

计及碳-绿证市场交易的含电解铝负荷的工业园区风光储容量优化配置

王天生¹,梁俊鹏²,刘新刚¹,李凤婷²

(1. 中国能源建设集团 新疆电力设计院有限公司,乌鲁木齐 830002;2. 新疆大学
电气工程学院,乌鲁木齐 830017)

摘要:推动碳-绿证市场交易机制的发展是提升能源系统绿色、低碳转型的重要举措。现有的工业园区资源容量优化配置忽略了碳-绿证市场交易机制以及电解铝负荷的柔性响应的影响,难以保证园区风电、光伏、储能配置方案的经济性与适用性。为此,提出了计及碳-绿证市场交易机制和电解铝柔性负荷的工业园区风光储容量优化配置方法。首先,基于电解铝生产用能需求与调节特性,建立电解铝柔性负荷需求响应模型;其次,研究阶梯式碳-绿证交易机制,支撑含电解铝柔性负荷的工业园区节能减碳;然后,以园区年化投资-运行成本为优化目标,考虑设备投资和场地限制、设备运行等约束,建立工业园区资源容量优化配置-调度模型;最后,案例分析结果表明所提出配置方法可有效降低园区年化成本,兼顾园区新能源高效利用的同时降低碳排放。

关键词:电解铝;工业园区;市场交易机制;容量优化配置

Optimal capacity allocation of wind-photovoltaic-storage in industrial parks with electrolytic aluminum loads considering carbon-green certificate market trading

WANG Tiansheng¹, LIANG Junpeng², LIU Xingang¹, LI Fengting²

(1. Xinjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Energy Construction Group, Urumqi 830002, China;2. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: The development of carbon-green certificate market trading mechanisms is a critical measure for advancing the green and low-carbon transformation of energy systems. In existing optimal resource capacity allocation studies for industrial parks, the impacts of such trading mechanisms and the flexible response of electrolytic aluminum loads are neglected, which compromises the economic efficiency and applicability of wind-photovoltaic-energy storage configuration schemes. To address this gap, an optimal Wind-PV-ESS capacity allocation method for industrial parks considering the above two factors is proposed. First, a demand response model for flexible electrolytic aluminum loads is established based on their production energy demand and regulation characteristics. Second, a ladder-type carbon-green certificate trading mechanism is investigated to support energy conservation and carbon reduction in these parks. Then, an integrated capacity allocation and scheduling model is constructed, with the park's annualized investment-operation cost as the objective and constraints on equipment investment, site availability, and operation fully considered. Finally, it is demonstrated through case studies that the proposed method effectively reduces annualized costs, achieves efficient new energy utilization, and lowers carbon emissions simultaneously.

Key words: electrolytic aluminum; industrial park; market trading mechanism; capacity optimization configuration

0 引言

我国《“十四五”可再生能源发展规划》中提出,工业园区、大型生产企业等周边地区,因地制宜可开展新能源电力专线供电,建设新能源自备电站^[1]。目前大多数工业园区主要依赖于外部电网送电,环境

污染严重,无法实现源侧清洁、低碳的新能源高效利用。资源优化配置作为园区运行的基础,开展工业园区新能源电力资源容量优化配置研究至关重要。

工业园区中,电解铝作为高载能产业的典型代表,具有自身独特的负荷特性,国内外关于电解铝高耗能负荷参与电网运行方面已开展了一些研究。文献[2—3]面向含电解铝等高耗能企业的工业园区,利用其可调节特性与多能互补参与电网优化,降低园区运行成本的同时促进新能源就地消纳水平。文献[4]分析了电解铝负荷平移特性,设置

收稿日期:2026-03-05;修回日期:2026-05-07

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发专项项目(2022B01016);国家自然科学基金(52467014)

了多类型高载能负荷与风电联合多阶段运行模式。但现在关于电解铝高耗能负荷的研究仍主要集中于电网调频、平移风电功率波动等。鲜有研究考虑到电解铝高能耗负荷的柔性响应特性对园区新能源容量优化配置的影响。

关于全球温室效益这一严峻环境问题,各国政府亦在不断寻求碳减排策略,市场交易机制方面碳-绿证市场交易机制应运而生。文献[5]考虑综合能源系统参与碳交易市场,引入阶梯式碳交易机制引导综合能源系统控制碳排放。文献[6]提出了碳交易机制下计及负荷柔性特征的综合能源系统低碳经济调度策略,并分析了差异化的阶梯式碳交易机制对系统经济、环境效益的影响。因此,文献[7]利用绿证背后碳减排量将绿证交易与碳交易联合,形成了绿证-碳排联合交易机制,实现环境责任和经济效益的双重目标。此外,文献[8]采用了阶梯式交易机制,分割碳-绿证交易区间,随着需购买或出售配额与证书越多,相应区间价格越高,以经济效益方式激励系统向清洁、低碳方向转型发展。上述研究均验证了电解槽柔性响应与市场交易机制的应用提升系统经济性与新能源消纳能力的有效性,但较少将市场交易机制应用于含电解铝等高耗能产业的工业园区,深入挖掘市场交易机制参与工业园区的规划与运行。

鉴于此,本文提出一种计及市场交易机制与电解铝柔性响应的工业园区资源容量优化配置方法。首先,结合电解铝生产工艺与物理特征,构建电解铝负荷的等效稳态模型,量化电解铝负荷的可调节特性;其次,提出面向电解铝负荷生产-购电碳排放交易与绿证联合交易机制,引入阶梯式交易机制,以经济激励的方式引导新能源消纳与碳排降低;然后,建立工业园区资源容量优化配置模型,模型以新能源、储能的年化投资成本与园区的年运行成本最小为目标,兼顾园区规划经济性、新能源消纳以及环保水平。最后,通过算例仿真验证了所提资源优化配置方法具有更优的新能源接入能力、低碳水平与经济性,可为含电解铝的工业园区新能源资源优化配置提供参考。

