000 辆电动汽车,具体参数见表 1^[28-31]。

表 1 模型参数设置

Tab. 1 Model parameter setting

名称	数值	名称	数值
MT 爬坡率/%	20	MT 滑坡率/%	20
MT 出力约束/MW (1.1,3.3)		WT 出力约束/MW	(0,4)
PV 出力约束/MW	(0,7)	ES 出力约束/MW	(-1,1)
ES 充电效率/%	90	ES SOC 范围	[0.2,0.9]
ES 放电效率/%	90	EV 充放电效率/%	90
EV 电池容量/kWh	60	EV SOC 范围	[0.2,0.9]
阶梯碳价的增长系数/%	10	绿证配额指标/本	20
碳排放阶梯区间长度	10	绿色证书的碳减排折算系数	0.15

蒙特卡洛方法利用随机样本抽取来揭示概率事件的规律性,适用于分析概率性问题的统计模拟,在模拟电动汽车的出行情况,该方法能够有效地通过少量抽样数据来洞察整体行为模式。在本文算例中,我们以深圳市的电动汽车用户出行行为为研究对象进行研究^[32],设置行驶里程函数参数为 $\mu_L=3.2$ 、 $\sigma_L=0.88$,电动汽车行驶里程的概率密度函数如图 5 所示。

为验证本文所提策略的有效性,设置了 5 种不同场景进行对比分析,场景如下。

场景 1: VPP 典型运行方式。

场景 2: 仅考虑碳交易机制。

场景 3: 场景 2 的基础上考虑绿证交易机制。

场景 4: 考虑绿证-碳交易交互机制。

场景 5: 考虑绿证-碳交易交互机制和需求响应。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 调度结果分析

调整虚拟电厂的目标函数和约束条件与不同的场景相对应,从而得到不同场景调度结果如表 2

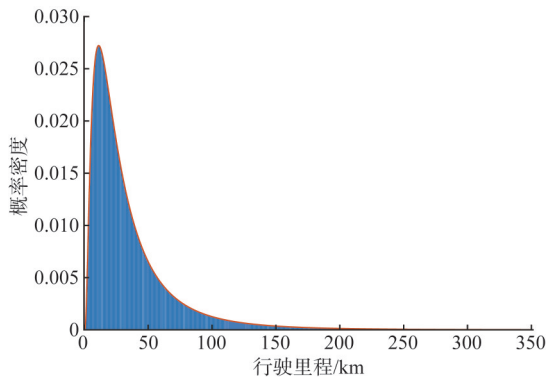


图 5 电动汽车行驶里程的概率密度函数

Fig. 5 Probability density function of electric vehicle mileage

所示。

表 2 不同场景调度结果

Tab. 2 Scheduling results in different scenarios

场景	综合成本/元	碳交易成本/元	绿证交易收益/元	绿电占比/%	风光消纳率/%
场景 1	124 635.45	0	0	36.16	94.76
场景 2	125 564.34	4 297.33	0	36.65	94.86
场景 3	125 157.91	4 388.45	3 522.45	33.98	95.12
场景 4	123 276.12	3 363.65	3 216.87	38.81	94.78
场景 5	119 356.79	3 319.32	3 229.26	42.19	100

由表 1 可知,场景 5 通过对负荷进行削减和转移,在保持高新能源消纳率的情况下,综合成本最小,相较于场景 1、2、3、4,分别减少了 5 278.66 元、6 207.55 元、5 801.12 元和 3 919.33 元。相对于场景 3,场景 4 中碳交易成本与绿证交易收益分别减少了 1 024.80 元和 305.58 元,绿色证书与碳排放权的转换导致两个市场的成本发生变化,且碳交易成本的下降幅度大于绿证收益的减少,验证了本文所提策略能够提升虚拟电厂的经济效益。从绿电的角度分析,场景 3 由于加入绿证交易机制,在保证满足自身绿电占比要求的情况下出售多余的绿证配额,体现了绿证交易机制作用。场景 5 的绿电占比最高为 42.19%,通过对电动汽车有序调度,在新能源出力高的情况下进行充电,从而增加风光消纳量,验证了本文所提机制在绿色转型方面的有效性。