1 电解铝负荷模型构建

电解铝属于高耗能企业,生产过程中,电解槽需工作在强直流电、低电压场景下,以氧化铝为原材料,采用冰晶石-氧化铝熔盐电解法实现大规模金属铝的冶炼。以熔盐冰晶石为溶剂,将氧化铝作

为溶质溶解在冰晶石中,冰晶石的加入可将氧化铝的熔点降低至950~970℃,电解为铝和氧,有效降低了电解铝工艺的技术难题,电解铝工艺流程如图1所示。

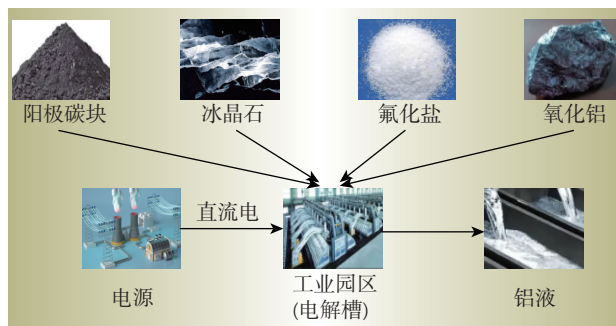


图1 电解铝生产工艺流程

Fig. 1 Flow of the electrolytic aluminum production process

电解铝企业中电解生产工序用能约占企业用电量的95%以上,本节针对电解铝企业用能仅考虑电解铝生产设备消耗的电能,即以电解铝为核心的电解铝负荷。

1.1 电解铝稳态负荷需求

在电解铝企业正常运行的情况下,电解铝负荷的电力消耗稳定,用电量不受天气影响,负荷曲线近似为一条直线,平均每生产1 t铝大约消耗12 MWh电能。电解过程中,电解槽通过变压器-整流器与电源相连,数百台电解槽串联形成一个电解槽系列,电解槽可等效为电阻与反电势电源的串联模型^[9],电解槽系列稳态等效电路图如图2所示。

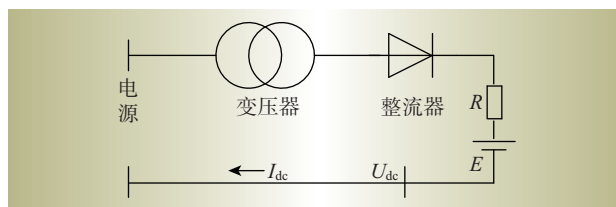


图2 电解铝稳态负荷需求

Fig. 2 Steady-state load demand for electrolytic aluminum

由稳态等效电路可知,电解铝负荷消耗的功率如式(1)一式(2)所示

$$U_{dc}^{Al} = I_{dc}^{Al} R + E \quad (1)$$

$$P_{dc}^{Al} = U_{dc}^{Al} I_{dc}^{Al} = I_{dc}^{Al2} R + I_{dc}^{Al} E \quad (2)$$

式中: P_{dc}^{Al} 、 U_{dc}^{Al} 和 I_{dc}^{Al} 分别为电解铝生产功率、电压和电流; R 和 E 分别为电解槽系列的等效电阻、等效电势。

1.2 电解铝负荷柔性响应

电解铝工艺中,把控电解槽温度是电解铝生产的关键因素,必须精准控制在950~970℃,保证冰晶石在电解槽中心的熔融状态和槽壁上的冻结状

态。温度的合理控制保证电解槽热稳定性的同时,可影响电解铝负荷需求,呈现柔性响应。

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{Al},r} \leq P_t^{\text{Al},\text{dr}} \leq P_{\max}^{\text{Al},r} \\ P_{\min}^{\text{Al},r} = P_{i,t-1}^{\text{Al}} + c_e m_e (T_{\min}^{\text{Al}} - T_{i,t-1}^{\text{Al}}) / \Delta t \\ P_{\max}^{\text{Al},r} = P_{i,t-1}^{\text{Al}} + c_e m_e (T_{\max}^{\text{Al}} - T_{i,t-1}^{\text{Al}}) / \Delta t \\ T_{\min}^{\text{Al}} \leq T_t^{\text{Al}} \leq T_{\max}^{\text{Al}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_t^{\text{Al},\text{dr}}$ 为电解铝负荷受温度影响的柔性响应功率; $P_{\max}^{\text{Al},r}$ 和 $P_{\min}^{\text{Al},r}$ 为电解铝负荷受温度影响的柔性响应功率上下限; c_e 和 m_e 为冰晶石的比热容系数及质量; $T_{\max}^{\text{Al}}$ 和 $T_{\min}^{\text{Al}}$ 分别为电解槽所处环境温度上下限; T_t^{Al} 为电解槽所处环境温度; Δt 为单位调度时长。

电解铝实际负荷需求 $P_t^{\text{Al},\text{re}}$ 为

$$P_t^{\text{Al},\text{re}} = P_{\text{dc}}^{\text{Al}} - P_t^{\text{Al},\text{dr}} \quad (4)$$

为保证总调度时段电解铝企业制铝产量不变,需对电解铝实际负荷需求做出以下约束

$$\sum_{t=1}^T (P_{\text{dc}}^{\text{Al}} - P_t^{\text{Al},\text{dr}}) = 0 \quad (5)$$

2 阶梯式电-碳-绿证交易机制

2.1 碳交易模型

碳排放权交易市场通过碳排放配额交易的手段激励企业或园区主动降低自身碳排放量。具体而言,当系统实际碳排放量低于政府为其免费分发的碳排放配额时,可向市场出售盈余碳排放配额获取经济收益;反之,系统需向市场购买额外碳排放配额,补足差额完成政府碳排放的考核标准。