4.2.2 场景 5 结果分析

虚拟电厂需求响应优化前后负荷对比情况如图 6 所示,可中断负荷调度结果与电价如图 7 所示。从图 6 和图 7 中可以看出,在 01:00—07:00 和

23:00—24:00 负荷处于低谷阶段且电价较低, 优化后的负荷高于优化前, 填补了低谷负荷。而在 08:00—11:00 和 18:00—22:00 负荷处于高峰阶段且电价较高, 需求响应后负荷明显低于响应前, 起到了“削峰”作用。虚拟电厂通过参与需求响应调整用电负荷分布, 将高峰电价时段的用电负荷转移到低谷电价时段, 从而增加了低谷电价时段的用电需求, 同时高峰电价时段的用电需求显著减少, 有效提高了虚拟电厂的经济效益。在通过引入需求响应机制, 使负荷曲线更加平滑, 提高了虚拟电厂的灵活性。

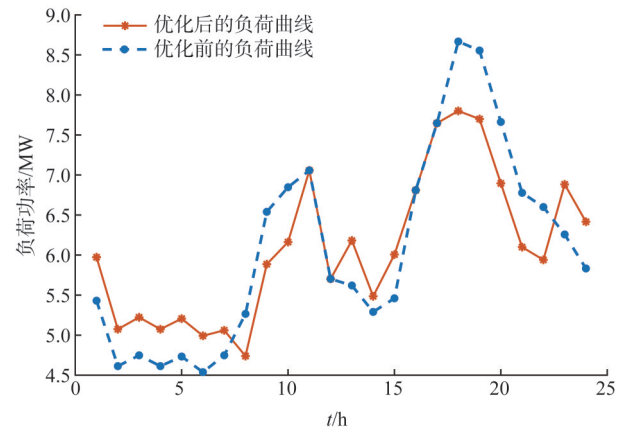


图6 需求响应前后负荷曲线对比

Fig. 6 Comparison of load curves before and after demand response

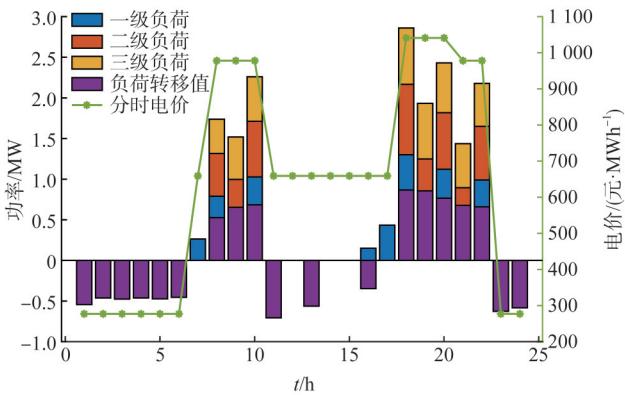


图7 可中断负荷调度结果与电价

Fig. 7 Interruptible load dispatch results and electricity prices

虚拟电厂优化调度结果如图 8 所示, 在 01:00—07:00 和 20:00—24:00 虚拟电厂主要依靠风电出力和向上级购电来满足储能充电、电动汽车充电和负荷需求, 这是由于风机运维成本较小, 采用风力发电能够降低运行成本, 在风力发电量不足以满足

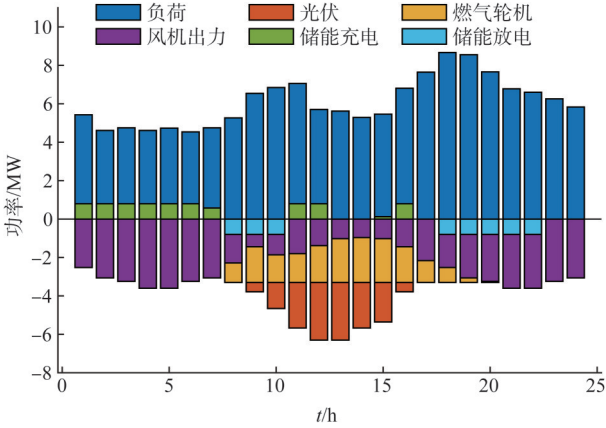


图8 虚拟电厂优化调度结果

Fig. 8 Optimization and scheduling results of virtual power plants

用电需求时, 虚拟电厂在低谷电价向电网购电, 此时, 电网日前交易电价小于燃气轮机单位发电成本时, 燃气轮机的发电出力被控制在最低水平。在 08:00—10:00 和 18:00—22:00 处于峰时电价, 虚拟电厂向上级电网的购电量减少, 从而减少综合成本。

4.2.3 电动汽车充电模式与数量的影响

表 3 为电动汽车不同充电模式下的指标对比。从表 3 可以看出, 有序充放电模式相较于无序充放电模式, 综合成本减少了 3.43 %, 碳交易成本减少了 5.48 %, 绿证交易收益减少了 4.49 %, 在经济性和环保性都明显优于无序充放电。

表 3 电动汽车不同充电模式下的指标对比

Tab. 3 Comparison of indicators for electric vehicles under different charging modes			
模式	综合成本	碳交易成本	绿证交易收益
无序充放电	123 589.77	3 558.26	3 368.42
有序充放电	119 356.79	3 319.32	3 229.26

图 9—10 分别为电动汽车不同模式下负荷曲线和电动汽车调度结果。可以看出, 无序充放电模式下大规模电动汽车入网时会加剧负荷峰谷差, 对电网的安全产生较大的威胁。在有序充放电模式下, 大多数电动汽车在低谷电价时段进行充电, 降低了高峰时段的用电需求; 在峰电价的时刻放电, 填补负荷低谷, 减少燃气轮机出力, 在高峰负荷时段可以向电网提供反向供电服务, 通过放电行为降低电网的峰值负荷压力, 有助于平衡电力供需关系, 同时减少了电动汽车用户的用电成本。对于电动汽车