我国目前主要采用基线法对企业碳排放额度进行分配,含电解铝的工业园区碳排放配额分配如式(6)所示

$$E_{\text{al}}^{\text{ce}} = \sum_{t=1}^T \lambda_{\text{Al}} P_{i,t}^{\text{Al},\text{re}} \Delta t \quad (6)$$

式中: $E_{\text{al}}^{\text{ce}}$ 为工业园区内电解铝企业的总碳排放配额; λ_{Al} 为电解槽每单位耗电量获得的碳排放配额值。

根据国家发改委发布的《中国电解铝生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》,电解铝企业实际碳排放量除购电产生的碳排放外,需计及工业生产过程中的碳排放与能源作为原材料用途的碳排放。计算方法如式(7)所示

$$M_{\text{al}}^{\text{ce}} = M_{\text{b}}^{\text{ce}} + M_{\text{m}}^{\text{ce}} + M_{\text{p}}^{\text{ce}} + M_{\text{e}}^{\text{ce}} \quad (7)$$

式中: $M_{\text{al}}^{\text{ce}}$ 为电解铝企业二氧化碳总排放量; M_{b}^{ce} 为企业燃料燃烧碳排放量,由于本文仅考虑电解铝的电解过程,不涉及燃料燃烧部分,暂不考虑; M_{m}^{ce} 为能源作为原材料用途导致的碳排放量; M_{p}^{ce} 为工业生产过程中的碳排放量; M_{e}^{ce} 为企业购入电能导致

的碳排放量。

(1) 能源作为原材料导致的碳排放

电解铝工艺本质为化学反应,阳极碳块在该反应中作为还原剂被不断消耗,从而产生碳排放。计算公式为

$$M_{\text{m}}^{\text{ce}} = \sum_{t=1}^T E_{\text{F},\text{c}} P_{i,t}^{\text{Al},\text{re}} \Delta t \quad (8)$$

$$E_{\text{F},\text{c}} = \frac{44}{12} \times N_{\text{C},\text{c}} (1 - A_{\text{c}} - S_{\text{c}}) \quad (9)$$

式中: $E_{\text{F},\text{c}}$ 为阳极碳块消耗的二氧化碳排放因子; $N_{\text{C},\text{c}}$ 为吨铝阳极碳块净耗; A_{c} 为阳极碳块的平均灰分含量; S_{c} 为阳极碳块的平均含硫量。

(2) 工业生产过程中的碳排放

电解铝制造过程中,电解质水平过低或加工时间延迟等因素均会引发阳极效应,不仅会导致槽电压急剧升高,还会排放全氟化碳。阳极效应导致的温室气体排放如式(10)所示

$$M_{\text{p}}^{\text{ce}} = (6\,500 E_{\text{F},\text{CF}_4} + 9\,200 E_{\text{F},\text{C}_2\text{F}_6}) \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{Al},\text{re}} \Delta t \quad (10)$$

式中: CF_4 和 C_2F_6 的全球变暖潜能值分别为 6 500 和 9 200; E_{F,CF_4} 和 $E_{\text{F},\text{C}_2\text{F}_6}$ 分别为阳极效应的 CF_4 、 C_2F_6 排放因子。

(3) 电解铝企业购入电能的碳排放量

企业购买电量不仅需要付出电力成本,还需承担购买电力所产生的碳排放费用,如式(11)所示

$$M_{\text{e}}^{\text{ce}} = \sum_{t=1}^T \kappa^{\text{ce}} P_t^{\text{e},\text{grid}} \quad (11)$$

式中: κ^{ce} 为购买电力的碳排放因子。

电解铝企业需交易的碳排放配额如式(12)所示

$$E_{\text{al}}^{\text{tra}} = M_{\text{al}}^{\text{ce}} - E_{\text{al}}^{\text{ce}} \quad (12)$$

式中: $E_{\text{al}}^{\text{tra}}$ 为电解铝企业需交易的碳排放配额量。

2.2 绿证交易模型

绿证作为国家对新能源上网电量的认可凭证,1本绿证对应1 MWh的非水可再生能源发电量。企业消纳可再生能源发电量时,可获得相应数量的绿证,当企业获得绿证数量超过其消纳责任权重考核指标要求时,可将盈余绿证出售获取收益;反之,须购买绿证满足考核要求,以经济激励的方式促进企业消纳绿色电力。

(1) 电解铝企业配额指标

为考核企业新能源消纳,政府规划企业用电量中新能源电量的最低占比,激发企业使用绿色电力的积极性。

$$N_{\text{gc}}^{\text{ne}} = \varphi_{\text{gc}} P_t^{\text{Al},\text{re}} \quad (13)$$

式中: $N_{\text{gc}}^{\text{ne}}$ 为电解铝企业绿色电力证书配额指标; φ_{gc} 为绿证配额系数。

(2) 电解铝企业获得的绿色证书

$$N_{gc}^{ob} = \sum_{t=1}^T (P_t^{wt} + P_t^{pv}) \Delta t \quad (14)$$

式中： N_{gc}^{ob} 为电解铝企业消纳绿色电力获得的绿色证书； P_t^{wt} 和 P_t^{pv} 分别为风电、光伏 t 时刻发电量。

电解铝企业需交易的绿色证书为

$$N_{gc}^{tra} = N_{gc}^{ne} - N_{gc}^{ob} \quad (15)$$

式中： N_{gc}^{tra} 为电解铝企业需交易的绿色证书。

2.3 绿证-碳联合交易机制

绿证持有者可根据绿证对应的新能源供能相比于化石能源供能所减少的碳排放量，在核算企业需交易的碳排放配额时，抵扣部分碳排放，从而绿色证书可间接参与碳市场交易。

(1) 单位绿证可抵消的碳排放量

根据新能源发电与化石能源不同的温室气体排放量，得到绿证背后碳减排量，计算方式为

$$E_{gc}^{ce} = E_{fo}^{ce} - E_{re}^{ce} \quad (16)$$

式中： E_{gc}^{ce} 为单个绿电证书的碳减排量； E_{fo}^{ce} 为化石能源发电 1 MWh 造成的碳排放量； E_{re}^{ce} 为风电、光伏发电 1 MWh 造成的碳排放量。