充放电行为进行优化调度能够更加符合虚拟电厂需求,虚拟电厂通过充分挖掘柔性资源的可调潜力,可以有效降低虚拟电厂峰谷差并降低运行成本,证明了所提方法的有效性。

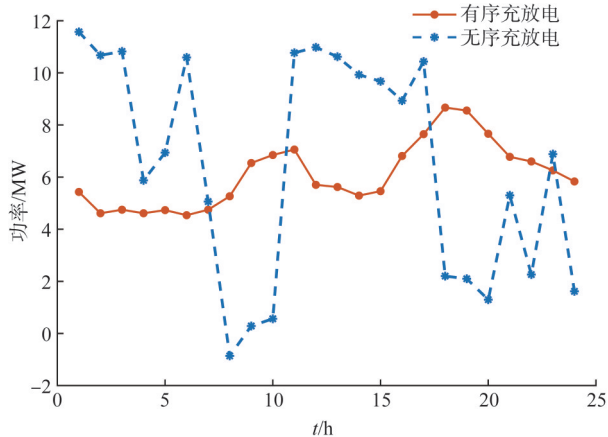


图9 电动汽车不同模式下负荷曲线

Fig. 9 Load curves of electric vehicles under different modes

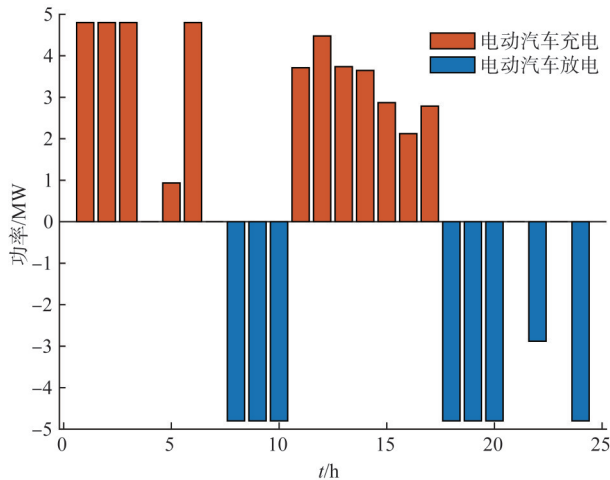


图10 电动汽车调度结果

Fig. 10 Electric vehicle dispatch results

为了研究电动汽车不同数量对调度结果的影响,分别对比了有序充放电情况下电动汽车渗透率为20%、50%和100%,即电动汽车数量为200辆、500辆和1000辆,调度结果如表4所示。

表4 电动汽车不同渗透率的指标对比

Tab. 4 Comparison of indicators with different penetration rates of electric vehicles

渗透率/%	碳交易成本	绿证交易收益
20	4 526. 86	2 878. 69
50	4 276. 92	3 041. 37
100	3 319. 32	3 229. 26

由表4可知,碳交易成本随着电动汽车渗透率增大而减小,绿证交易收益随之增大,虚拟电厂通过调度电动汽车充放电能够有效减少燃气轮机出力,燃气轮机需要购买的碳排放权减少,从而虚拟电厂碳交易成本减少,电动汽车渗透率增大能够促进新能源机组出力增加,从而绿证交易收益增加。

4. 2. 4 碳交易价格的影响

碳交易价格的大小会决定机组出力,进而影响虚拟电厂的运行,当交易阶梯保持不变,虚拟电厂的综合成本和碳排放量随碳交易价格变化的趋势如图11所示。由图11可知,碳交易价格与虚拟电厂综合成本呈正相关、与碳排放量呈负相关。碳交易价格随碳交易成本增大而升高,燃气轮机通过降低发电出力来减少碳排放费用,新能源机组提高发电出力以替代部分传统能源,电动汽车通过放电模式参与电力供应,此时多余的碳排放权转换为绿证,由于转换比例较小,虚拟电厂的综合成本持续增加。在碳交易价格低于70元时,碳交易价格越高,碳排放目标限制越大,虚拟电厂必须降低碳排放;碳交易价格在70元以上时,碳排放量趋于平缓,因为此时碳排放量已经减少到符合虚拟电厂运行需求的最低限度,且设备出力趋于稳定。

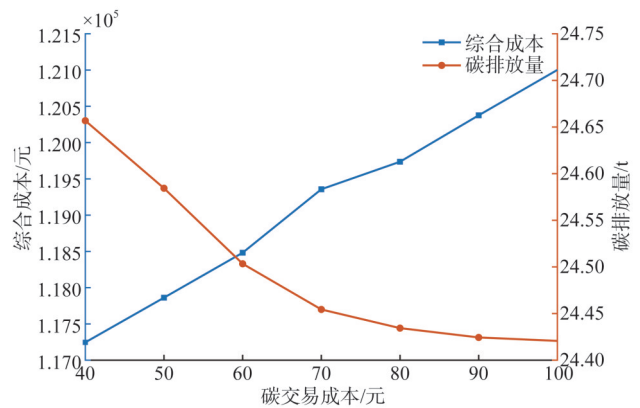


图11 综合成本、碳排放量和碳交易价格的关系

Fig. 11 Relationship between comprehensive cost, carbon emissions, and carbon trading prices

4. 2. 5 绿证交易价格的影响

绿证价格的大小会决定可再生能源出力,虚拟电厂的综合成本和绿证交易收益随绿证交易价格变化的趋势如图12所示,由图可知,虚拟电厂综合成本随绿证交易价格增加而增大,绿证交易收益随着绿证交易价格的上升而先上升,然后下降,最后

上升。绿证交易价格上升,绿证在虚拟电厂运行中的作用加大,虚拟电厂为了获得绿证收益,推动新能源机组加大出力,生产出更多绿色证书来降低购电成本继而降低综合成本。当绿证的交易价格在50元到60元的范围内,一旦达到一个临界点,绿证就会被转化为碳排放权,这将导致绿证交易的收益减少。

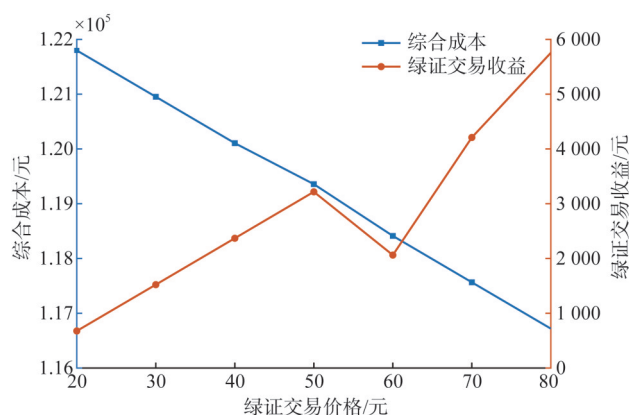


图12 综合成本、绿证交易收益和绿证交易价格的关系

Fig. 12 Relationship between comprehensive costs, green certificate trading revenues, and green certificate trading prices

5 结论

本文综合考虑碳交易机制、绿证交易机制和需求响应,引入电动汽车碳配额与绿证配额,建立了绿证-碳交易交互机制下计及电动汽车V2G的虚拟电厂经济低碳运行模型,对比分析了5种不同场景下的运行结果,并研究了电动汽车充放电模式、碳交易价格和绿证交易价格对虚拟电厂的影响,分析结果如下。

1)与未考虑绿证-碳交易交互机制相比,本文所提策略虚拟电厂综合成本减少了5 278.66元,绿电占比提高了6.03%,风光消纳率提高了5.24%,具有较为优越的经济低碳性。

2)当电动汽车参与到两市场交易机制中,并赋予其绿证配额和碳配额,能够提高电动汽车用户主动参与调度的积极性,发挥电动汽车的低碳性,较于电动汽车无序充放电、有序充放电模式下虚拟电厂经济性更优,起到削峰填谷的作用。

3)合适的碳交易价格、绿证价格能有效约束虚拟电厂碳排放量和提升其经济效益。

本文对于电动汽车用户参与调度的响应特性没

有深入研究,需要在后续工作中进一步分析。

参考文献

- [1] 蒋玮,单沫文,邓一帆,等.虚拟电厂聚合电动汽车参与碳市场的优化调度策略[J].电力工程技术,2023,42(4):13-22,240.
JIANG Wei, SHAN Mowen, DENG Yifan, et al. Optimization strategy for aggregating electric vehicles through VPP to participate in the carbon market[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(4): 13-22, 240.
- [2] 范宏,罗昊,陈舒阳,等.智慧楼宇型虚拟电厂辅助电网调频的优化方法[J].南方电网技术,2025,19(9):117-130.
FAN Hong, LUO Hao, CHEN Shuyang, et al. Optimization method for auxiliary power grid frequency regulation of smart building-type virtual power plant[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(9): 117-130.
- [3] 李轶,朱亚萍,王昕.考虑电动汽车出行规律的虚拟电厂鲁棒优化调度[J].电气工程学报,2024,19(2):307-315.
LI Yi, ZHU Yaping, WANG Xin. Robust optimal scheduling of virtual power plants considering travelrules of electric vehicles[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(2): 307-315.
- [4] 刘卫亮,闫倩文,张启亮,等.基于虚拟电厂区间主从博弈的车网互动优化调度[J].系统仿真学报,2024,36(7):1559-1572.
LIU Weiliang, YAN Qianwen, ZHANG Qiliang, et al. Optimal scheduling of vehicle-network interactionbased on interval stackelberg game of virtual power plant[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1559-1572.
- [5] 陈心宜,胡秦然,石庆鑫,等.新型电力系统居民分布式资源管理综述[J].电力系统自动化,2024,48(5):157-175.
CHEN Xinyi, HU Qinran, SHI Qingxin, et al. Review on residential distributed energy resource management in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 157-175.
- [6] 黄敬尧,张扬,张丙旭.计及电动汽车碳交易的电力系统经济调度方法[J].电测与仪表,2025,62(8):11-19.
HUANG Jingyao, ZHANG Yang, ZHANG Bingxu. Economic dispatching method of electric power system considering carbon trading of electric vehicles [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(8): 11-19.
- [7] 王义,靳梓康,王要强,等.考虑电动汽车共享储能特性的园区综合能源系统低碳运行[J].电力系统自动化,2024,48(5):21-29.
WANG Yi, JIN Zikang, WANG Yaoqiang, et al. Low-carbon operation of park-level integrated energy system considering shared energy storage features of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 21-29.
- [8] 《世界电动汽车展望2023》:2023年中国电动汽车保有量达到1400万辆,占汽车市场整体份额将增至18%[R].国际能源组织(2023.04.26). <https://finance.sina.com.cn/esg/2023-05-05/doc-imyssrwz3001442.shtml>.
- [9] 刘金朋,彭锦淳,邓嘉明,等.考虑电热联产的虚拟电厂两阶段鲁棒优化经济调度[J].系统仿真学报,2023,35(8):1799-1813.
LIU Jinpeng, PENG Jinchun, DENG Jiaming, et al. Two-stage robust optimization-based economic dispatch of virtual power plants considering cogeneration [J]. Journal of System