(2) 绿证抵消后企业需交易的碳排放配额

由于绿证可抵消一部分碳排放量，抵消后的碳排放配额为

$$E_{al, re}^{tra} = E_{al}^{tra} - E_{gc}^{ce} N_{gc}^{ne} \quad (17)$$

式中： $E_{al, re}^{tra}$ 为绿证抵消后的电解铝企业需交易碳排放配额。

2.4 阶梯式交易机制

阶梯式交易机制将碳排放配额、绿色证书的交易数量划分为若干连续的价格区间，交易价格随交易数量的增加呈阶梯式变化，即随着交易数量的上升，交易价格将不断攀升，因此相比于传统固定价格交易机制，阶梯式机制能够通过“超额惩罚、适度奖励”的经济杠杆，更精准地引导市场主体主动降低碳排放、提高新能源消纳比例，以经济成本对电解铝企业碳排放以及新能源消纳起到更强约束作用。具体模型为

$$C_j^{tra} = \begin{cases} \lambda_j E_j^{tra} & E_j^{tra} \leq l_j \\ \lambda_j (1 + \alpha) (E_j^{tra} - l_j) + \lambda_j l_j & l_j \leq E_j^{tra} \leq 2l_j \\ \lambda_j (1 + 2\alpha) (E_j^{tra} - 2l_j) + \lambda_j (2 + \alpha) l_j & 2l_j \leq E_j^{tra} \leq 3l_j \\ \lambda_j (1 + 3\alpha) (E_j^{tra} - 3l_j) + \lambda_j (3 + 3\alpha) l_j & 3l_j \leq E_j^{tra} \leq 4l_j \\ \lambda_j (1 + 4\alpha) (E_j^{tra} - 4l_j) + \lambda_j (4 + 6\alpha) l_j & E_j^{tra} \geq 4l_j \end{cases} \quad (18)$$

式中： C_j^{tra} 为第 j 类交易品种造成的成本； α 为交易价格增长率； l_j 为第 j 类交易品种的交易区间长度；

λ_j 为第 j 类交易品种的交易基础价格； E_j^{tra} 为第 j 类交易品种的交易量。

3 工业园区资源容量优化配置模型

3.1 园区系统架构

本文针对含电解铝的工业园区开展资源规划研究，工业园区的电能源于外部电网购电、风电、光伏等新能源功率以及电池储能放电，负荷侧主要包括园区常规电负荷与电解铝负荷，如图3所示。

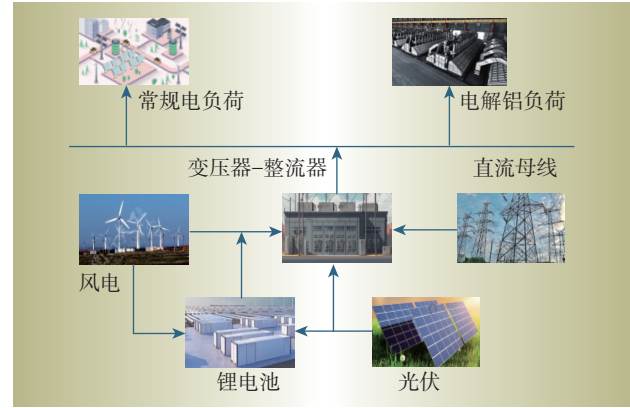


图3 含电解铝的工业园区架构

Fig. 3 Structure of industrial zones with electrolytic aluminum.

3.2 目标函数

本文建立的工业园区资源容量优化配置模型的目标函数由园区新能源、储能年化投资成本 C_{inv} 与园区年运行成本 C_{ope} 组成，旨在实现工业园区资源规划的经济性，并在此规划方案下实现园区低碳-清洁-经济运行。园区目标函数如下所示

$$\min C_{total} = C_{inv} + C_{ope} \quad (19)$$

式中： C_{total} 为工业园区总成本。

(1) 工业园区资源配置成本

$$\begin{cases} C_{inv} = \sum_{u=1}^U c_u U_u d \\ U \in \{\text{风电、光伏、锂电池}\} \end{cases} \quad (20)$$

式中： $d = r(1+r)^m / (1+r)^m - 1$ 为投资成本回收系数； c_u 为资源 u 单位投资成本； U_u 为资源 u 配置容量； U 为资源种类。

(2) 工业园区年运行成本

基于资源配置结果，园区年运行成本综合考虑新能源弃电成本 C_{ab} 、电解铝柔性负荷调节成本 C_{dr} 、设备运维成本 C_{fix} 、购电成本 C_e^{buy} 、碳交易 C_{ce} 、绿证交易 C_{gc} 成本，目标函数为

$$\min C_{ope} = C_{ab} + C_{dr} + C_{fix} + C_{buy} + C_{ce} + C_{gc} \quad (21)$$

$$C_{ab} = \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T w_s c_{ab} (P_{s,t}^{wt,pre} + P_{s,t}^{pv,pre} - P_{s,t}^{wt} - P_{s,t}^{pv}) \quad (22)$$

$$C_{dr} = \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T w_s c_{dr} |P_{s,t}^{Al,dr}| \quad (23)$$

$$C_{fix} = \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \sum_{u=1}^U c_{fix}^u P_{s,t}^u \quad (24)$$

$$C_e^{buy} = \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T c_t^e P_{s,t}^{e,grid} \quad (25)$$

式中: w_s 为典型日 s 出现概率; c_{ab} 为单位新能源弃电成本; $P_{s,t}^{wt,pre}$ 和 $P_{s,t}^{pv,pre}$ 分别为典型日 s 下 t 时刻风电、光伏预测功率; $P_{s,t}^{wt}$ 和 $P_{s,t}^{pv}$ 分别为典型日 s 下 t 时刻风电、光伏调度功率; c_{dr} 为单位电解铝负荷需求响应成本; c_{fix}^u 为资源 u 的单位维护成本; $P_{s,t}^u$ 为资源 u 在典型日 s 下 t 时刻的运行功率; $P_{s,t}^{e,grid}$ 为园区在典型日 s 下 t 时刻的向电网购电功率。

碳交易成本 C_{ce} 、绿证交易成本 C_{gc} 如式(20)所示。

3.3 约束条件

工业园区约束条件包含资源投建占地面积约束、功率平衡约束、新能源机组功率约束、设备运行约束以及备用约束等。

(1) 资源投建占地面积约束

考虑到工业园区运行实际受安装场地限制,各类资源的最大配置容量受到限制。

$$0 \leq U_u \leq U_{u,max} \quad u \in U \quad (26)$$

式中: U_u 为设备 u 的配置容量; $U_{u,max}$ 为考虑占地面积后设备 u 的配置容量上限。

(2) 功率平衡约束

$$P_{s,t}^{wt} + P_{s,t}^{pv} + P_{s,t}^{e,grid} + P_{s,t}^{es,dis} = P_{s,t}^{es,ch} + P_{s,t}^{el} + P_{s,t}^{Al} \quad (27)$$

式中: $P_{s,t}^{es,dis}$ 和 $P_{s,t}^{es,ch}$ 分别为电池储能在典型日 s 下 t 时刻的充放电功率; $P_{s,t}^{el}$ 为工业园区典型日 s 下 t 时刻的常规电负荷需求。

(3) 新能源功率约束

风电、光伏日前优化调度功率按不大于预测值的运行方式出力

$$\begin{cases} 0 \leq P_{s,t}^{wt} \leq P_{s,t}^{wt,pre} \\ 0 \leq P_{s,t}^{pv} \leq P_{s,t}^{pv,pre} \end{cases} \quad (28)$$

(4) 电网购电约束

考虑到工业园区源侧新能源功率常出现强不确定性,为保证园区安全稳定运行与电解铝生产质量,园区通过联络线连接外部电网购电。但为不影响主网电能质量,园区电能暂不考虑向主网输送。

$$\begin{cases} P_{min}^{e,grid} \leq P_{s,t}^{e,grid} \leq P_{max}^{e,grid} \\ \Delta P_{min}^{e,grid} \leq P_{s,t}^{e,grid} - P_{s,t-1}^{e,grid} \leq \Delta P_{max}^{e,grid} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $P_{max}^{e,grid}$ 和 $P_{min}^{e,grid}$ 分别为主网向园区售电上下限; $\Delta P_{max}^{e,grid}$ 和 $\Delta P_{min}^{e,grid}$ 分别为主网向园区售电功率波动上

下限。

(5) 备用约束

工业园区源-荷两端常表现为强不确定性,为保证园区正常运行,需预留备用容量平衡园区源-荷两端功率波动。

$$\begin{cases} \min\{\Delta P_{max}^{e,grid}, P_{max}^{e,grid} - P_t^{e,grid}\} \geq \\ \alpha_{load}(P_t^{load} + P_t^{Al}) + \alpha_{re}(P_t^{wt} + P_t^{pv}) \\ \min\{\Delta P_{min}^{e,grid}, P_t^{e,grid} - P_{min}^{e,grid}\} \geq \\ \alpha_{load}(P_t^{load} + P_t^{Al}) + \alpha_{re}(P_t^{wt} + P_t^{pv}) \end{cases} \quad (30)$$

式中: α_{load} 和 α_{re} 分别为园区电能负荷需求和可再生能源功率预测的备用系数,分别取0.05和0.15。

4 算例分析

4.1 算例参数设置

为验证本文所提容量优化配置方法的经济、清洁、低碳特性,以图3所示工业园区架构为测试对象,展开算例分析研究。其中,园区通过联络线与外部电网相连,联络线额定功率为1 000 MW。计及占地面积约束的工业园区风电、光伏最大配置容量分别为2 000 MW和1 000 MW。将全年划分为夏季、冬季以及过渡季节,分别选取典型日参与工业园区调度,各季节分别按92天、92天和181天计算。工业园区各季节典型日新能源预测信息、常规电负荷用能需求分别如附录图A-1、图A-2和图A-3所示。园区风电、光伏、锂电池配置参数如表1所示,阶梯式交易参数如表2所示,价格增长率均取25%。

表1 工业园区资源优化配置参数

Table 1 Parameters for the optimal allocation of resources in industrial parks

风电	参数	光伏	参数	锂电池	参数
$c_{wt}/$ (元·kW ⁻¹)	8 000	$c_{pv}/$ (元·kW ⁻¹)	5 000	$c_m/$ (元·kW ⁻¹)	4 000
$m_{wt}/$ 年	25	$m_{pv}/$ 年	25	$m_{wt}/$ 年	10

表2 阶梯式交易机制参数^[10]

Table 2 Ladder trading mechanism parameters^[10]