- Simulation, 2023, 35(8): 1799 – 1813.
- [10] GOUGHERI S S, DEGHANI M, NIKOOFARD A, et al. Economic assessment of multi-operator virtual power plants in electricity market: a game theory-based approach [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022 (53): 102733.
- [11] 赵力航, 常伟光, 杨敏, 等. 电力市场环境虚拟电厂两阶段能量经济优化调度[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 14 – 22.
ZHAO Lihang, CHANG Weiguang, YANG Min, et al. Two-stage energy economic optimal dispatch of virtual power plant in deregulated electricity market [J]. Electric Power, 2022, 55 (10): 14 – 22.
- [12] KONG X, WANG Z, LIU C, et al. Refined peak shaving potential assessment and differentiated decision-making method for user load in virtual power plants [J]. Applied Energy, 2023 (334): 120609.
- [13] 杨芑, 杨晓辉, 杨莉, 等. 基于碳市场与绿证分配制度的源荷低碳经济调度[J]. 南方电网技术, 2025, 19(3): 87 – 95.
YANG Peng, YANG Xiaohui, YANG Li, et al. Low-carbon economic dispatching of source and load based on carbonmarket and green certificate allocation system [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(3): 87 – 95.
- [14] 陶泽飞, 刘敏, 何旺. 计及风光不确定性和相关性的虚拟电厂参与电-碳-绿证市场优化调度[J]. 分布式能源, 2024, 9 (3): 55 – 64.
TAO Zefei, LIU Min, HE Wang. Optimization scheduling of virtual power plants participating in electric energy trade-carbon trade-green license trade considering uncertainty and correlation of wind power and PV [J]. Distributed Energy, 2024, 9 (3): 55 – 64.
- [15] 骆钊, 耿家璐, 黎博文, 等. 考虑碳-绿证交易机制的虚拟电厂分布鲁棒优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(10): 137 – 148.
LUO Zhao, GENG Jialu, LI Bowen, et al. Distributionally robust optimal dispatching for virtual power plants considering carbon-green certificate trading mechanism [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(10): 137 – 148.
- [16] 邓淑斌, 李嵘, 梁志飞, 等. 考虑碳交易和绿证交易的配电网优化运行策略[J]. 电力建设, 2023, 44(10): 149 – 156.
DENG Shubin, LI Rong, LIANG Zhifei, et al. The optimal operation strategy of distribution network considering carbon trading and green certificate trading mechanisms [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(10): 149 – 156.
- [17] 袁桂丽, 刘培德, 唐福斌, 等. 计及绿色电力证书与碳交易制度的“源-荷”协调优化调度[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 190 – 195.
YUAN Guili, LIU Peide, TANG Fubin, et al. Source-load coordination optimal scheduling considering green power certificate and carbon trading mechanisms [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(6): 190 – 195.
- [18] GAN L, CHEN X, YU K, et al. A probabilistic evaluation method of household EVs dispatching potential considering users multiple travel needs [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5858 – 5867..
- [19] 李彬, 顾程稼, 杜佳伦, 等. 考虑电热转换的虚拟电厂资源调度优化策略[J]. 供用电, 2023, 40(12): 16 – 21.
LI Bin, GU Chengjia, DU Jialun, et al. Virtual power plant resource scheduling optimization strategy considering electrothermal conversion [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(12): 16 – 21.