碳交易	参数	绿证交易	参数
$\lambda_{cet}/$ (元·t ⁻¹)	250	$\lambda_{gct}/$ (元·本 ⁻¹)	100
$l_{cet}/$ t	2 000	$l_{gct}/$ 本	200

4.2 不同方案下园区资源优化配置结果对比分析

为验证本文所提电解铝柔性响应与市场交易机制对园区资源低碳、经济、清洁配置的有效性,本

节设置以下4种规划方案进行对比分析。

方案1:考虑风电、光伏、锂电池资源配置,园区综合考虑资源配置成本与年运行经济性,未考虑园区参与市场交易与电解铝负荷柔性响应;

方案2:在方案1的基础上,考虑电解铝负荷柔性响应对工业园区资源配置的影响;

方案3:在方案2的基础上,考虑电解铝负荷参与阶梯式碳交易对工业园区资源配置的影响。

方案4:采用本文所提优化方法。

各方案资源优化配置结果如表3所示。表4为各方案工业园区配置结果中碳-绿证交易成本、运维成本、弃能成本等目标结果。

表3 不同方案下工业园区资源优化配置结果

Table 3 Results of resource optimization allocation in industrial parks under different cases

	MW			
配置结果	方案1	方案2	方案3	方案4
风电	1 499.50	1 611.60	1 689.50	1 750.40
光伏	659.78	681.87	648.20	588.21
锂电池	215.93	229.34	230.55	233.56

表4 不同方案下工业园区成本优化结果

Table 4 Cost optimization results of industrial parks under different cases

优化结果	方案1	方案2	方案3	方案4
投资成本/ 10^7 元	156.15	166.40	169.68	172.51
固定维护成本/ 10^7 元	37.27	39.66	40.25	40.82
年运行成本/ 10^7 元	224.35	175.12	247.78	194.50
弃电成本/ 10^7 元	15.13	6.85	5.69	3.58
购电成本/ 10^7 元	209.22	145.22	140.37	133.04
调节成本/ 10^7 元		23.05	23.05	23.05
碳交易成本/ 10^7 元			85.67	81.21
绿证交易成本/ 10^7 元				-46.38
年碳排放量/ 10^5 t	56.38	49.99	49.33	48.49
新能源消纳率/%	89.57	91.65	93.08	95.72

从表2和表3中可以看出,一方面,相比于方案1,方案2计及了电解铝负荷柔性响应增强园区调度灵活特性,园区削峰填谷和新能源消纳能力更优,风电、光伏装机容量分别提升了7.47%和3.34%,投资成本虽然上升了6.56%,但园区年运行成本得到优化,大大降低了对外部电网的依赖。另一方面,方案3相比于方案2引入阶梯式市场交易机制,园区须通过交易购买巨额碳排放配额,才能完成电解铝工艺的碳排放,导致产生了大量成本,方案3年运行成本相比于方案2上升了41.49%,但园区碳排放量大幅降低。相比于方案3,方案4进一步引入了阶梯式绿证交易机制,以及利用绿证背后的碳减排量,降低园区需购买的碳排放配额,导致园区更加

倾向于使用清洁低碳的风电、光伏,风电装机容量进一步提升了3.60%,园区碳排放量降低了1.70%的同时新能源消纳率上升了2.64%,园区亦可通过绿证交易出售盈余绿证获取收益,优化自身经济水平。

4.3 不同方案下园区电能调度结果对比分析

为进一步阐明电解铝负荷柔性响应与市场交易对园区日前调度计划的影响,本节选取冬季典型日调度结果进行对比分析,分别如附录图A-4(a)和图A-4(b)所示。

由图可知,相比于常规工业园区调度计划,计及电解铝柔性响应与市场交易机制的方案4在各时刻新能源消纳与降低对外部电网依赖方面有巨大优势。原因在于园区以经济性为目标,倾向于优先消纳风电、光伏功率,旨在减少风电、光伏弃能现象发生,降低弃电成本与购电成本。其中,方案3引入电解铝柔性响应后,转移了在11:00—14:00与18:00—20:00等高峰时刻的电解铝负荷至24:00—次日06:00的风电高发时刻,拓宽了新能源消纳空间;引入市场交易机制后,方案3对高碳排放的外部电网电能产生排斥,风电、光伏总功率远高于方案1。但在方案3中,外部电网受最小购电量与备用约束的限制,外部电网仍存在一定的最小出力,因此在负荷低谷与新能源高发重合时刻仍会出现部分弃电现象。

4.4 电解铝负荷上升对园区配置结果影响分析

上述研究均为考虑电解铝负荷为900 MW时的园区资源容量配置结果。为进一步验证电解铝柔性响应特性对工业园区配置结果的影响,现分析电解铝负荷从600~1 350 MW时,园区资源优化配置结果变化情况,结果如附录表A-1与图A-5所示。

随着电解铝负荷不断增长,园区电能负荷需求不断上升,园区需配置更多资源满足用能需求,园区的投资成本急剧攀升。一方面,风电、光伏配置容量由1 311.7 MW、482.7 MW持续增长至2 000 MW、1 207.6 MW,由各季节典型日预测信息可知,各季节典型日下风电标幺值多数高于光伏,同时由于电解铝负荷可近似等效为一条直线,园区源侧资源投建中优先考虑风电,但受到园区实际建设场景限制,风电最大配置容量为2 000 MW,后续进一步考虑投建光伏;另一方面,电解铝负荷增长意味着荷侧可调节资源不断上升,面对风电、光伏的规模出力,仍可保持较高的新能源消纳占比,同时降低对外部电网的依赖,购电导致的碳排放量不断降低。

5 结束语

本文结合电解铝生产工艺,量化电解槽负荷可

调节特性并参与园区优化调度中,计及电解铝负荷工艺-购电碳排放,构建电解铝碳-绿证交易模型,进而以新能源-储能年化投资成本与园区年运行成本最小为目标,建立园区资源容量优化配置模型,通过多个算例分析结果表明:

(1) 采用本文所提的园区资源容量优化配置方法,可有效降低园区年化投资-运行成本,并提高新能源消纳率、降低碳排放以及园区对外部电网的依赖。

(2) 本文所建立的电解铝企业实际碳排放模型详细分析了电解铝负荷生产-用电全流程碳排放量,构建绿证交易机制激励园区投资新能源机组,产生经济效益,对含电解铝企业的工业园区经济效益提升以及绿色低碳发展具有一定的指导意义。

然而园区实际参与市场交易时,碳-绿证分属不同交易主体,可能存在信息重复计算问题,导致交易机制复杂,园区合规负担严重。因此下一步研究需首先清晰界定碳配额与绿证的商品属性、归属以及抵扣关系,避免重复计算和双重征税/激励。

附录见本刊网络版(<http://dsm.ijournals.cn>)。

参考文献:

- [1] 《“十四五”可再生能源发展规划》印发[J]. 节能与环保, 2022, (6): 6.
“The 14th Five-Year Plan for Renewable Energy Development” Issued [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2022, (6): 6.
- [2] 潘廷哲, 王宗义, 杨晨, 等. 面向电力需求响应的工业园区综合能源系统优化调控研究[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(6): 62-67.
PAN Tingzhe, WANG Zongyi, YANG Chen, et al. Research on optimal regulation and control of industrial park integrated energy system oriented to power demand response[J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(6): 62-67.
- [3] 蒋雪怡, 徐箭, 廖思阳, 等. 考虑工业用户响应意愿差异性的工业园区多类型负荷协同平抑风电功率波动控制方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(9): 876-885.
JIANG Xueyi, XU Jian, LIAO Siyang, et al. A control method for coordinating multiple types of loads in industrial parks to mitigate wind power fluctuations considering the differences in industrial users' response intentions[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Science Edition), 2022, 55(9): 876-885.
- [4] 张斌, 司大军, 李凡, 等. 计及电解铝负荷需求侧响应的风电并网调峰研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(7): 31-38.
ZHANG Bin, SI Dajun, LI Fan, et al. Research on wind power grid peak regulation considering demand side response of electrolytic aluminum load [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(7): 31-38.
- [5] 张金良, 潘敏, 庄颖. 基于合作电碳交易的多园区综合能源系统两阶段优化调度方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(8): 29-36.
ZHANG Jinliang, PAN Min, ZHUANG Ying. A two-stage optimization scheduling method for multi-plant integrated energy system based on cooperative electricity carbon trading[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 29-36.
- [6] 宋晓通, 李文博, 周京华, 等. 碳交易机制下计及P2G及负荷柔性特征的低碳经济调度[J]. 电测与仪表, 2025, 62(4): 34-43, 112.
SONG Xiaotong, LI Wenbo, ZHOU Jinghua, et al. Low-carbon economic scheduling considering P2G and load flexibility characteristics under the carbon trading mechanism[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2025, 62(4): 34-43, 112.
- [7] 崔杨, 沈卓, 王铮, 等. 考虑绿证-碳排等价交互机制的区域综合能源系统绿色调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4 508-4 517.
CUI Yang, SHEN Zhuo, WANG Zheng, et al. Green dispatch of regional integrated energy system considering green certificates-carbon emission equivalence interaction mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4 508-4 517.
- [8] GAO M, XIANG L, ZHU S, et al. Scenario probabilistic data-driven two-stage robust optimal operation strategy for regional integrated energy systems considering ladder-type carbon trading [J]. Renewable Energy, 2024, 237: 121 722.
- [9] 王越, 谢海鹏, 祝昊. 电解铝工业园区的源荷协同优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 132-140.
WANG Yue, XIE Haipeng, ZHU Hao. A source-load coordinated optimization configuration method for electrolytic aluminum industrial parks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 132-140.
- [10] 贾宏杰, 徐畅, 靳小龙, 等. 考虑绿证-碳排联合交易的电解铝企业参与电-碳市场决策方法[J]. 电网技术, 2025, 49(10): 4 174-4 183.
JIA Hongjie, XU Chang, JIN Xiaolong, et al. Decision-making method for electrolytic aluminum enterprises participating in electricity-carbon market considering the joint trading of green certificates and carbon emissions [J]. Power System Technology, 2025, 49(10): 4 174-4 183.

作者简介:

王天生(1987),男,河北张家口人,工程师,主要从事电力规划咨询和储能等方面的工作。

(责任编辑 崔素媛 王晗雯 安然)

附录 A

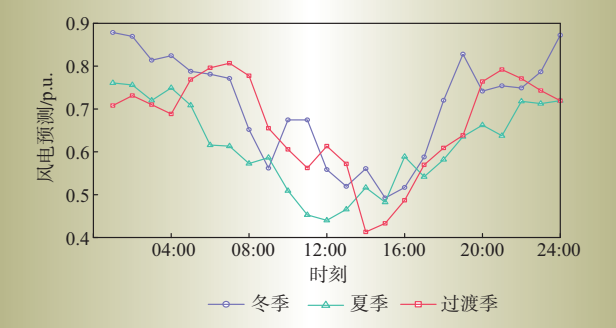


图 A-1 各季节典型日风电功率标么值

Fig. A-1 Typical daily WT power per unit value in each season.