- [20] 许敏茹, 魏斌, 韩肖清. 计及差异化服务费定价的电动汽车聚合商两阶段调度策略[J]. 电力建设, 2023, 44(8): 95 – 106.
XU Minru, WEI Bin, HAN Xiaoqing. Two-stage scheduling strategy for electric vehicle aggregator based on differentiated pricing [J]. Electric Power Construction, 2023, 44 (8): 95 – 106.
- [21] 张琳娟, 周志恒, 陈婧华, 等. 含电动汽车的县域光伏台区储能容量优化配置研究[J]. 供用电, 2024, 41(10): 101 – 113.
ZHANG Linjuan, ZHOU Zhiheng, CHEN Jinghua, et al. Research on optimal allocation of energy storage capacity in county photovoltaic distribution station area with electric vehicles [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41 (10): 101 – 113.
- [22] 袁越, 苗安康, 吴涵, 等. 低碳综合能源系统研究框架与关键问题研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(9): 4019 – 4036.
YUAN Yue, MIAO Ankang, WU Han, et al. Review of the research framework and key issues for low-carbon integrated energy system [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50 (9): 4019 – 4036.
- [23] 段新会, 黄嵘, 齐传杰, 等. 计及碳交易与需求响应的微能源网双层优化模型[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 310 – 318.
DUAN Xinhui, HUANG Rong, QI Chuanjie, et al. Bi-level optimization model for micro energy grid considering carbon trading and demand response [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024, 45(3): 310 – 318.
- [24] 中华人民共和国生态环境部. 2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[EB/OL](2020 – 12 – 29)[2024 – 5 – 11]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202012/t20201229_815386.shtml.
- [25] 陈中, 陆舆, 邢强, 等. 考虑电动汽车碳配额的电力系统调度分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 44 – 51.
CHEN Zhong, LU Yu, XING Qiang, et al. Dispatch analysis of power system considering carbon quota for electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 44 – 51.
- [26] 黄国日, 尚楠, 梁梓杨, 等. 绿色电力消费与碳交易市场的链接机制研究[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 668 – 678.
HUAN Guori, SHANG Nan, LIANG Ziyang, et al. Research on the linkage mechanism between green power consumption and the carbon market [J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 668 – 678.
- [27] 朱炳成, 欧家新. “双碳”目标下我国绿色电力证书交易制度的规范建构[J]. 江苏大学学报(社会科学版), 2023, 25(5): 29 – 45.
ZHU Bingcheng, OU Jiabin. The standardized construction of China's green power certificate trading system under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Journal of Jiangsu University (Social Sciences Edition), 2023, 25(5): 29 – 45.
- [28] 安江涛, 刘卫亮, 林永君, 等. 绿证-碳交易融合机制下含氢综合能源系统优化调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 104 – 114.
AN Jiangtao, LIU Weiliang, LIN Yongjun, et al. Optimization scheduling of hydrogen-containing integrated energy system under green certificate-carbon trading integration mechanism [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024, 45(8): 104 – 114.
- [29] 苏志鹏, 王莉, 梁欣怡, 等. 考虑阶梯式碳交易及综合需求响应的虚拟电厂优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 174 – 182.

(下转第 126 页 Continued on Page 126)