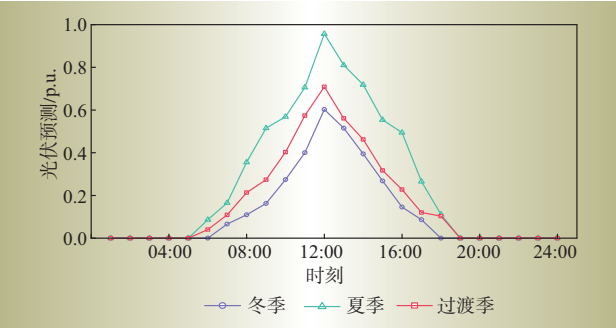


图 A-2 各季节典型日光伏功率标么值

Fig. A-2 Typical daily PV power per unit value in each season.

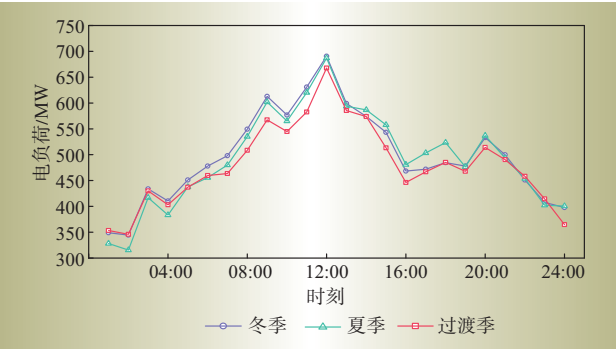


图 A-3 各季节典型日常规电负荷需求

Fig. A-3 Typical daily electricity load demands for each season

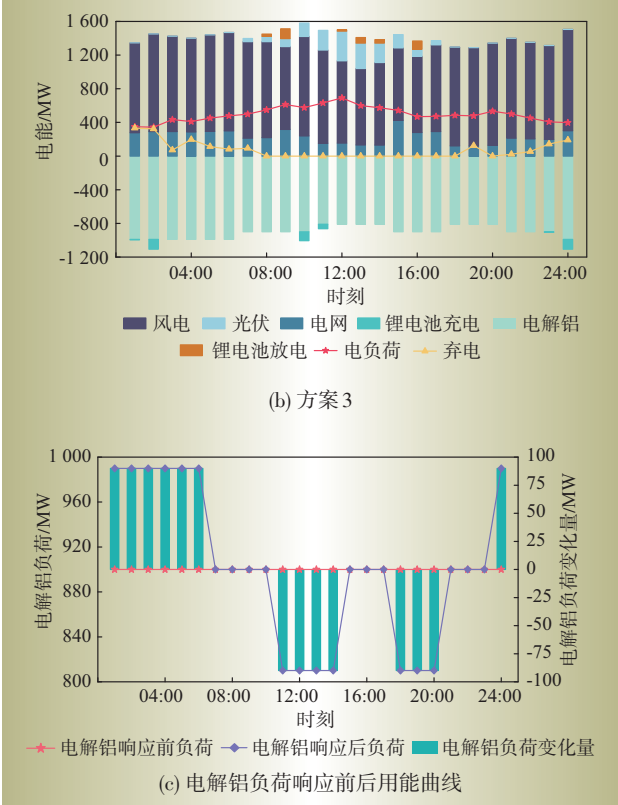
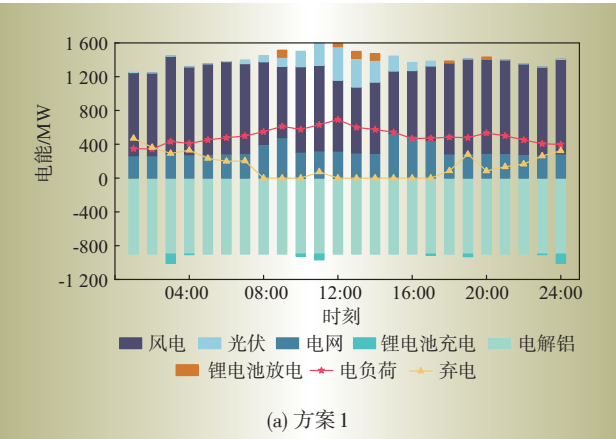


图 A-4 不同方案下园区调度结果

Fig. A-4 Results of electricity dispatching in the park under different schemes

表 A-1 电解铝负荷变化下园区优化结果

Table A-1 Configuration optimization results of the park under the variation of electrolytic aluminum load

电解铝负荷/MW	投资成本/ 10 ⁷ 元	运行成本/ 10 ⁷ 元	新能源消 纳率/%	购电碳排 放量/10 ⁵ t
600	131.5	195.2	92.16	21.62
750	453.1	195.0	93.55	21.09
900	172.5	194.5	95.72	20.43
1 050	193.0	193.6	96.88	19.99
1 200	213.0	193.1	98.02	19.63
1 350	225.5	193.0	98.64	18.50

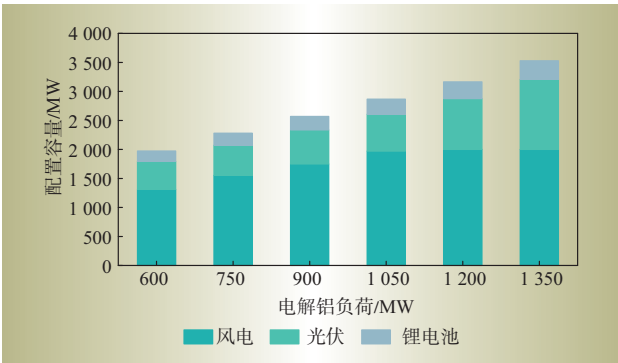


图 A-5 电解铝负荷变化下园区资源容量配置结果

Fig. A-5 Result of resource capacity allocation in the park under the variation of electrolytic aluminum load